

**Relazione scientifica sull'attività di ricerca svolta
durante il soggiorno del Dr. Pierpaolo Duce
presso il Department of Land, Air and Water Resources
della University of California, Davis, California, USA**

**STIMA DELLE CONDIZIONI DI UMIDITÀ DEL COMBUSTIBILE ATTRAVERSO
TECNICHE MICROMETEOROLOGICHE PER LA DETERMINAZIONE DEL RISCHIO DI
INCENDI BOSCHIVI IN AMBIENTE MEDITERRANEO**

1. Introduzione

La valutazione del rischio di incendio è comunemente basata su indice di lungo termine (statici) e di breve termine (dinamici), o su sistemi integrati che considerano tutte le variabili, a variazione più o meno lenta o veloce, che determinano condizioni potenziali di rischio. Gli indici di rischio statici sono quelli basati su variabili che non variano nel breve periodo (ad es., la disponibilità di combustibile e le condizioni socio-economiche). Gli indici dinamici, basati principalmente sulle variabili meteorologiche e sulle condizioni della vegetazione, danno informazioni sulla probabilità del verificarsi di un incendio e sul rischio potenziale di propagazione. Poiché la struttura della vegetazione e le condizioni di umidità influenzano fortemente il verificarsi di un incendio e la sua propagazione, negli ultimi decenni sono stati sviluppati numerosi indici di breve termine basati sulla misura o sulla stima delle condizioni del combustibile.

Sebbene i sistemi integrati siano stati sviluppati per specifiche aree geografiche, sono spesso utilizzati al di fuori delle condizioni bio-geografiche per le quali sono stati calibrati. I più diffusi indici integrati sono il *Canadian Forest Fire Weather Index* (FWI) (Van Wagner, 1987), utilizzato in Canada, Italia e Nuova Zelanda, il *McArthur Fire Danger (Meter) Index* (FDI), quantificato da Noble et al. (1980), il *Fire Potential Index* (FPI) basato su dati telerilevati e proposto da Burgan et al. (1998), e il *U.S. National Fire Danger Rating System* (NFDRS) (Deeming et al., 1977; Bradshaw et al., 1984; Burgan, 1988).

Tutti i sistemi integrati contengono dei sotto-modelli per la stima della disponibilità e dell'umidità del combustibile di minori dimensioni, come ad esempio il *Keetch-Byram Drought Index*, KBDI, (Keetch e Byram, 1968) le cosiddette classi di *time-lag* del NFDRS, i codici del FWI canadese (*fine fuel moisture, duff and drought codes*) e i sotto-modelli (*drought factor* e *fuel moisture*) del FDI.

Le condizioni di umidità del combustibile sono un fattore fondamentale nel determinare quanto del combustibile brucerà. Di conseguenza la stima dell'umidità del combustibile è una componente chiave dei programmi di ricerca sul rischio di incendio e vari approcci e modelli sono stati sviluppati e applicati per determinare il contenuto di umidità dei diversi livelli di combustibile (aereo, superficiale, del suolo).

Il combustibile aereo è comunemente determinato utilizzando numerosi parametri che definiscono il carico di combustibile vivo per classi di dimensione, il rapporto superficie/volume delle diverse classi, il contenuto di calore, ecc. (Rothermel, 1972). I sistemi

informativi geografici e le osservazioni da telerilevamento forniscono dati utili per parametrizzare il contenuto di umidità della vegetazione verde e produrre le cosiddette mappe di *greenness* (Burgan, 1988; Burgan et al., 1998).

I modelli di rischio di incendio utilizzano diversi metodi per la stima del contenuto di umidità del combustibile morto (combustibile di superficie). Nel sistema NFDRS, la velocità di variazione dell'umidità del combustibile morto è modellizzata considerando quattro classi di *time-lag*: 1, 10, 100 e 1000 ore (Deeming et al., 1977). Il *time-lag* è sostanzialmente proporzionale al diametro del combustibile ed è definito come il tempo necessario al combustibile perché il proprio contenuto idrico subisca una variazione pari a 2/3 della differenza tra le condizioni iniziali e quelle finali. È stato dimostrato che le classi di *time-lag* 1 e 10 sono le più importanti nel determinare la velocità di propagazione del fuoco e sono perciò comunemente utilizzate per parametrizzare il contenuto di umidità di tutto il combustibile morto (Deeming et al., 1977). La classe di *time-lag* 10-h può essere calcolata da misure di temperatura, umidità e nuvolosità oppure misurata tramite appositi sensori (*10-h fuel sticks*). Il sistema FWI (Van Wagner, 1987) considera tre diversi indici per ciascuna classe di combustibile morto. Il contenuto di umidità della lettiera e del combustibile di piccole dimensioni, con un *time-lag* inferiore a un giorno, è stimato attraverso il *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC), il cui valore dipende dalla temperatura dell'aria, dall'umidità relativa e dalle precipitazioni piovose.

La disponibilità e le condizioni del combustibile presente nel suolo viene infine valutata attraverso apposite scale numeriche come, ad esempio, il *Duff Moisture Code* e il *Drought Code* utilizzati nel sistema FWI (Van Wagner, 1987).

La valutazione del contenuto di umidità di ciascun livello di combustibile su un'ampia scala spaziale richiede numerose osservazioni e stime con conseguenti costi elevati in termini sia di lavoro sia di trasporto. Una metodologia di basso costo per la stima del contenuto di umidità del combustibile vivo e morto, basata su principi biofisici piuttosto che su funzioni empiriche, può quindi contribuire a migliorare l'attendibilità e l'accuratezza degli indici di rischio di incendio.

Nel corso del soggiorno presso il Department of Land, Air and Water Resources (DLAWR) della University of California, Davis, è stata perfezionato un semplice indice di valutazione del contenuto di umidità del combustibile vivo e morto (denominato *Fuel Dryness Index*, F_d) basato sull'analisi degli scambi energetici. Le attività svolte hanno riguardato la valutazione di F_d in ambiente Mediterraneo attraverso la misura e/o la stima dei diversi termini del bilancio energetico tramite il metodo micrometeorologico *Surface Renewal* (SR), basato sull'analisi strutturale dei tracciati di temperatura rilevati a elevata frequenza. In particolare, è stato sviluppato il software necessario per il trattamento dei dati e sono stati analizzati i risultati preliminari di alcune campagne sperimentali confrontando la *performance* dell'indice proposto con alcuni indici ampiamente utilizzati, nella pratica operativa, per la valutazione del rischio di incendio boschivo.

La teoria del Fuel Dryness Index

L'indice F_d è basato sul bilancio energetico superficiale, dove l'energia disponibile (A – la differenza tra la radiazione netta, R_n , e la densità di flusso di calore nel suolo, G) è ripartita tra gli scambi di calore sensibile e latente ($H + \lambda E$). Per convenzione, R_n è considerata positiva quando rivolta verso la superficie, le densità di flusso di calore sensibile (H) e latente (λE) sono positive quando rivolte verso l'atmosfera e G è positivo quando il flusso è verso il suolo. Quando le condizioni idriche non sono limitanti, allora il valore di H è piccolo rispetto a λE e A è una misura del massimo valore possibile di λE quando non vi è avvezione orizzontale. In condizioni di avvezione, λE può essere anche maggiore di A , ma solo se la superficie è umida. Quando la superficie è secca e la disponibilità di acqua nel suolo è limitata, l'evaporazione dalla superficie è ridotta e λE decresce rispetto ad A . L'equazione

$$E_F = \frac{\lambda E}{A} \quad (1)$$

rappresenta una misura ponderata delle condizioni di “secchezza” (*dryness*) del combustibile disponibile alla superficie. Quando $E_F > 1.0$, il combustibile è chiaramente umido, per cui nella pratica può essere utilizzato un valore limite superiore di $E_F = 1.0$. Quando la superficie varia le proprie condizioni da umide a secche, E_F varia da $E_F \approx 1.0$ a $E_F \approx 0.0$. Per cui l'indice F_d può essere calcolato come:

$$F_d = 1 - \frac{\lambda E}{A} \quad (2)$$

Il valore di F_d sarà prossimo a 0 quando il rischio di incendi è basso, a causa dell'elevato contenuto di umidità dell'ecosistema, e si avvicinerà a 1 con il procedere del disseccamento e il conseguente aumento del rischio di incendio. Uno dei vantaggi dell'indice F_d è quello di fornire una misura ponderata della “secchezza” di tutto il combustibile superficiale. Quando sia la lettiera superficiale sia la vegetazione viva mostrano bassi livelli di evaporazione e traspirazione, questo implica che le condizioni di aridità a livello locale sono elevate e che il rischio di incendi è alto. F_d rappresenta quindi una media pesata dei *time-lags* 1-h, 10-h, 100-h e 1000-h, con un peso decrescente per i *time-lags* più lunghi. L'integrazione di F_d nel tempo può fornire un indice approssimativamente equivalente ai *time-lags* più lunghi e all'indice KBDI. Equivalenze simili possono esser fatte per gli indici FFMCI, DMC e DC del FWI canadese.

Chiaramente, il calcolo di F_d può essere effettuato con qualsiasi metodo che consenta la misura o la stima accurata di R_n , G e λE . Il problema è di trovare un metodo di basso costo, robusto, che tenga conto delle condizioni microclimatiche e che sia adatto per sistemi di monitoraggio a distanza e sia implementabile nelle reti di monitoraggio esistenti.

La teoria Surface Renewal

Il metodo *Surface Renewal* (SR) consente di stimare con buona accuratezza il valore di H e, associato alla stima di R_n e G , costituisce un metodo semplice, affidabile e di basso costo per la stima di λE . Le caratteristiche di questo metodo lo rendono particolarmente adatto a essere implementato nelle tradizionali reti di monitoraggio ambientale e può, quindi, fornire i dati necessari per la spazializzazione di F_d .

Il metodo SR è basato sul concetto di strutture coerenti (Paw U e Brunet, 1991) vale a dire sulla coerenza spaziale e temporale delle strutture che si creano nella bassa atmosfera e che determinano il continuo rimescolamento del volume d'aria prossimo alla superficie (Gao et al., 1989). Quando le parcelle di aria si avvicinano alla vegetazione e penetrano al suo interno, si determina un riscaldamento o un raffreddamento dell'aria a seguito degli scambi di calore che si instaurano con la vegetazione. Il tasso di variazione della temperatura nel tempo è proporzionale alla densità di flusso di calore latente (Paw U et al., 1995). In condizioni di atmosfera instabile, l'aria più fredda che giunge dall'alto entra in contatto con la vegetazione riscaldandosi gradualmente. Questo fenomeno può essere osservato misurando la temperatura a elevata frequenza (4-10 Hz): l'andamento della temperatura nel tempo mostra in questo caso una improvvisa diminuzione della temperatura seguita da un lento aumento determinato dal riscaldamento dell'aria. La parcella d'aria riscaldata dalla vegetazione viene quindi spazzata via da un'altra parcella di aria più fredda che giunge dall'alto. In condizioni di atmosfera stabile, l'andamento della temperatura è opposto mostrando un improvviso aumento della temperatura seguito da un lento raffreddamento. In questo caso, la lenta diminuzione della temperatura è determinata dal trasferimento di calore dalla parcella d'aria verso la vegetazione. Osservando l'andamento della temperatura per un opportuno periodo di tempo (15-30 minuti) è possibile individuare questo caratteristico andamento a rampe. Le caratteristiche strutturali delle rampe, ampiezza media (a) e inverso della frequenza ($d+s$)

possono quindi essere determinate tramite le funzioni struttura (Van Atta, 1977).

Utilizzando le leggi di conservazione dell'energia, Paw U et al., (1995) hanno mostrato che H può essere espressa tramite la seguente relazione:

$$H = \alpha H_s = \alpha \left(\rho C_p \frac{a}{d+s} z \right) \quad (3)$$

dove z è l'altezza di misura (m), ρ la densità dell'aria (kg m^{-3}) e C_p il calore specifico dell'aria ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$). H_s rappresenta la densità di flusso di calore sensibile determinata tramite il metodo SR mentre α è un fattore che tiene conto dell'ineguale riscaldamento o raffreddamento del volume d'aria che sta al di sotto del sensore di temperatura (Paw U et al., 1995). Il fattore α viene determinato calcolando i parametri della retta di regressione lineare passante per l'origine tra H (ottenuta con il metodo della correlazione turbolenta) e H_s , e ponendo α uguale alla pendenza della retta.

In precedenti sperimentazioni è stato sviluppato un software per l'acquisizione di dati di temperatura dell'aria a elevata frequenza (4 Hz) e il calcolo ogni trenta minuti dei valori medi dei momenti del secondo, terzo e quinto ordine relativi alle variazioni della temperatura nel tempo (intervalli di 0.25 e 0.50 s). L'utilizzo di questo software consente quindi di ottenere i dati di base necessari per il calcolo di H_s .

Dopo aver calcolato H_s , la densità di flusso di calore sensibile αH_s è calcolata tramite l'eq. (3) e il fattore α è calibrato per il tipo di vegetazione in analisi. Per scopi pratici, il valore di α non varia con le condizioni di stabilità, di vento o di altri fattori meteorologici. Il valore di λE è quindi determinato utilizzando la misura o stima di R_n , G e αH_s , attraverso l'equazione del bilancio energetico

$$\lambda E = R_n - G - \alpha H_s \quad (4)$$

Il calcolo di λE è effettuato per periodi di 30 minuti, e viene quindi calcolato il flusso energetico giornaliero. Il valore giornaliero di F_d è infine calcolato combinando le equazioni (2) e (4)

$$F_d = 1 - \frac{\lambda E}{A} = \frac{\alpha H_s}{A} \quad (5)$$

2. Materiali e Metodi

I dati analizzati nel corso del soggiorno presso il DLAWR si riferiscono a una sperimentazione effettuata su macchia mediterranea durante il periodo 2001-2003, a Ione, in California, USA (latitudine: 38° N; longitudine 120° W; quota: 129 m).

I flussi superficiali sono stati determinati tramite un anemometro sonico tridimensionale (modello 1352, Gill Instruments Ltd, Lymington, UK) installato al di sopra della vegetazione. La temperatura dell'aria e le tre componenti del vento sono state acquisite con una frequenza di 10 Hz. Un analizzatore di gas a infrarossi (Li-7500, Licor Inc, Lincoln, Nebraska, USA) è stato utilizzato per acquisire dati di umidità a elevata frequenza. I dati acquisiti sono stati elaborati tramite il metodo dell'*eddy covariance* tenendo conto della rotazione degli assi e della correzione WPL (Webb et al., 1980). I dati *eddy covariance* riguardavano il periodo gennaio 2001 – 9 settembre 2003. Inoltre, sono state misurate la radiazione netta, R_n , e la densità di flusso nel suolo, G , attraverso un radiometro netto (modello NR Lite, Kipp and Zonen, Delft, NL) e delle piastre di flusso (modello HFP-01, Hukseflux Thermal Sensors, Delft, NL). È stata anche misurata la temperatura del suolo con termocoppie posizionate al di sopra delle piastre di flusso per tener conto dell'accumulo di calore al di sopra delle piastre e correggere di conseguenza i valori di G . Infine, il data-set comprendeva anche dati di temperatura e umidità dell'aria, pioggia e contenuto volumetrico di acqua nel suolo.

Dai dati dell'anemometro sonico del periodo 2001-2003, è stata calcolata la densità di flusso di calore sensibile utilizzando il metodo dell'*eddy covariance* (H) e sono state calcolate le caratteristiche delle rampe di temperatura usando i dati di temperatura sonica a 10 Hz, due *time lags* (0.5 e 1.0 s) e le funzioni struttura (Van Atta, 1977). Quindi è stato calcolato H_S usando le caratteristiche delle rampe e l'eq. (3). Il fattore α è stato determinato calcolando la regressione lineare passante per l'origine di H e H_S .

Un secondo data-set ha riguardato il periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002, durante il quale tramite un data-logger CR10X sono stati acquisiti dati di temperatura a elevata frequenza tramite termocoppie a risposta veloce per la stima di H tramite il metodo *Surface Renewal*. I dati provenivano da due termocoppie chromel-constantana con giunzione di 76.2 μm di diametro. La frequenza di campionamento era di 4 Hz con *time lags* $r = 0.25$ and $r = 0.5$ s. Il valore medio di H_S usando le due termocoppie e i due *time lags* è stato confrontato con i valori di H dall'*eddy covariance* per ottenere la pendenza della retta di regressione (α factor) passante per l'origine. Il valore così ottenuto di H_S è stato quindi utilizzato per l'analisi dell'indice F_d .

È stata inoltre calcolata l'evapotraspirazione di riferimento (E_o) utilizzando l'equazione di Penman Monteith (ASCE-EWRI, 2005) e i dati meteorologici orari misurati presso il sito sperimentale al fine di confrontarli con la stima di F_d . Questo confronto è stato effettuato per illustrare le differenze fra domanda evapotraspirativa (E_o) and F_d .

L'indice F_d è stato confrontato con tre indici di rischio di incendio a risposta lenta: il KBDI (Keetch and Byram, 1968) *drought index* (K) e due versioni modificate (Noble et al., 1980 e Griffiths, 1999) del *drought factor* (D) presente nel McArthur (1966, 1967) *forest fire danger meter*; e con l'indice a risposta veloce FFMC del FWI canadese. Infine, è stato effettuato il confronto con l'indice di rischio di incendi boschivi di McArthur (Mk5), nella versione proposta da Noble et al. (1980)

3. Risultati e Discussione

Utilizzando i dati di flusso relativi a periodi di 30 minuti acquisiti nel corso dei tre anni di sperimentazione, le rette di regressione lineare di $H + \lambda E$ e A (dati *eddy covariance*) hanno mostrato pendenze pari a 0.89, 0.88 e 0.79 nel 2001, 2002 e 2003 rispettivamente, con valori accettabili della chiusura del bilancio energetico (Baldocchi, 2003). Il calcolo della regressione di H_S dalla temperatura sonica e di H dal sistema *eddy covariance* ha mostrato valori del fattore α pari a 0.94, 0.97 e 0.94 con valori di R^2 di 0.81, 0.81 e 0.76 nei tre anni. I valori del *root mean squared error* (RMSE) tra H e αH_S sono stati pari a 41.8, 51.5 e 39.6 W m^{-2} nel 2001, 2002 e 2003 rispettivamente. Questi risultati indicano che tramite il metodo SR è possibile ottenere una buona stima di H quando si utilizza la temperatura sonica.

Il calcolo della regressione di H_S dalle termocoppie e di H dal sistema *eddy covariance* ha mostrato un fattore α pari a 0.45. La differenza nei valori del fattore α ottenuti dalla temperatura sonica e dalle termocoppie dipende sostanzialmente dalla diversa frequenza di campionamento e dai diversi valori di *time lags*. Questo risultato conferma precedenti analisi, con un fattore α che differisce fortemente dall'unità se confrontato con quanto si ottiene utilizzando la temperatura sonica. Quando i valori di αH_S sono confrontati con H , si è ottenuta una pendenza della regressione passante per l'origine pari a 1 e un valore di R^2 di 0.92, dimostrando che termocoppie di basso costo e il metodo SR possono fornire una stima accurata di H senza la necessità di misurare il profilo verticale della temperatura e la velocità del vento (Spano et al., 1997) e possono quindi essere utilizzati per determinare valori accurati di F_d , che dipendono dal rapporto fra H e A (eq. 5).

La Figura 1 mostra i valori giornalieri delle densità di flusso di energia rilevati dal 9 Febbraio al 2 Ottobre 2002 presso il sito sperimentale di Ione. I valori della radiazione netta (R_n) e della densità di flusso di calore nel suolo (G) sono misurati mentre H è stimato con il metodo del *Surface Renewal* e λE è calcolato come termine residuale del bilancio energetico.

A partire da Febbraio e sino ai primi di Maggio l'energia disponibile è stata dissipata in massima parte sotto forma di calore latente. Nella prima decade di Maggio si osservano un improvviso aumento di H e un'evidente diminuzione della densità di flusso di calore latente in corrispondenza del disseccamento del suolo e del primo instaurarsi di condizioni di carenza idrica per la vegetazione. Da metà giugno e per tutto il resto dell'estate, i valori di λE sono risultati generalmente bassi e al di sotto di $2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$.

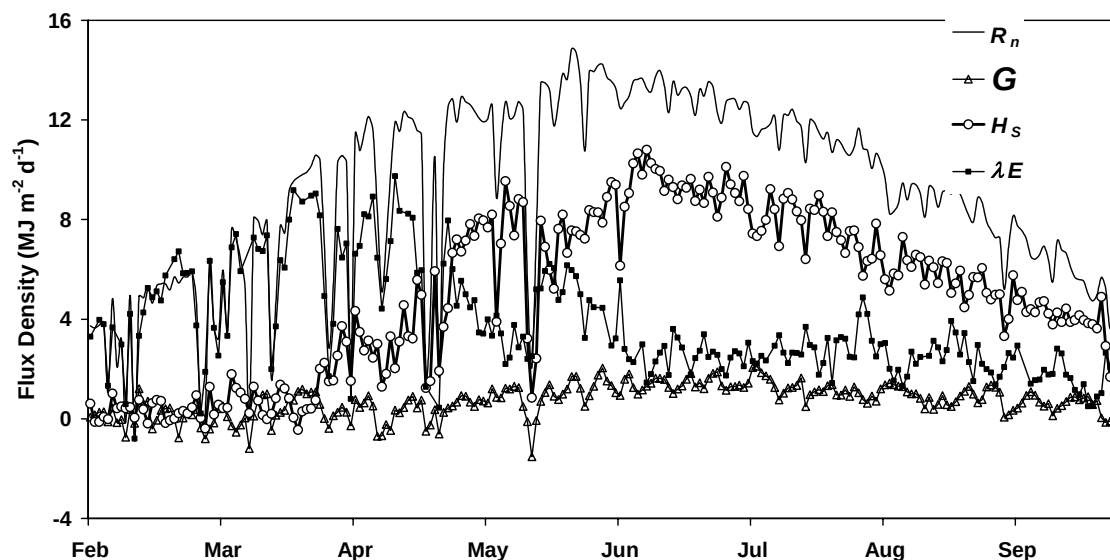


Figura 1. Bilancio energetico giornaliero misurato sulla vegetazione a macchia mediterranea ad Ione, California, USA, dal 9 Febbraio al 2 Ottobre 2002.

I valori dell'indice di rischio di incendio F_d calcolati tramite l'equazione 5 mostrano una forte risposta alle precipitazioni (Figura 2). In generale nel corso dei primi mesi dell'anno F_d è variato fra 0 e 0.2, in seguito a frequenti eventi piovosi e a condizioni di elevata umidità della superficie. Al diminuire delle precipitazioni e della loro frequenza tra fine marzo e metà maggio, F_d è aumentato da circa 0.3 a 0.7. A metà maggio alcuni eventi piovosi hanno determinato una temporanea caduta dei valori di F_d con un incremento sino a un valore di 0.8 a metà giugno. Da questo momento in poi i valori di F_d hanno fluttuato intorno a 0.8 per la maggior parte del periodo arido estivo e sino a metà settembre.

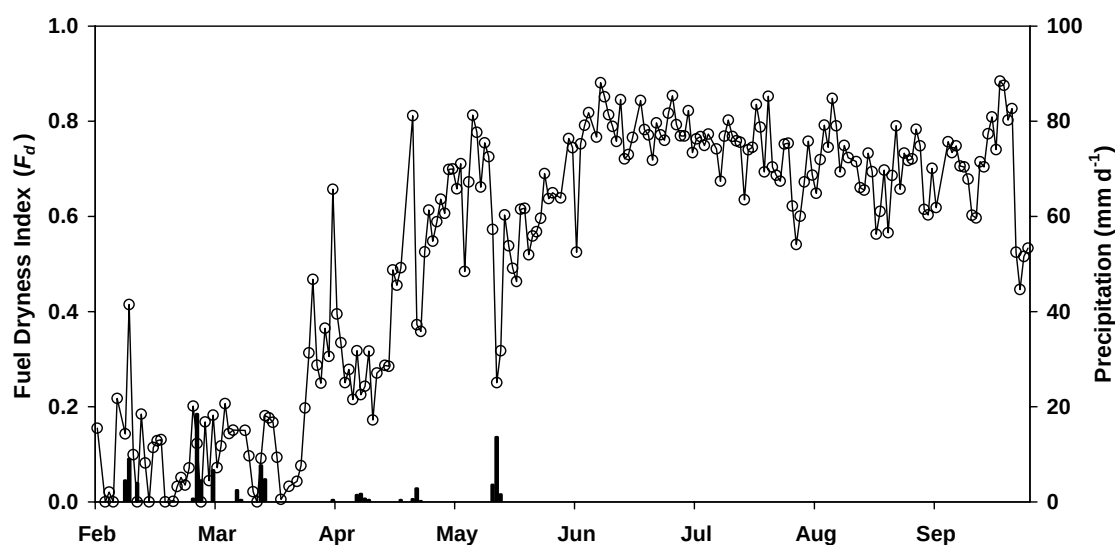


Figura 2. Confronto fra i valori dell'indice di rischio di incendio F_d e le precipitazioni piovose registrati sulla vegetazione a macchia mediterranea ad Ione, California, USA, dal 9 Febbraio al 2 Ottobre 2002.

La Figura 3 mostra le variazioni stagionali di F_d , K e K_H (i valori dell'indice Keetch-Byram ottenuti calcolando l'evapotraspirazione con la procedura originale e con l'equazione di Hargreaves-Samani, 1982, rispettivamente), e il contenuto volumetrico di acqua nel suolo (θ_v) misurato a una profondità di 0.1 m durante la primavera ed estate del 2002. Come previsto, le condizioni meteorologiche giornaliere e le precipitazioni piovose hanno uno scarso effetto sulle variazioni di K . Inoltre, i più elevati valori di K (intorno a 180) sono stati riscontrati alla fine di settembre con valori dell'indice al di sotto del massimo valore potenziale (203.5). L'equazione originale proposta da Keetch e Byram nel 1968 contiene al denominatore una funzione esponenziale della precipitazione media annua che ha l'effetto di regolare i valori di evapotraspirazione in seguito agli eventi piovosi: precipitazioni annue più elevate determinano tassi giornalieri di evapotraspirazione più elevati. Poiché le piogge dell'area mediterranea in cui si è effettuata la sperimentazione sono molto basse se confrontate con i valori annui tipici delle regioni dove il KBDI è stato calibrato, il flusso evapotraspirativo previsto dal KBDI sembra sottostimato durante gran parte dell'anno. Quando l'equazione di Hargreaves-Samani (1982) per la stima dell'evapotraspirazione è utilizzata nella procedura di calcolo di KBDI al posto della funzione originale per ottenere K_H , l'andamento stagionale del KBDI cambia radicalmente ed è quindi possibile osservare valori maggiori di 180 a partire da inizio luglio (Figura 3). Dal momento che KBDI rappresenta una stima dell'effetto di lungo termine dell'aridità sulla disponibilità di combustibile, l'andamento stagionale di K_H ottenuto utilizzando l'equazione Hargreaves-Samani appare più realistico delle variazioni stagionali della disponibilità di combustibile e del rischio di incendio.

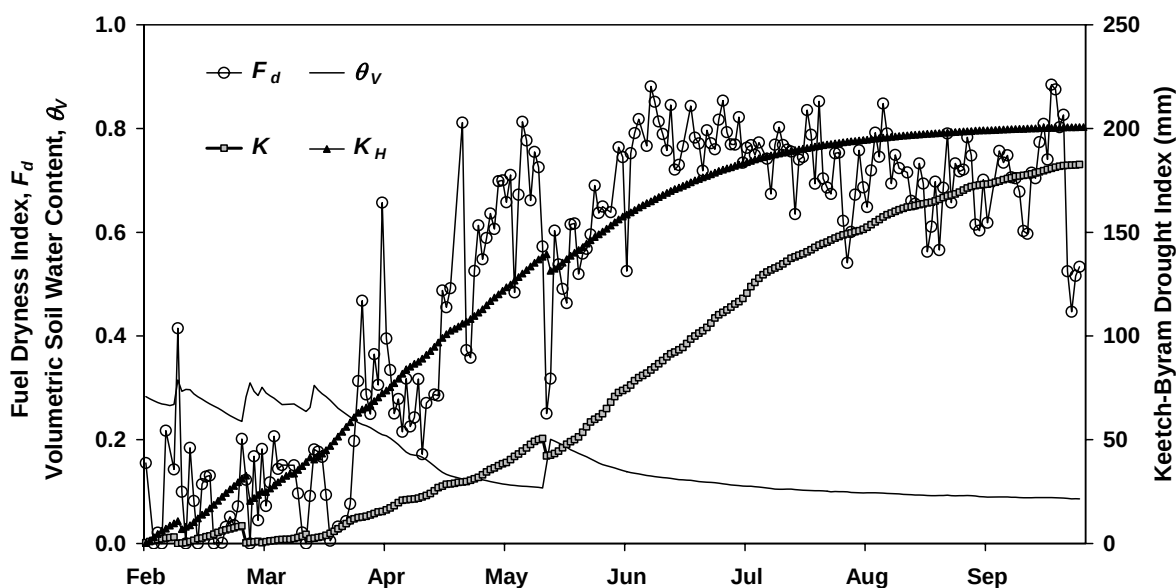


Figura 3. Variazioni stagionali (9 febbraio – 2 ottobre 2002) del fuel dryness index (F_d) calcolato con il metodo SR e l'uso di termocoppie a risposta veloce, di KBDI calcolato secondo la formulazione originale e con l'equazione Hargreaves-Samani per la stima dell'evapotraspirazione (K e K_H , rispettivamente), e del contenuto volumetrico di acqua nel suolo (θ_v) misurato a una profondità di 0.1 m.

L'andamento dell'indice F_d è stato confrontato con il *drought factor* (D) del McArthur *Fire-Danger Meter* (FDI) come proposto da Noble et al. (1980) – D_N – e da Griffiths (1999) – D_G . Questi due modelli mostrano una risposta più rapida di KBDI agli eventi piovosi e un andamento generale durante il periodo di studio più simile all'andamento di F_d (Figura 4). In ogni caso, si può osservare che entrambi gli indici mostrano valori superiori a 5 durante il periodo piovoso invernale, quando il rischio di incendio è sostanzialmente assente, e si attestano al loro valore massimo (10) durante gran parte del periodo estivo. Per quanto i valori di D_N e D_G si riducano drasticamente in risposta alla pioggia, l'entità e la durata di questa

diminuzione non sembra correlata alle condizioni di umidità della superficie, a differenza di quanto si osserva con l'indice F_d . Se si escludono i periodi in cui si verificano precipitazioni piovose, nessuna delle due formulazioni del *drought factor* sembra fornire utili indicazioni sulle variazioni giornaliere dell'umidità del combustibile.

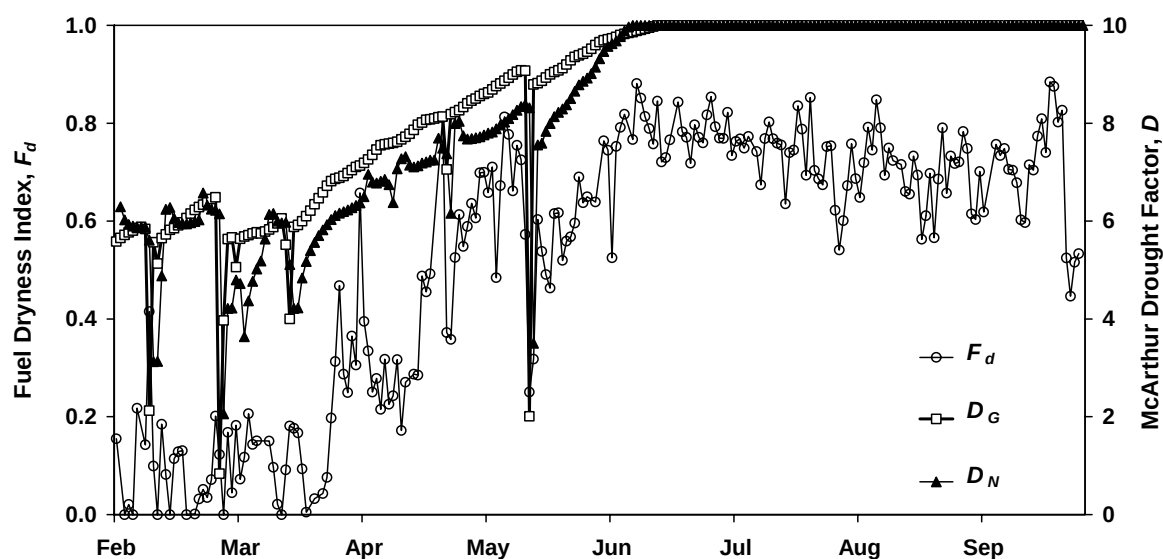


Figura 4. Andamento dell'indice F_d e del drought factor del McArthur Fire-Danger Meter come proposto da Noble et al. (1980) e da Griffiths (1999) (D_N e D_G rispettivamente) durante il periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002.

La Figura 5 illustra l'andamento stagionale del *Fine Fuel Moisture Code*. I valori di FFMC non sembrano dare una stima ragionevole del rischio di incendio in ambiente mediterraneo. Il rischio di incendio segnalato da questo indice è sempre molto elevato con periodi molto brevi di basso rischio in concomitanza di eventi piovosi. Si tratta chiaramente di un indice non adatto agli ambienti mediterranei in quanto calibrato e utilizzato per gli ambienti forestali del Canada.

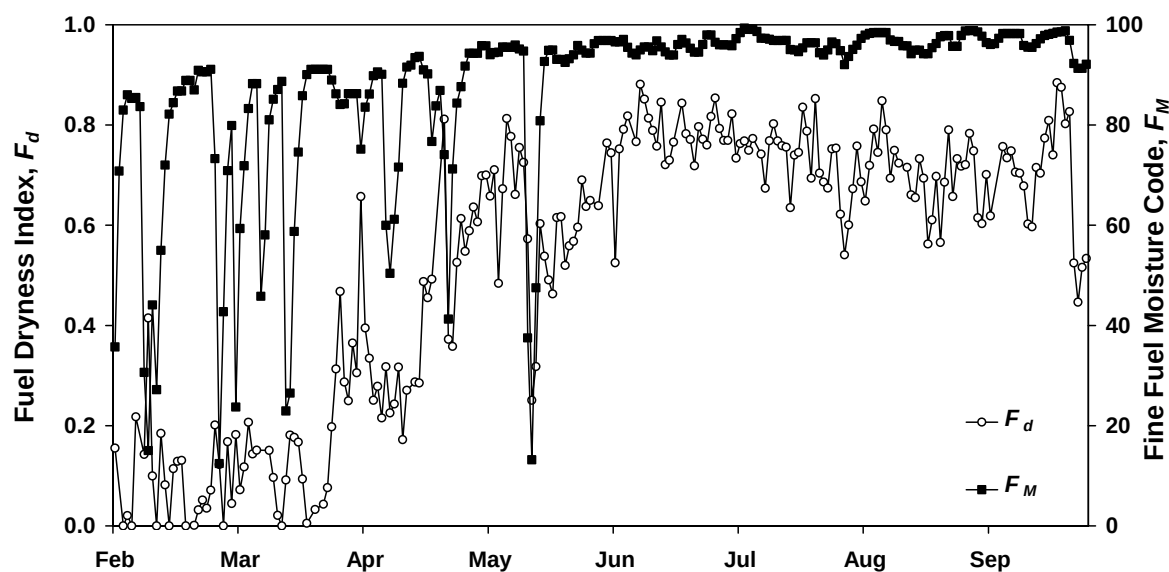


Figura 5. Variazioni stagionali del fuel dryness index (F_d) e del Fine Fuel Moisture Code (F_M) per il periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002.

Un ulteriore confronto è stato effettuato tra F_d e l'indice di rischio di incendi boschivi di McArthur (Mk5), nella versione proposta da Noble et al. (1980) – M_5 . Come mostrato nella Figura 6, i due indici mostrano un andamento analogo, per quanto M_5 mostri valori prossimi a 0 a fine aprile e ai primi di maggio, quando sia le condizioni meteorologiche sia quelle del combustibile determinano in California un livello di rischio di incendio da basso a moderato. L'indice Mk5 mostra in generale maggiori fluttuazioni di F_d , in parte a causa del fatto che Mk5 include nella sua formulazione la velocità del vento. Come mostrato nella presentazione dell'indice F_d , quest'ultimo non considera le condizioni di ventosità ed è infatti da considerare un indice del rischio determinato dalle condizioni di umidità del combustibile piuttosto che un indice della probabilità di propagazione degli incendi.

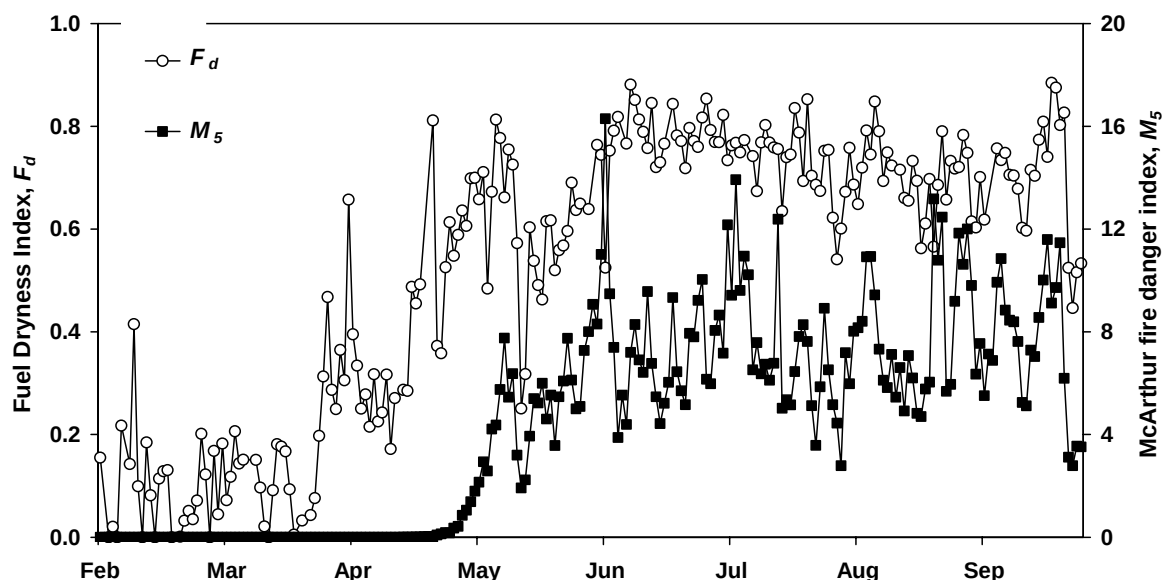


Figura 6. Valori giornalieri del fuel dryness index (F_d) e del McArthur Mk5 fire-danger meter (M_5) durante il periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002.

Infine, nella Figura 7 tutti gli indici analizzati sono confrontati con l'indice F_d per il

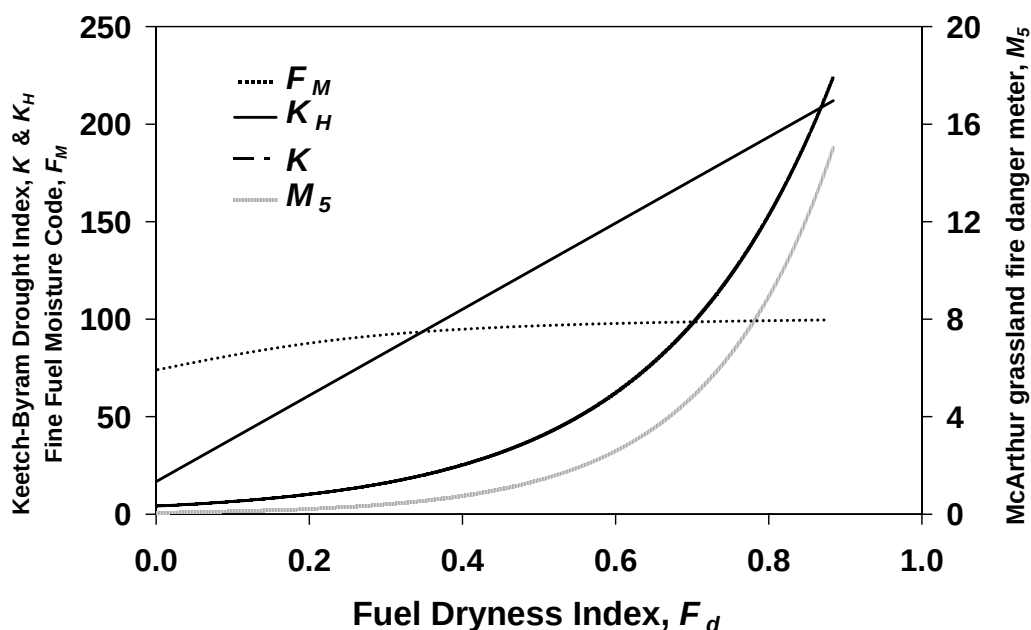


Figura 7. Confronto fra l'indice MK5 (M_4), il Fine Fuel Moisture Code (F_M), il KBDI (K), il KBDI modificato (K_H) e l'indice (F_d) per il periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002. Ciascuna linea è un'interpolazione dei dati sperimentali.

periodo 9 febbraio – 2 ottobre 2002. Dal grafico è chiaro che solo l'indice KBDI calcolato utilizzando l'equazione di Hargreaves-Samani per la stima dell'evapotraspirazione (K_H) mostra una relazione lineare con l'indice F_d , basato su considerazioni biofisiche. In ogni caso, K_H è un indice di natura empirica per cui la relazione è probabile possa variare al variare della località in cui viene applicato, mentre la natura biofisica dell'indice F_d ne garantisce la sua applicabilità generale.

4. Conclusioni

Sulla base dei risultati ottenuti nel corso del soggiorno presso il DLAWR, si può concludere che la stima della densità di flusso di calore sensibile (H), effettuata utilizzando termocoppie a risposta veloce, il metodo Surface Renewal e misure o stime della radiazione netta e della densità di flusso di calore nel suolo, rappresenta un metodo micrometeorologico di costo relativamente basso per il calcolo dell'indice F_d (eq. 5) da utilizzare come indicatore delle condizioni di umidità del combustibile vivo e morto. L'indice F_d mostra di rispondere più rapidamente alle variazioni giornaliere delle condizioni meteorologiche e biologiche rispetto agli altri indici comunemente utilizzati dalle strutture operative di monitoraggio. L'indice F_d può contribuire a migliorare l'attendibilità e l'accuratezza degli indici di rischio di incendio, essendo basato su principi biofisici piuttosto che su funzioni empiriche. La metodologia può inoltre essere facilmente implementata nelle comuni reti automatiche di monitoraggio meteorologico per determinare il rischio di incendio, con una notevole riduzione dei costi connessi alla gestione e manutenzione delle reti di monitoraggio antincendio.

Questa attività di studio e ricerca rientra nell'ambito di una consolidata collaborazione in atto tra il CNR-IBIMET di Sassari e il Department of Land, Air and Water Resources (DLAWR) della University of California su tematiche riguardanti lo sviluppo operativo di tecniche di misura e di analisi di tipo micrometeorologico. Attualmente sono in corso di svolgimento ulteriori campagne di misura e analisi per la validazione del metodo sia in Sardegna sia in California in aree boschive particolarmente suscettibili al rischio di incendio.

5. Bibliografia

- ASCE-EWRI, 2005. The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation. Technical Committee report to the Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers from the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. 173 p.
- Baldocchi D.D., 2003. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9: 479-492.
- Bradshaw, L.S., Deeming, J.E., Burgan, R.E., and Cohen, J.D., 1984. The 1978 National Fire-Danger Rating System: technical documentation. USDA, Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT-169, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, pages 44.
- Burgan, R.E., 1988. 1988 revision to the 1978 National Fire-Danger Rating System. USDA, Forest Service, Research Paper SE-273, Southeastern Forest Experiment Station, Asheville, NC, USA, pages 39.
- Burgan, R.E., Klaver, R.W., and Klaver, J.M., 1998. Fuel Models and Fire Potential from Satellite and Surface Observations. *International Journal of Wildland Fire* 8:159-170.
- Deeming, J.E., Burgan, R.E. and Cohen, J.B., 1977. The National Fire-Danger Rating System-1978. USDA, Forest Service, Gen. Tech. Rep. INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, pages 63.

- Gao, W., Shaw, R.H. and Paw U, K.T., 1989. Observation of organized structure in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorol.*, 47: 349-377.
- Griffiths, D. 1999. Improved formula for the drought factor in McArthur's forest fire danger meter. *Australian Forestry Journal*. 62, Number 2, 210-214.
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. (1982). "Estimating potential evapotranspiration." *Tech. Note, J. Irrig. and drain. Engrg., ASCE*, 108(3):225-230.
- Keetch, J.J. and Byram, G. 1968. A drought index for forest fire control. *Res. Paper SE-38*. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 32 pp.
- McArthur, A.G. 1966. Weather and grassland fire behaviour. *Comm. Aust. For. Timb. Bur. Leaflet 100*, 23 p.
- McArthur, A.G. 1967. Fire behaviour in Eucalypt Forests. *Comm. Aust. For. Timb. Bur. Leaflet No. 107*. 25 p.
- Noble, I.R., Bary, G.A.V. and Gill A.M., 1980. McArthur's fire-danger meters expressed as equations *Aust. J. Ecol* 5: 201-3.
- Paw U, K.T. and Brunet, Y., 1991. A surface renewal measure of sensible heat flux density. In preprints, 20th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, September 10-13, 1991, Salt Lake City, Utah. American Meteorological Society, Boston, MA., USA. pp.52-53.
- Paw U, K.T., Qiu, J., Su, H.B., Watanabe, T. and Brunet, Y., 1995. Surface renewal analysis: a new method to obtain scalar fluxes without velocity data. *Agric. For. Meteorol.*, 74, 119-137.
- Rothermel, R.C., 1972. A mathematical for predicting fire spread in wildland fuels. USDA, Forest Service, Research Paper INT-115, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT, USA, pages 40.
- Spano, D., Snyder, R.L., Duce, P. and Paw U, K.T., 1997. Surface renewal analysis for sensible heat flux density using structure functions. *Agric. For. Meteorol.*, 86: 259-271.
- Van Atta, C.W., 1977. Effect of coherent structures on structure functions of temperature in the atmospheric boundary layer. *Arch. of Mech.* 29: 161-171.
- Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. *Canadian For. Ser. Tech. Rept.* 35, 37 p.
- Webb, E.K., Pearman, G.I. and Leuning, R., 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 106: 85-100.

Il Proponente e Fruitore del Programma

Dr. Pierpaolo Duce

