

Studio della vegetazione in aree mediterranee tramite integrazione di sensori a diversa risoluzione

L. Giordano^a, F. Borfecchia^b, C. Trotta^c, L. De Cecco^b

^aENEA – Unità tecnico-scientifica BIOTEC-DES; Via Anguillarese 301, 00060, S.Maria di Galeria (Roma), Italia; tel. 06304883316, e-mail: ludovica.giordano@casaccia.enea.it

^bENEA – Unità tecnico-scientifica CLIM-OSTES ; Via Anguillarese 301, 00060, S.Maria di Galeria (Roma), Italia

^cUniversità degli Studi della Tuscia, Dipartimento di Ecologia; Via S. Giovanni Decollato 1, 00100, Viterbo, Italia.

Riassunto

Negli ultimi anni l'uso del telerilevamento ha consentito di aumentare notevolmente le conoscenze sulla vegetazione ed i suoi cambiamenti. In particolare, sono stati largamente utilizzati modelli cosiddetti empirici per la derivazione quantitativa di parametri biofisici della vegetazione. Tuttavia, la maggior parte degli studi ha riguardato aree, naturali o coltivate, relativamente omogenee ed occorre pertanto estendere i risultati ottenuti ad ambienti più eterogenei e complessi. A tale scopo, in questo studio viene valutata l'utilità dei satelliti ad alta risoluzione, quali IKONOS, nel processo di *upscaling* di misure di Indice di Area Fogliare (LAI) effettuate mediante strumentazione LI-COR LAI Plant Canopy Analyzer su vegetazione di tipo mediterraneo. Sono stati testati diversi Indici spettrali di Vegetazione (VI) oltre ad un approccio multivariato che si basa su tutte le bande di acquisizione disponibili e sul coseno dell'angolo di illuminazione, quest'ultimo introdotto per tenere conto degli effetti topografici delle aree di studio. L'approccio multivariato si è dimostrato maggiormente adatto fornendo le correlazioni migliori con i dati di LAI misurati a terra ($r^2=0.80$, RMSE =0.22, $p<.0001$) ed è stato utilizzato per produrre una distribuzione del parametro LAI alla scala IKONOS. La mappa di LAI così prodotta è stata quindi utilizzata per determinare i parametri di *best fit* con l'indice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), derivato da un'immagine Landsat TM, che saranno utilizzati per un'analisi temporale della vegetazione attraverso una serie annuale di immagini Landsat.

Abstract

Over the last decade lot of knowledge has been gained on vegetation cover/changes through the use of remote sensing techniques. In particular, empirical models have been largely used to quantitatively retrieve important vegetation biophysical parameters. However, most of the studies have concerned relatively homogenous natural or cropped areas and there is a need to extend the developed relationships towards more complex and mixed environment. For this purpose, in this study the utility of high spatial resolution satellite data (e.g., IKONOS) in upscaling ground-based measurements of Leaf Area Index (LAI) collected by means of a LI-COR LAI Plant Canopy Analyzer instrument in typical Mediterranean vegetation communities have been evaluated. Several spectral vegetation indices (VI) and a multiple regression approach using all the available channels and the cosine of the illumination angle (accounting for topographical effects) were tested. The latter yielded the best correlations with observations ($r^2=0.80$, RMSE =0.22, $p<.0001$) and was used to produce a LAI spatially continuous coverage at the IKONOS scale. Then, such an IKONOS-based LAI map was utilised for establishing a functional relationship ($r^2=0.86$, RMSE =0.20, $p<.0001$) with Landsat-NDVI which will be used to perform a temporal analysis through a yearly series (1984-2004) of Landsat TM images.

Introduzione

Molte regioni mediterranee stanno sperimentando processi di degrado del suolo e della vegetazione indotti sia da cambiamenti delle condizioni climatiche sia dall'aumento della pressione antropica. Questi processi, in genere, provocano cambiamenti sostanziali nella distribuzione e struttura della vegetazione che possono essere proficuamente documentati attraverso dati di osservazione della terra. In particolare, studi precedenti hanno mostrato le potenzialità del telerilevamento satellitare per la mappatura estensiva di importanti caratteristiche della vegetazione, quali ad esempio la biomassa, la produttività, la frazione di radiazione fotosinteticamente attiva (FPAR) e l'indice di area fogliare (LAI; leaf area/ground area). Quest'ultimo è un parametro di enorme importanza in quanto *input* di molti modelli climatologici (Tian Y. et al., 2002), idrologici (D'Urso, 1999) ed ecologici (Gower et al., 1999, Asner, 2003, Gong, 2003). Poichè gran parte della ricerca finora condotta su aree boschive riguarda solitamente coperture piuttosto omogenee, soprattutto a conifere (Chen et al., 2004, Eklundh et al. 2001, Brown et al., 2000, Fassnacht et al. 1997), c'è un crescente bisogno di incrementare la capacità di stima di questo parametro in formazioni vegetali diverse, ma soprattutto eterogenee come quelle che caratterizzano le regioni mediterranee. L'obiettivo primario di questo studio, che fa parte di un progetto più ampio denominato RIADE (www.riade.net) e mirato allo studio dei processi di desertificazione, è quello di sviluppare un modello empirico per la stima del LAI calibrato su misure a terra eseguite in area mediterranea ed in particolare lungo il litorale ionico della regione Basilicata.

Aree di studio

Le aree di studio prese in considerazione ricadono nella zona del metapontino, in Basilicata. Si tratta di due siti con caratteristiche differenti ma entrambi rappresentativi della vegetazione naturale spontanea locale, denominati nel seguito *Pantano* e *Rotondella*.

La prima area, che si estende per circa 500 ettari su una zona costiera e pianeggiante, ha un alto valore naturalistico essendo quanto rimane di un'antica foresta planiziale igrofila di 1600 ettari ed è infatti stata proposta come Sito di Interesse Comunitario. Recentemente il bosco e le aree circostanti sono diventate un'area naturale protetta. La vegetazione è qui rappresentata essenzialmente da un bosco a frassino, pioppo, olmo e ontano (*Fraxinus oxycarpa*, *Populus canescens*, *Ulmus minor* e *Alnus glutinosa*) e da macchia alta e bassa prevalentemente con fillirea, lentisco e ginepro (*Phyllirea latifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Juniperus oxycedrus*). L'altro sito, *Rotondella*, si trova a circa 15 chilometri nell'interno, in un territorio topograficamente più complesso con elevazione da 500m a 800m s.l.m.. Qui possono essere distinte tre diverse tipologie di vegetazione: un bosco a leccio (*Quercus ilex*), un bosco misto caducifoglio con querce e carpini (*Quercus cerris*, *Q. pubescens* e *Carpinus orientalis*) e una zona di macchia alta e di mantello con leccio, fillirea, ginestra (*Spartium junceum*) e lentisco.

Materiali

Le campagne di misura del LAI sono state effettuate durante il periodo Giugno-Luglio 2004 in 54 siti di dimensioni 12x12 m, precedentemente attribuiti alle varie tipologie di vegetazione mediante rilievi fisionomico-strutturali. Le misure di LAI sono state eseguite con il LAI-2000 (LICOR, Lincoln, NE) *Plant Canopy Analyzer* (Welles, Norman, 1991). Questo strumento, dotato di un sensore ottico di tipo emisferico con 5 diversi angoli di acquisizione, calcola il rapporto tra la radiazione trasmessa e la radiazione incidente rispettivamente attraverso e sopra una copertura vegetale, consentendo di stimare la frazione *gap* del fogliame e, tramite una formula di inversione, il LAI (Welles, 1990). In ogni sito di campionamento, le misure di LAI sono state ottenute da una media di 5 letture della radiazione trasmessa dallo strato vegetale e da 1 o 2 della radiazione incidente, in base alla variabilità o meno delle condizioni del cielo. I dati acquisiti sono stati corretti escludendo l'anello più esterno (Cutini et al. 1998) per limitare la sottostima del parametro dovuta alla concentrazione delle foglie negli strati superiori e l'intercettazione della radiazione da parte dei rami. Nella tabella 1 sono riportate le caratteristiche principali del LAI misurato.

Tabella 1 - Riepilogo dei principali parametri statistici delle misure di LAI per tipologia di vegetazione

	N.siti	Media	DevSt	Min	Max
Bosco igrofilo	15	3,96	1,33	1,19	6,20
Lecceta	11	5,98	0,93	4,72	7,71
Macchia	12	4,80	1,34	2,82	7,10
B. caducifoglio	16	3,30	1,56	1,0	5,44
Totale	55	4,36	1,63	0,84	7,71

Per quanto riguarda i dati satellitari, sono state acquisite due immagini multispettrali IKONOS e un'immagine Landsat TM, relative al 2 e al 30 agosto 2004 rispettivamente. Le immagini sono state ortorettificate e corrette atmosfericamente. In particolare, per le IKONOS sono stati utilizzati dei *Ground Control Points* (GCPs) derivanti sia da una campagna GPS, sia da ortofoto a colori in scala 1:10.000 del volo IT2000, sia da un DEM a 20m per quanto riguarda l'elevazione, ottenendo una tipica accuratezza di circa 1 pixel. Le correzioni atmosferiche sono state effettuate mediante l'uso del codice *6S-Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum* (Vermote E. et al., 1997) e di misure di riflettanza eseguite su target opportuni, tramite uno spettrometro ASD Fieldspec Pro, che hanno permesso di ottenere per iterazione la stima dello spessore atmosferico al passaggio del satellite. Infine, le immagini IKONOS corrette sono state utilizzate come riferimento per l'ortorettifica e la correzione atmosferica, quest'ultima sempre tramite *6S*, della immagine Landsat TM.

Metodi

La stima da telerilevamento di parametri biofisici come il LAI tramite modelli semiempirici calibrati su misure a terra puntuali richiederebbe un numero di osservazioni in campo che tenga conto della variabilità del parametro da stimare all'interno di 2-3 pixel. In sistemi altamente eterogenei questo comporta un numero di misure in campo estremamente elevato, gravoso da un punto di vista del tempo e dei costi necessari, talvolta impossibile da soddisfare in termini logistici. Per ottimizzare lo schema di campionamento ed ovviare a questa problematica, si è passati dalle misure in campo di LAI alla risoluzione spaziale dell'immagine Landsat (30m), attraverso una fase intermedia costituita da immagini ad alta risoluzione IKONOS (4m), in modo da poter tenere in considerazione l'alta eterogeneità della vegetazione. Per questo scopo si è adottato un approccio metodologico in due fasi, come descritto nella figura 2(a).

La prima fase ha visto l'implementazione di un modello di regressione multipla tra la variabile dipendente LAI (misurato a terra) e, come variabili indipendenti, le quattro bande IKONOS ed il coseno dell'angolo di illuminazione ($\cos\theta_s$). Poiché non era stata applicata alcuna correzione topografica nel pre-processamento delle immagini, gli effetti dovuti al terreno sono stati inclusi nella regressione multipla introducendo il coseno dell'angolo di illuminazione. Inoltre per tenere in considerazione le dimensioni a terra del sito campionato (12x12m) i valori di riflettanza sono stati estratti e mediati in corrispondenza di finestre di 3x3 pixel IKONOS. Questo modello ha fornito la relazione funzionale per la produzione di una mappa di LAI derivata da IKONOS.

Successivamente, nella seconda fase di *upscaling*, sono stati individuati 129 siti distribuiti in tutta l'area di studio per sviluppare un modello di correlazione tra l'NDVI, estratto da Landsat su di un'area di 90x90m (finestra di 3x3 pixel Landsat), ed il LAI derivato da IKONOS estratto in corrispondenza degli stessi siti su una superficie di analoga dimensione (23x23 pixel IKONOS).

Le relazioni utilizzate in entrambi i casi sono di tipo esponenziale, avendo queste mostrato una capacità predittiva maggiore in accordo con l'effetto di saturazione, ampiamente riportato in letteratura (Broge, 2000, tra gli altri), che si presenta oltre un certo livello di copertura vegetale e che determina una diminuzione nell'incremento della risposta spettrale in corrispondenza di un aumento della quantità di biomassa verde (Anderson et al., 2004)

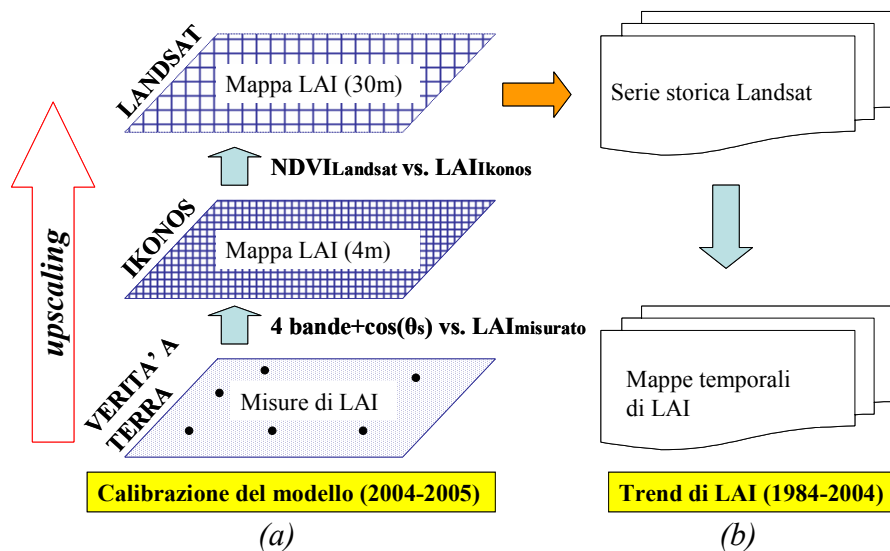


Figura 2 - (a) processo di upscaling dalle misure puntuali a terra alla risoluzione Landsat (30m) mediante IKONOS (4m); (b) analisi retrospettiva della vegetazione attraverso l'applicazione della relazione funzionale implementata in (a) su immagini Landsat

In figura 2(b) sono mostrate le fasi successive di questo studio che riguarderanno l'analisi retrospettiva della vegetazione e del LAI attraverso il modello sviluppato, calibrato su dati a terra attuali (2004-2005) secondo la metodologia già descritta, e la sua applicazione ad una serie temporale (1984-2004) di immagini Landsat disponibili per le aree di studio analizzate.

Risultati

Per la calibrazione delle immagini IKONOS sono stati testati sia modelli regressivi basati sui principali indici spettrali (VI), sia il modello multivariabile già descritto. In tabella 3 sono riportati per un confronto i diversi coefficienti di correlazione.

Il modello di regressione multipla ha mostrato la migliore capacità predittiva del LAI sia sulle singole aree che sull'intero *dataset* ($r^2=0.8$) consentendo di utilizzare un'unica relazione per la produzione di mappe della distribuzione del LAI alla scala IKONOS.

Talella 3- Coefficienti di correlazione (r^2) dei modelli a una (VI) o più variabili (4 bande, $\cos\theta_s$)

Dataset	punti	NDVI	IPVI	RVI	OSAVI	TSAVI	SAVI (L=0.5)	Regressione multipla	p-value
TOT	54	0.6	0.6	0.5	0.4	0.4	0.3	0.8	< .0001
Pantano	15	0.8	0.8	0.7	0.6	0.8	0.5	0.9	< .0001
Rotondella	39	0.6	0.5	0.5	0.3	0.5	0.2	0.8	< .0001

Tra gli indici testati, invece, l'NDVI presenta la correlazione più alta ($r^2=0.6$ sul totale; $r^2=0.8$ per *Pantano* e $r^2=0.6$ per *Rotondella*), comunque inferiore a quella ottenuta usando il modello multiplo. La limitata *performance* degli indici di vegetazione, che si basano fondamentalmente su combinazioni delle bande del rosso e dell'infrarosso, è in parte spiegabile in termini di correlazione con le singole bande. Quest'ultima ha infatti messo in evidenza una scarsa correlazione tra il LAI e la banda dell'infrarosso vicino (nIR) ed una correlazione soddisfacente solo per le bande del rosso e in parte del verde. Inoltre vi sono delle differenze tra le due aree di studio. Infatti in generale le correlazioni relative alla sola area di *Pantano* sono risultate migliori sia rispetto alle correlazioni effettuate sulle misure eseguite a *Rotondella* sia di quelle ottenute considerando il totale dei dati.

In figura 4 sono mostrate le mappe ottenute per i due siti mediante il modello a 5 variabili; i valori di LAI sono stati raggruppati in 4 classi.

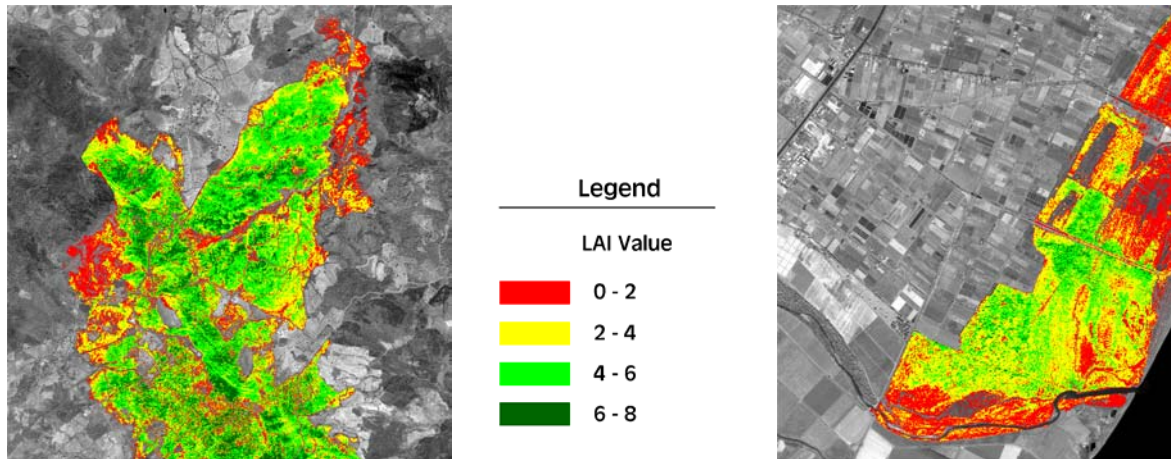


Figura 4-Mappe di LAI derivate da IKONOS per le aree di Rotondella (sinistra) e Pantano (destra)

La seconda fase di *upscaling* è stata implementata attraverso la correlazione delle mappe derivate da IKONOS con degli indici di vegetazione elaborati da Landsat. Tra i vari indici, le correlazioni migliori sono risultate quelle con l'NDVI e l'IPVI ($r^2=0.86$, $RMSE=0.20$, $p<.0001$) seguite da OSAVI ($r^2=0.70$, $RMSE=0.29$, $p<.0001$) e NDWI ($r^2=0.52$, $RMSE=0.37$, $p<.0001$). Pertanto è stato utilizzato l'NDVI per la correlazione con il LAI stimato (Figura 5).

È da notare che le correlazioni effettuate direttamente tra gli indici di vegetazione estratti dall'immagine Landsat e i dati di LAI misurati in campo presentano coefficienti di correlazione piuttosto bassi ($r^2 \leq 0.41$).

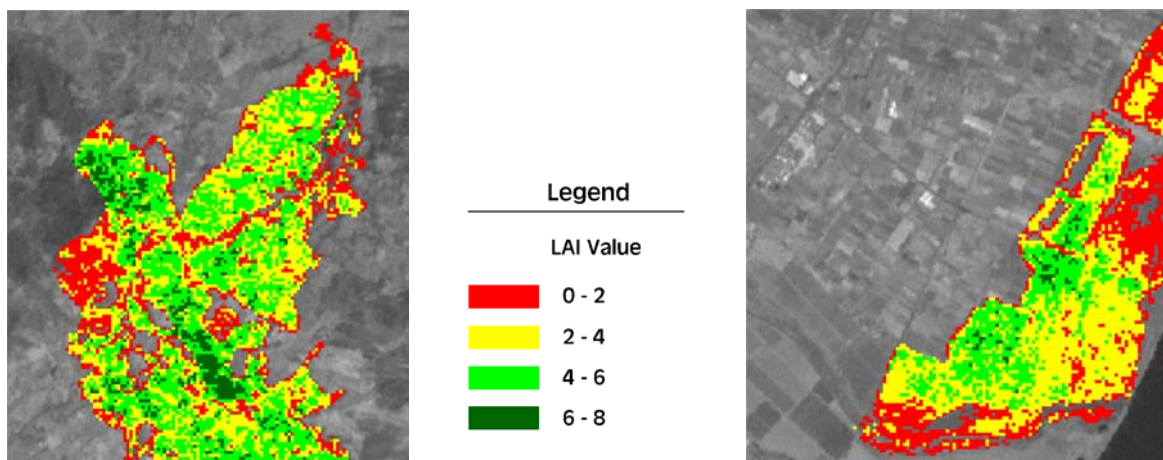


Figura 5 - Mappe di LAI derivate da Landsat per le aree di Rotondella (sinistra) e Pantano (destra)

Conclusioni

La metodologia implementata ha permesso di stimare efficacemente la distribuzione del LAI di differenti tipologie di vegetazione attraverso immagini Landsat TM. L'introduzione di dati satellitari ad alta risoluzione (IKONOS), nel processo di *upscaling* tra i dati a terra e l'immagine Landsat a risoluzione minore, ha permesso di ottimizzare lo schema di campionamento pur tenendo conto della complessità ambientale. Tuttavia, gli indici spettrali derivati da IKONOS non hanno mostrato la capacità predittiva che ci si attendeva data l'elevata risoluzione spaziale e radiometrica di questo sensore. Al contrario un modello a più variabili, che utilizzi tutte le bande disponibili ed il coseno dell'angolo di illuminazione per tener conto degli effetti della topografia, ha permesso di ottenere risultati più soddisfacenti. In particolare, la riflettanza nella banda dell'infrarosso vicino di IKONOS non è in grado di descrivere sufficientemente la variabilità del LAI a terra, mentre gli indici spettrali derivati da Landsat si comportano in maniera soddisfacente in entrambe le aree.

In una fase successiva di questo lavoro il modello sviluppato sarà testato su un *set* indipendente di dati di LAI, acquisiti nel corso di una seconda campagna effettuata nel 2005, e relative sincrone immagini Landsat TM ed IKONOS. In questo modo sarà possibile verificare il livello di invarianza temporale del modello e l'opportunità di usarlo per un'analisi retrospettiva della vegetazione tramite immagini Landsat TM/ETM del passato.

Bibliografia

- Anderson M.C., Neale C.M.U., Li F., Norman J.M., Kustas W.P., Jayanthi H., Chavez J., 2004. "Upscaling ground observations of vegetation water content, canopy height, and leaf area index during SMEX02 using aircraft and Landsat imagery". *Remote Sensing of Environment*, 92, 447-464.
- Asner G.P., Scurlock J.M.O., Hicke J.A., 2003. "Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies". *Global Ecology & Biogeography*, Vol. 12, Issue 3, 191-205.
- Broge N.H., E. Leblanc, 2000. "Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density". *Remote Sensing of Environment*, 76, 156-172.
- Brown L., Chen J. M., Leblanc S. G. e Cihlar J., 2000. "A Shortwave Infrared Modification to the Simple Ratio for LAI Retrieval in Boreal Forests: An Image and Model Analysis". *Remote Sens. of Environ.* 71:16–25.
- Chen X., Vierlinga L., Rowella E., De Felice T., 2004. "Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest". *Remote Sens. of Environ.*, 91, 14–26.
- Cutini A., Matteucci G., Scarascia Mugnozza G., 1998 – "Estimation of leaf area index with the Li-Cor LAI 2000 in deciduous forests". *Forest Ecology Management*, 105, 55-65.
- D'Urso, Menenti M., Santini A., 1999. "Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management". *Agricultural Water Management*, 40, 291-302.
- Eklundh L., Harrieb L., Kuusk A., 2001. "Investigating relationships between Landsat ETM+ sensor data and leaf area index in a boreal conifer forest". *Remote Sens. of Environ.*, 78, 239-251.
- Fassnacht K.S., Gower S.T., Mackenzie M.D., Nordheim E.V., Lillesand T.M., 1997. "Estimating the Leaf area Index of North Central Wisconsin Forests using the Landsat Thematic Mapper". *Remote Sens. of Environ.*, 61, 229-245.
- Gong P., Pu R., Biging G.S., Larrieu M.R., 2003. "Estimation of forest leaf area index using vegetation indices derived from Hyperion Hyperspectral data". *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol.41, no.6, 1355-1362.
- Gower Stith T., Kucharik C.J., Norman John M., 1999. "Direct and indirect Estimation of Leaf Area Index, fAPAR, and Net Primary Production of Terrestrial Ecosystems". *Remote Sens. of Environ.* 70: 29–51.
- Tian Y., Wanga Y., Zhanga Y., Knyazikhina Y., Bogaerta J., Myneni R. B., 2002. "Radiative transfer based scaling of LAI retrievals from reflectance data of different resolutions". *Remote Sens. of Environ.* , 84, 143–159.
- Vermote Eric F., Tan Didier, Deuz Jean Luc, Herman Maurice, and Morcrette Jean-Jacques, 1997. "Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview". *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. VOL. 35. NO. 3, May, 675-686.
- Welles J.M., 1990. "Some indirect methods of estimating canopy structure". *Remote Sensing Reviews*, vol. 5(1), pp.31-43.
- Welles Jon M., Norman J.M., 1991. "Instrument for indirect measurement of canopy architecture". *Agronomy Journal*, vol. 83, 818-825.