

8 La luce nei manti vegetali

Per modellare correttamente la traspirazione da manti vegetali vegetali e l'evaporazione da superfici di suolo o foglie è necessario stimare la frazione di radiazione intercettata dal manto vegetale. Queste stime sono inoltre importanti per predire i tassi di fotosintesi e le risposte di organismi che sono sensibili a specifici rapporti tra NIR e FR.

Il dettaglio richiesto dal modello del manto vegetale dipende dalla risoluzione spaziale e temporale del modello che si sta sviluppando. Modelli che hanno un passo d'integrazione giornaliero e che calcolano la fotosintesi dalla traspirazione abbisognano di modelli semplici per l'intercettazione della radiazione. I modelli invece che calcolano la fotosintesi dalla densità di flusso del PAR e da altri parametri ambientali richiedono passi d'integrazione più brevi e metodi più dettagliati per calcolare l'assorbimento del PAR da parte del manto vegetale. Nei modelli con passo giornaliero non c'è bisogno di separare la radiazione nelle sue componenti, in quanto è necessario un valore giornaliero per S_t . Nei modelli a maggior risoluzione dobbiamo invece considerare le componenti della radiazione diretta e diffusa, in quanto esse interagiscono in modo differente con il manto vegetale. Appare inoltre opportuno prevedere calcoli separati per PAR e NIR, in quanto il manto vegetale assorbe molto di più il PAR di quanto non faccia con il NIR. Dovremo inoltre tener conto della variabilità spaziale del manto vegetale in quanto la risposta della fotosintesi alla luce non è lineare; la fotosintesi media non è quindi la fotosintesi al PAR medio.

In questo capitolo deriveremo equazioni che possono essere utilizzate per predire l'intercettazione e la trasmissione di radiazione da parte del manto vegetale, ad ogni ora del giorno e per le lunghezze d'onda d'interesse. Questi modelli saranno utilizzati per determinare la densità di flusso della radiazione su foglie direttamente esposte al sole od ombreggiate. Questi modelli dettagliati saranno quindi utilizzati per definire un semplice modello per l'intercettazione della radiazione che potrà essere utilizzato in un modello a passo giornaliero.

L'indice di superficie fogliare e la trasmissione della luce nel manto vegetale

Piuttosto che misurare la quota dalla sommità del manto vegetale nei termini di una distanza, consideriamo il valore dell'indice di superficie fogliare, L . Al di sopra del manto vegetale $L = 0$; scendendo all'interno del manto vegetale L aumenta sino a raggiungere il suo valore massimo, L_t , al limite inferiore del manto vegetale.

Se le foglie di un manto vegetale con $LAI = L_t$ sono distribuite a caso nello spazio, la frazione di radiazione, τ , che riesce ad attraversare il manto vegetale è:

$$\tau = e^{-KL_t} \quad [8.1]$$

dove K è il coefficiente di estinzione del manto vegetale. Quando le foglie non sono distribuite a caso nello spazio ma sono raggruppate, la trasmissione del manto vegetale è ancora una funzione esponenziale di L , ma L è moltiplicato per un fattore che stima la minor efficienza nel coprire la superficie del suolo da parte della coltura. Per colture seminate a file con spazi tra le file, il LAI effettivo può essere anche il 20% meno del LAI totale; la differenza tra LAI effettivo e totale può comunque ridursi durante la crescita della coltura, in tempi e modi diversi a seconda delle specie o dei fattori che incidono sullo sviluppo del manto vegetale.

La frazione di radiazione incidente intercettata dalla coltura è $1 - \tau$. Questa frazione è disponibile per far evaporare acqua dalla superficie delle foglie, se è umida, per far evaporare acqua nelle

cavità substomatiche (traspirazione), oppure per la fotosintesi. La frazione che non è intercettata dal manto vegetale (τ) raggiunge la superficie del suolo e provoca evaporazione di acqua. Una via per suddividere l'evapotraspirazione potenziale tra evaporazione e traspirazione potenziali tiene appunto conto di τ , come abbiamo visto nelle eq.ni 5.14 e 5.15; infatti $\phi = 1 - \tau$. In genere, un manto vegetale arriva a coprire ragionevolmente bene la superficie quando il suo LAI raggiunge il valore di 3. Quindi, se $K = 0.4$, dall'eq. 8.1 otteniamo che $\tau = \exp(-0.4 \times 3) = 0.3$; ne consegue che il 30% della radiazione è intercettato dalla superficie del suolo, mentre il 70% lo è dal manto vegetale. Nel caso di superfici fogliari bagnate e di superficie del suolo vicina alla saturazione, il che rende il valore di evapotraspirazione effettiva pari a quello di evapotraspirazione potenziale, il 70% dell'evaporazione provverebbe dal manto vegetale, mentre il restante 30% dal suolo.

Modelli dettagliati di intercettazione della luce da parte dei manti vegetali

I modelli dettagliati sulla radiazione nei manti vegetali possono essere molto complicati è per descriverli adeguatamente sarebbe necessario uno spazio maggiore di quello disponibile in questo esame dell'intero sistema clima-suolo-pianta. Ross (1981) riporta una delle descrizioni più dettagliate, fra quelle disponibili, di questi modelli. Un'introduzione utile, comprendente la derivazione di equazioni, può essere trovata in Campbell (1977). Il nostro scopo in questa sede è quello di individuare equazioni che ci permettano di tener conto delle cause che producono le variazioni più marcate nel flusso del PAR su foglie in un manto vegetale. La causa più ovvia di variazione è data dall'ombreggiamento provocato da alcune foglie su altre; considereremo quindi due classi di foglie corrispondenti a quelle in pieno sole e quelle ombreggiate. Saranno quindi ricavate densità di flusso di PAR medie per queste due classi di foglie. Modelli ancora più dettagliati suddividono ulteriormente queste classi, distinguendo sulla base della posizione delle foglie e della distribuzione degli angoli che le foglie hanno rispetto all'orizzontale. Per questo tipo di modelli si può far riferimento a Goudriaan (1988), il quale mostra come si possa costruire un modello con più classi di foglie.

Il coefficiente d'estinzione dell'eq. 8.1, K , dipende dalla struttura del manto vegetale e dall'angolo allo zenith della radiazione incidente. Nell'esaminare il valore di τ , ossia la trasmissione della luce attraverso il manto vegetale, faremo approssimazioni successive partendo dal caso più semplice, rappresentato da un manto vegetale composta da foglie "nere", vale a dire foglie che assorbono completamente la radiazione incidente. Se queste foglie sono distribuite casualmente nello spazio e se sono orizzontali, avremo $K_{bh} = 1$. L'indice b ci indica che si tratta di foglie nere (black) e quello h ci indica che la disposizione delle foglie è orizzontale (horizontal). Possono essere calcolati altri angoli d'inclinazione delle foglie calcolando la loro proiezione sul piano orizzontale; il K per manti vegetali che non hanno le foglie orizzontali diventa pertanto il rapporto tra l'area di una proiezione media delle foglie e la sua area effettiva.

Il calcolo dell'area media di una proiezione non è semplice, ma alcune considerazioni di natura geometrica possono essere d'aiuto. Per esempio, se tutte le foglie di un manto vegetale sono verticali, ma con un azimut casuale, la funzione di distribuzione per la superficie fogliare può essere considerata uguale alla distribuzione delle superfici verticali di un cilindro verticale. In questo caso è semplice calcolare la proiezione e l'area di un cilindro, per cui otteniamo:

$$K_{bc} = \frac{2 \tan \theta}{\pi} \quad [8.2]$$

dove θ è l'angolo allo zenith del sole. Similarmente, una coltura potrebbe avere le foglie con una distribuzione degli angoli simile alla distribuzione degli angoli in una sfera. Se calcoliamo il rapporto tra la proiezione di una sfera e la sua superficie otteniamo:

$$K_{bs} = \frac{1}{2\cos\theta} \quad [8.3]$$

Con lo stessa procedura è possibile calcolare un coefficiente d'estinzione per una distribuzione delle foglie conica, ma la distribuzione più utile è quella ellipsoidale. La distribuzione ellipsoidale include, come caso particolare, la distribuzione sferica, ma permette di ottenere forme più piatte o allungate. Il rapporto tra la proiezione dell'area e l'area di una ellissi è (Campbell, 1986):

$$K_{be} = \frac{\sqrt{x^2 + (\tan\theta)^2}}{x + 1.774(x + 1.182)^{-0.733}} \quad [8.4]$$

In questa equazione il parametro x è il rapporto tra la media della proiezione dell'area su superfici orizzontali e verticali. Per una distribuzione sferica degli angoli, $x = 1$; per una distribuzione verticale, $x = 0$; per una distribuzione orizzontale il valore di x corrisponde a ∞ . L'equazione 8.4 permette di calcolare tutti i valori di K_b d'interesse variando il valore di x . La figura mostra la variazione di K_{be} al variare dell'angolo allo zenith, θ , e al variare di x .

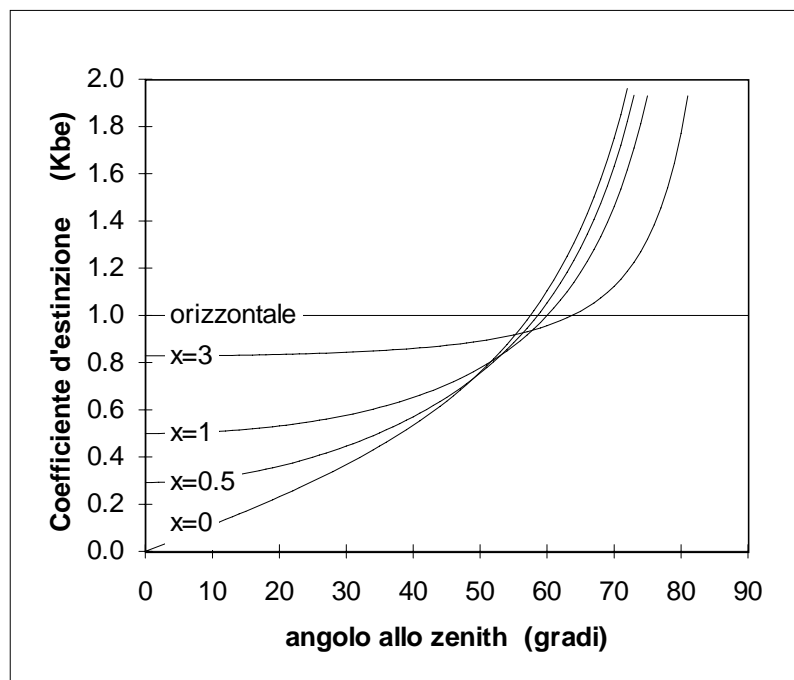


Figura 8.1 Variazione del coefficiente d'estinzione in funzione dell'angolo rispetto allo zenith della radiazione incidente, per diversi valori di x rappresentanti diverse distribuzioni degli angoli di inclinazione delle foglie nel manto vegetale.

Si noti come l'angolo allo zenith non produce alcun effetto sul K_{be} nel caso di manti vegetali orizzontali; tutte le altre manti vegetali presentano un valore più alto per la trasmissione della radiazione fino a 60° , mentre per angoli allo zenith superiori la trasmissione è minore di quella del manto vegetale a foglie orizzontali. La distribuzione sferica ($x = 1$) approssima quella di molte colture, ed è quindi usata nei modelli quando il valore di x non è conosciuto.

La frazione di radiazione diretta che attraversa il manto vegetale senza essere intercettata, τ_b , può quindi essere calcolato dall'eq. 8.1 con il valore di K_{be} ricavato dall'eq. 8.4, utilizzando l'angolo del sole allo zenith appropriato (eq. 3.1).

Trasmissione della radiazione diffusa

La radiazione diffusa proviene da molte direzioni ed è quindi attenuata in modo diverso da quello relativo alla radiazione diretta, che proviene da una sola direzione. La radiazione diffusa può essere considerata come l'insieme di molte radiazioni dirette; un coefficiente per la trasmissione di radiazione diffusa può essere calcolato come:

$$\tau_d = 2 \int_0^{\pi/2} \tau_b(\theta) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad [8.5]$$

Nel caso di foglie orizzontali τ_b non dipende da θ , quindi $\tau_b = \tau_d$; per altre distribuzioni degli angoli l'integrazione della 8.5 deve essere fatta con metodi numerici. Facendo appunto l'integrazione numerica, si nota come τ_d non decresce esponenzialmente in funzione di L , cosa che accade invece per τ_b (con l'eccezione di foglie orizzontali). Con lo scopo di ottenere un'approssimazione utile in rapporto al suo uso in modelli, dobbiamo interpolare un'equazione esponenziale ai valori ottenuti dall'integrazione, facendo così variare K_{bd} in funzione del LAI. La figura 8.2 mostra i risultati di questo lavoro. Per foglie orizzontali, $K_{bd} = 1$, ma per un manto vegetale sferica che ha $L_t = 3$, K_{bd} è intorno 0.7. Questo è un risultato importante sul quale torneremo più avanti.

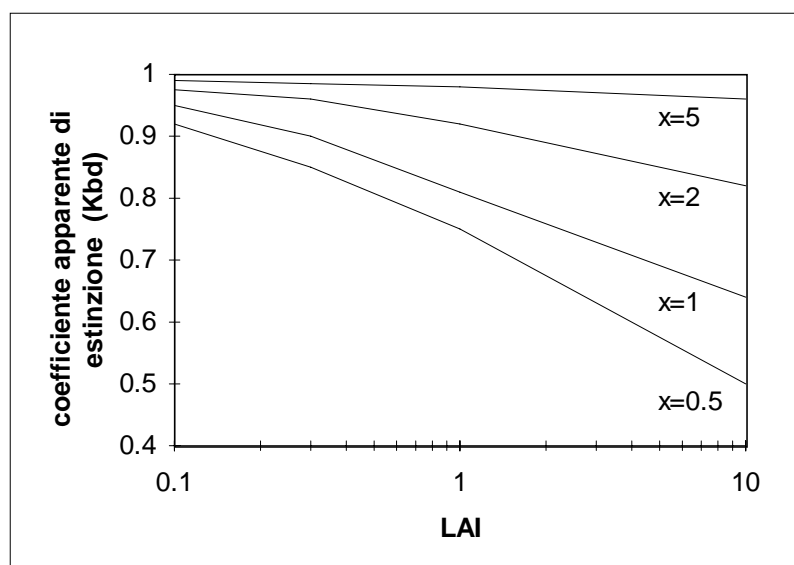


Figura 8.2 Coefficiente apparente di estinzione per la radiazione diffusa e per manti vegetali diverse per la distribuzione degli angoli delle foglie.

La diffusione della luce nei manti vegetali

Ovviamente, le foglie di un manto vegetale non sono nere e quindi trasmettono e riflettono la radiazione. Goudriaan (1977) ha dimostrato che la riflessione e la trasmissione della radiazione in un manto vegetale può essere ancora approssimata utilizzando un modello esponenziale, ma in questo caso K deve essere modificato. Se l'assorbanza delle foglie rispetto alla radiazione è a_L , allora la radiazione diretta totale (diretta e diffusa verso il suolo) trasmessa attraverso il manto vegetale alla quota indicata con L , è:

$$\tau_{bt} = e^{\sqrt{-a_L} K_{be} L} \quad [8.6]$$

Quando $a_L = 1$ (foglie nere) $\tau_{bt} = \tau_b$. La trasmissione di luce attraverso le foglie provoca quindi un aumento della radiazione sotto il manto vegetale. La trasmissione di radiazione diffusa dal manto vegetale è stimabile con un'equazione simile, dove il coefficiente d'estinzione è K_d . Valori tipici di per a_L sono 0.8 per il PAR e 0.2 per il NIR. L'assorbanza della radiazione totale è la media geometrica dei valori di PAR e NIR, quindi $a_{Ls} = (0.8 \times 0.2)^{1/2} = 0.4$.

Calcolo della densità di flusso di PAR sulle foglie di un manto vegetale

Possiamo utilizzare le equazioni ricavate per calcolare la densità di flusso di radiazione sulle foglie di un manto vegetale. Dal momento che i nostri calcoli hanno come scopo quello di stimare la fotosintesi, il resto della discussione riguarderà la determinazione del PAR incidente su foglie del manto vegetale a quota L . Assegnamo quindi il valore di 0.8 per a_L ; le equazioni rimarrebbero comunque sostanzialmente uguali per altre lunghezze d'onda.

Definiamo I_{ob} la densità di flusso di PAR diretto alla sommità del manto vegetale e I_{od} la densità di flusso di PAR diffuso. A quota L nel manto vegetale possiamo calcolare tre differenti densità di flusso di PAR: la totale (diretto + diffuso verso il basso), la diretta e la diffusa. Queste sono calcolate con:

$$I_{bt} = \tau_{bt} I_{ob} \quad [8.7]$$

$$I_b = \tau_b I_{ob} \quad [8.8]$$

$$I_d = \tau_{dt} I_{od} \quad [8.9]$$

In queste equazioni τ_{bt} e τ_{dt} sono calcolati con l'eq. 8.6 utilizzando il K appropriato per radiazione diretta o diffusa. $\tau_b = e^{-K_{be}L}$.

Alla quota L nel manto vegetale ci sono foglie che sono esposte ai raggi del sole e altre che sono ombreggiate. La densità di flusso di PAR su una superficie orizzontale esposta ai raggi del sole sarà $I_{bt} + I_d$. La densità di flusso sulle stesse foglie varierà in rapporto al loro orientamento, ma si può dimostrare che la densità di flusso media su foglie esposte ai raggi diretti del sole è:

$$I_{sl} = K_{be} I_b + I_d + I_{sc} \quad [8.10]$$

dove I_{sc} è la densità di flusso del flusso diffuso verso il basso della radiazione diretta. La densità di flusso su foglie ombreggiate è il flusso diffuso più il flusso diffuso verso il basso della radiazione diretta:

$$I_{sh} = I_d + I_{sc} \quad [8.11]$$

La radiazione diffusa verso il basso è la differenza tra I_{bt} e I_b :

$$I_{sc} = I_{bt} - I_b \quad [8.12]$$

Il problema che si pone a questo punto è sapere quale è la frazione di area fogliare a quota L che è esposta direttamente ai raggi del sole. La probabilità di trovare una foglia esposta nello strato δL a quota L nel manto vegetale è data dal prodotto della probabilità che un raggio penetri fino alla quota L e la probabilità che lo stesso sia intercettato nello strato δL , diviso K_{be} . Se definiamo L^* l'indice di superficie fogliare esposto ai raggi diretti del sole, otteniamo:

$$\delta L^* = \frac{e^{-K_{be}L} (1 - e^{-K_{be}\delta L})}{K_{be}} \quad [8.13]$$

Al limite, per valori molto piccoli di δL , $\delta L^* = \delta L e^{-K_{be}L}$. La frazione di foglie soleggiate alla quota L , f_{sl} , è $\delta L^*/\delta L$, quindi:

$$f_{sl} = e^{-K_{be}L} = \tau_b \quad [8.14]$$

La frazione di foglie ombreggiate è quindi $f_{sh} = 1 - f_{sl}$. Se conosciamo la densità di flusso su foglie soleggiate e ombreggiate, la risposta della fotosintesi al PAR e la frazione di foglie in ogni classe, possiamo calcolare la fotosintesi alla quota data nel manto vegetale. Sommando i contributi di tutti gli strati del manto vegetale otteniamo la fotosintesi del manto vegetale.

Integrazione giornaliera

Le eq.ni 5.14, 5.15 e 7.6 richiedono stime della frazione di radiazione intercettata dal manto vegetale mediate per l'intera giornata. Fuchs *et al.* (1976) hanno suggerito che l'intercettazione della radiazione diretta e diffusa, mediata per l'intera giornata, può essere approssimata con la funzione d'intercettazione della radiazione diffusa, in quanto il sole "attraversa" il cielo durante l'intera giornata. Verifiche fatte con modelli dettagliati hanno provato che questa assunzione è corretta. Possiamo quindi modellare la trasmissione media giornaliera dei manti vegetali utilizzando l'eq. 8.6, nella quale K_{be} è sostituito da K_{bd} (cfr. fig. 8.2).

Per un manto vegetale sferico con $L_t = 3$, $K_{bd} = 0.7$ (fig. 8.2). Se l'assorbanza per la radiazione solare è 0.4, ne consegue che il coefficiente effettivo d'estinzione, $a_L^{1/2}K_{bd}$, è 0.44. Ai valori di K_{bd} riportati in fig. 8.2 corrisponde un intervallo di variazione del coefficiente effettivo d'estinzione tra 0.35 (manti vegetali tendenzialmente verticali) e 0.65 (manti vegetali tendenzialmente orizzontali). Per il PAR, l'intervallo diventa 0.45 - 0.9. Questi valori possono essere comparati ai valori misurati sperimentalmente e disponibili in letteratura. Ritchie (1972) riporta un valore di 0.4 per la radiazione netta misurata per diverse colture seminate a file. Gallagher e Biscoe (1978) riportano un valore di $K = 0.33$ per le manti vegetali di orzo e frumento (0.44 per il PAR). Questi valori appaiono leggermente inferiori, ma in ragionevole

concordanza con le nostre stime. Peraltro, dati da altre fonti forniscono valori leggermente più alti.

Basandoci su queste osservazioni, calcoliamo l'intercettazione giornaliera come:

$$\phi = 1 - e^{\sqrt{-a_L} K_{bd} L} \quad [8.15]$$

L'assorbimento del PAR è pressoché uguale all'intercettazione, mentre l'assorbimento della radiazione totale è circa l'80% dell'intercettazione.