

## **USO DI MISURE EDDY CORRELATION E DI UN MODELLO DI BILANCIO DI MASSA ED ENERGIA PER MEGLIO INTERPRETARE I FLUSSI MISURATI**

C. Corbari<sup>1</sup>, G. Ravazzani<sup>1</sup>, A. Ceppi<sup>1</sup>, D. Masseroni<sup>1</sup> & M. Mancini<sup>1</sup>

(1) Dipartimento DIIAR, Politecnico di Milano, Italia, e-mail: chiara.corbari@mail.polimi.it

### **SOMMARIO**

*Questo articolo analizza l'affidabilità e la rappresentatività di dati a terra misurati da stazioni eddy covariance e il loro effetto sull'interpretazione dei dati energetici. L'uso di dati di energia per la validazione di modelli energetici necessita che la conservazione della chiusura del bilancio energetico sia soddisfatta, anche se di solito questa condizione non è verificata quando si misura l'energia con una stazione eddy covariance. La chiusura del bilancio energetico è quindi analizzata in questo articolo cercando di analizzare le problematiche e le diverse fonti di errore che portano ad una non chiusura del bilancio energetico, come per esempio la presenza dei termini energetici di accumulo, il periodo di aggregazione temporale, l'area di misura degli strumenti e il significato delle misure turbolente in relazione alla stabilità/instabilità dell'atmosfera. In questo lavoro viene inoltre proposto di migliorare la chiusura del bilancio energetico sostituendo il flusso di calore nel suolo misurato con quello calcolato da un modello distribuito di bilancio di massa ed energia (FEST-EWB). Queste analisi sono effettuate per il campo agricolo sperimentale di Landriano (PV) (Italia-2006).*

### **1 INTRODUZIONE**

I flussi energetici che si sviluppano tra suolo-vegetazione e bassa atmosfera sono importanti per un ampio range di applicazioni a diverse scale spaziali e temporali: dalla simulazione delle piene a scala di bacino alla gestione dell'acqua nelle aree agricole. E' quindi importante studiare l'affidabilità dei flussi misurati prima di utilizzarli per simulazioni idrologiche.

La qualità dei dati misurati con stazioni eddy covariance è influenzata da possibili deviazioni dalle assunzioni teoriche ma anche da problemi di configurazione dei sensori e da condizioni meteorologiche avverse. Il metodo eddy covariance produce risultati corretti solo quando sono rispettate le assunzioni teoriche nello strato limite atmosferico (Baldocchi, 2003; Foken & Wichura, 1996). E' tuttavia difficile isolare le cause degli errori delle misure a causa della complessità delle influenze che incidono sulla misura, principalmente dovute ad errori strumentali e di configurazione degli strumenti, specialmente quelli della tecnica eddy covariance, al problema delle diverse aree di misura, a particolari condizioni atmosferiche e le condizioni di stabilità/instabilità dell'atmosfera (Meyers & Hollinger, 2004; Wilson et al., 2002; Foken, 2008). In particolare le ipotesi teoriche, come le condizioni di stazionarietà, di omogeneità del

campo di misura, la validità dell'equazione di conservazione della massa, flusso di densità trascurabile, flussi turbolenti costanti con la quota e topografia piatta, devono essere rispettate. Inoltre deve essere analizzata anche la configurazione degli strumenti rispetto alla durata e alla frequenza di campionamento, alla separazione tra l'anemometro sonico e il gas analyser, il posizionamento degli strumenti all'interno dello strato limite nel constant flux layer, ma al di sopra del roughness sub-layer. Inoltre le condizioni meteorologiche, come pioggia forte o neve e di debole turbolenza, specialmente la notte, possono portare ad errori nella misura dei flussi. L'uso dei flussi energetici per la validazione dei modelli di bilancio di massa ed energia necessita che la chiusura del bilancio energetico sia soddisfatta, ma il bilancio energetico è tipicamente non chiuso quando si misurano i flussi con stazioni eddy covariance e di solito l'energia disponibile è maggiore della somma dei flussi verticali turbolenti con un rapporto compreso tra 70 e 90% (Meyers & Hollinger, 2004; Wilson et al., 2002). La stabilità dell'atmosfera ha un impatto rilevante sulle misure eddy covariance; in fatti durante la notte, quando si hanno condizioni di stratificazione stabile, i flussi sono generalmente sotto stimati a causa della bassa turbolenza (Foken, 2008; Massman & Lee, 2002). Di conseguenza l'errore del bilancio è maggiore durante la notte che durante il giorno (Wilson et al., 2002; Baldocchi et al., 2001). Un altro aspetto che deve essere considerato, quando si analizza la chiusura del bilancio e che può portare ad un incremento nella sua chiusura, è il contributo dei flussi aggiuntivi di accumulo come il flusso della fotosintesi, la variazione di entalpia nella vegetazione e nell'aria e il flusso di calore nel suolo superficiale (Meyers & Hollinger, 2004; Corbari, 2010). Inoltre il bilancio energetico può essere visto come un problema di scala, perché la rappresentatività dei flussi misurati è una funzione della scala. Ogni flusso è una media spaziale della relativa area di misura. Di solito è valida l'assunzione che l'area di misura sia la stessa per tutti gli strumenti, ma queste aree in realtà possono essere molto diverse se confrontiamo il footprint dei flussi turbolenti con l'area di misura del flusso di calore nel suolo. Quindi una parte dell'errore nella non chiusura del bilancio energetico può essere legato alla difficoltà di far combaciare l'area di footprint con l'area di misura degli strumenti che misurano la radiazione netta e il flusso di calore nel suolo (Wilson et al., 2002; Kustas et al., 2006; Schmid, 1997).

In questo lavoro sono analizzate le problematiche che portano alla non chiusura del bilancio energetico ed inoltre è proposto un metodo per migliorare la chiusura del bilancio energetico osservato ad una stazione eddy covariance sostituendo il flusso di calore nel suolo misurato con quello modellato da un modello distribuito di bilancio di massa ed energia (FEST-EWB) (Corbari et al., 2008; Corbari, 2010). Il flusso di calore nel suolo è stato scelto per essere sostituito perché è il flusso misurato con uno strumento che ha un'area di influenza con può essere anche di due ordini di grandezza inferiore del footprint dei flussi turbolenti, inoltre è il flusso che ha la maggiore incertezza nella sua misura fino ad un errore del 50% (Foken, 2008) e inoltre è un flusso molto variabile in un'area ristretta (Kustas, 2000). Queste analisi sono eseguite nel campo agricolo sperimentale di Landriano, Pavia, Italia, per l'anno 2006.

## **2 AREA DI STUDIO**

La stazione eddy correlation di Landriano (45.19 N, 9.15 E) è situata nel bacino del Po ed è gestita dal Politecnico di Milano e dall'Università di Milano. I dati utilizzati in

questo lavoro sono stati registrati dal 13 Marzo all'11 Ottobre 2006. L'area di studio è un campo sperimentale coltivato a mais che è stato seminato il primo di Giugno e raccolto l'11 Ottobre ad un'altezza di 224 cm. La stazione è dotata di: un radiometro a 4 componenti, un gas analyser accoppiato con un anemometro sonico utilizzati per la tecnica eddy covariance posizionati a 6 m di altezza, un termo-igrometro, diverse sonde di umidità del suolo a diverse profondità, un pluviometro, piatto e termocoppie, un sensore PAR, un sensore ad infrarossi e dei tensiometri. La stazione acquisisce 24 ore al giorno con dati mediati alla mezzora (Hoeschi, 2008; Corbari et al., 2008; Corbari, 2010).

### 3 QUALITÀ DEL DATO EDDY

La qualità delle misure eddy covariance è influenzata non solo dalla possibile deviazione dalle assunzioni teoriche ma anche da problemi di configurazione dei sensori e da critiche condizioni atmosferiche. E' stata quindi effettuata una correzione preliminare dei dati, come per esempio è stato considerato il problema della densità ed inoltre il data set analizzato è stato depurato dei dati misurati nei giorni di neve e forte pioggia (Hoeschi, 2008).

#### 3.1 Effetto della stabilità/instabilità dell'atmosfera

Le ipotesi teoriche come la stazionarietà, l'omogeneità e la turbolenza completamente sviluppata sono verificate tramite dei test di qualità sui flussi energetici. I flussi turbolenti di alta qualità possono essere misurati solo all'interno dello strato limite atmosferico (Foken & Wichura, 1996). La stratificazione dello strato limite è definita dalla teoria di Monin-Obukhov (Monin & Obukhov, 1954) ed è caratterizzata dal parametro adimensionale  $\zeta=(z-d)/L$ , dove  $z$  è la somma tra l'altezza di vegetazione e l'altezza dello strumento,  $d$  è il piano degli spostamenti nulli e  $L$  è la lunghezza di Obukhov. La stabilità dell'atmosfera è inoltre definita tramite il gradiente del numero di Richardson ( $R_i$ ) (Foken, 2008), oltre al parametro  $\zeta$ .  $R_i$ , che è funzione del gradiente termico e della velocità del vento, può essere espresso come:

$$Ri = -\frac{g}{T} \frac{\frac{\partial T}{\partial z}}{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2} \quad (1)$$

dove  $T$  è la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $g$  l'accelerazione di gravità ( $\text{m/s}^2$ ). Se lo strato limite è stabile,  $R_i$  è positivo e si può quindi definire un numero critico di Richardson,  $R_{ic}=0.2$ , per il quale in caso di stratificazione stabile il flusso turbolento diventa quasi laminare. In questa situazione i flussi turbolenti di calore latente e sensibile non sono correttamente misurati con la tecnica eddy e quindi non devono essere considerati nelle successive analisi.

In Tabella 1, i dati sono suddivisi in diurni e notturni considerando come discriminante la radiazione netta ( $R_n>0$ ) e poi a loro volta suddivisi in 5 sottogruppi in base al parametro dimensionale di stabilità  $\zeta$ . Come atteso, durante la notte 88.8 % dei dati si trova in una situazione di stratificazione stabile ( $(z-d)/L>0.1$ ); mentre durante il giorno 89.7 % dei dati è misurato in condizioni di instabilità dell'atmosfera ( $(z-d)/L < 0.1$ ). Inoltre nel caso di stabilità dell'atmosfera, è stato anche calcolato il numero di

Richardson e si nota come durante la notte il 92.3 % dei dati in condizioni di stabilità (60.8 % dei dati totali notturni) abbia  $R_i > R_{ic}$ , così che il flusso non è più turbolento e i flussi di calore latente e sensibile sono sottostimati. Questa situazione di flusso laminare è inoltre presente anche durante il giorno ma come ci si aspettava solo per il 2.2 % dei dati diurni.

<b>notte</b>		<b>N° dati</b>	<b>% dati</b>	<b>Ri ≥ 0.2</b>	<b>% dati</b>
(z-d)/L < -1	Fortemente instabile	251	8.4		
-1 < (z-d)/L < -0.1	Debolmente instabile	51	1.7		
-0.1 < (z-d)/L < 0.1	neutrale	32	1.1		
0.1 < (z-d)/L < 1	Debolmente stabile	416	14.0	57	13.7
(z-d)/L > 1	Fortemente stabile	2221	74.8	1746	78.6
<b>Totale</b>		2971			
<b>giorno</b>		<b>N° dati</b>	<b>% dati</b>	<b>Ri ≥ 0.2</b>	<b>% dati</b>
(z-d)/L < -1	Fortemente instabile	3356	78.9		
-1 < (z-d)/L < -0.1	Debolmente instabile	456	10.7		
-0.1 < (z-d)/L < 0.1	neutrale	53	1.2		
0.1 < (z-d)/L < 1	Debolmente stabile	184	4.3	18	9.8
(z-d)/L > 1	Fortemente stabile	207	4.9	76	36.7
<b>totale</b>		4256			

**Tabella 1** Stabilità ed instabilità dell'atmosfera per i dati diurni e notturni

#### 4 IL BILANCIO ENERGETICO PER UNA STAZIONE EDDY CORRELATION

La chiusura del bilancio energetico è un altro metodo diffuso utilizzato per valutare la qualità delle misure di una stazione eddy covariance (Wilson et al., 2002; Foken et al., 2006; Foken, 2008). Questa resta una problematica tutt'ora aperta, ma l'uso di dati energetici per validare i modelli di bilancio di massa ed energia richiede che la chiusura del bilancio energetico sia verificata. L'equazione di bilancio energetico alla superficie può essere espressa come:

$$R_n - G - (H_s + H_c) - (LE_s + LE_c) = 0 \quad (2)$$

dove  $R_n$  ( $Wm^{-2}$ ) è la radiazione netta,  $G$  ( $Wm^{-2}$ ) è il flusso di calore nel suolo,  $H_s$  e  $H_c$  ( $Wm^{-2}$ ) e  $LE_s$  e  $LE_c$  ( $Wm^{-2}$ ) sono rispettivamente il flusso di calore sensibile e latente

per il suolo nudo (s) e per la vegetazione (c). Assumendo che le ipotesi teoriche della tecnica eddy siano rispettate e che quindi i flussi misurati siano corretti, il bilancio energetico risulta tipicamente non chiuso e in particolare l'energia disponibile è maggiore della somma dei flussi turbolenti. Questo errore è stimato tra il 10 e il 20% (Meyers & Hollinger, 2004; Wilson et al., 2002; Foken et al., 2006). In ogni caso una mancanza di chiusura del bilancio energetico non indica necessariamente che una cattiva qualità del dato misurato. Questo problema della chiusura del bilancio è principalmente dovuto, tra gli altri fattori, alla stratificazione dello strato limite, all'aggregazione temporale, alle differenti aree di misure degli strumenti e ai termini energetici di accumulo (Wilson et al., 2002; Balocchi, 2003). Nei paragrafi successivi sono quindi analizzate queste problematiche per la stazione di Landriano.

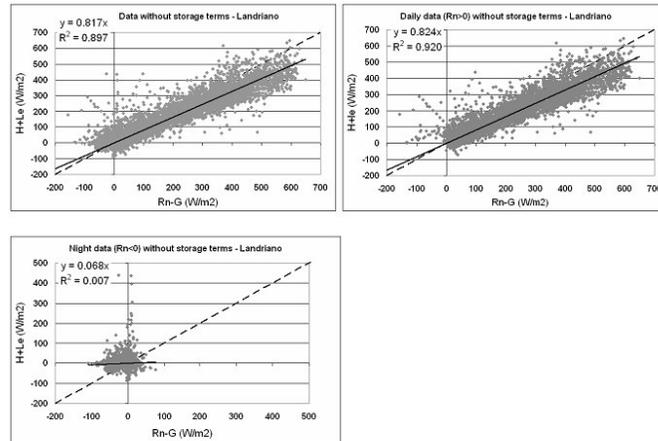
#### 4.1 Chiusura del bilancio energetico: effetto della stabilità /instabilità dell'atmosfera

La stabilità dell'atmosfera ha un impatto rilevante sulla chiusura del bilancio energetico, infatti durante la notte in condizioni di stabilità dell'atmosfera i flussi non sono correttamente stimati e di conseguenza l'errore della chiusura del bilancio risulta maggiore durante la notte che il giorno (Wilson et al., 2002). La chiusura è quindi analizzata considerando solo i dati che sono considerati "buoni" nel test di qualità e suddividendo i dati in diurni e notturni e considerando il parametro  $\zeta$  di stabilità e il numero del gradiente di Richardson (Tabella 2). Si nota come il coefficiente angolare sia maggiore di giorno rispetto la notte e inoltre che all'aumentare dell'instabilità dell'atmosfera questo parametro aumenti. Da queste analisi sembra che i dati notturni non debbano essere considerati per la chiusura del bilancio e nelle simulazioni idrologiche.

		notte $Y = m x$	giorno $Y = m x$
$(z-d)/L < -1$	Fortemente instabile	-0.18	0.88
$-1 < (z-d)/L < -0.1$	Debolmente instabile	-1.5	0.9
$-0.1 < (z-d)/L < 0.1$	neutrale	-0.14	0.9
$0.1 < (z-d)/L < 1$ e $Ri < 0.2$	Debolmente stabile	-0.16	0.93
$(z-d)/L > 1$ e $Ri < 0.2$	Fortemente stabile	0.16	0.85

**Tabella 2** Stabilità e chiusura del bilancio energetico

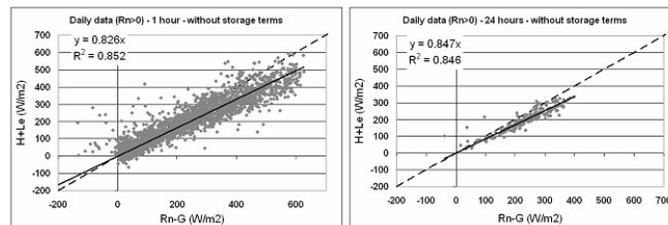
In Figura 1, la chiusura del bilancio energetico è riportata utilizzando tutto il data set è la retta di regressione lineare è pari a  $y = 0.817 x$  con  $R^2$  di 0.89, mentre se si considerano solo i dati diurni c'è un piccolo miglioramento nella chiusura del bilancio ( $y = 0.824 x$  con  $R^2=0.92$ ). Invece se si considerano solo i dati notturni ( $Rn < 0$ ), il coefficiente angolare è pari solo a 0.068 con  $R^2 = 0.007$  (Figura.2). Risultati simili sono stati ottenuti da Wilson et al., 2002 che riporta l'analisi di chiusura del bilancio energetico per 22 stazioni della rete FLUXNET mostrando la sua relazione con la turbolenza in atmosfera (<http://www.fluxnet.ornl.gov/fluxnet/index.cfm>).



**Figura 1** Chiusura del bilancio energetico dei dati misurati alla stazione

#### 4.2 Chiusura del bilancio energetico: effetto dell'aggregazione temporale

Come riportato in letteratura (Foken, 2008), se il periodo di aggregazione è sufficientemente lungo, come diverse ore, si può avere un significativo incremento della chiusura del bilancio, mentre se il periodo di aggregazione è di 1 o due ore, non si notano effetti nella chiusura del bilancio. Questi risultati sono confermati anche dalle analisi effettuate coi dati diurni della stazione di Landriano. I dati sono disponibili ogni 30 minuti e sono stati aggregati a diverse scale temporali. In Figura 2 si nota che se i dati sono aggregati ad 1 ora, la retta di regressione lineare ( $y = 0.826x$ ) non subisce variazioni rispetto a quella coi dati a 30 minuti ( $y = 0.824x$ ), mentre con un periodo di integrazione pari a tutte le ore diurne si ha un piccolo incremento nella chiusura del bilancio ( $y = 0.847x$ ).



**Figura 2** Chiusura del bilancio energetico al variare del periodo di aggregazione dei dati

#### 4.3 Chiusura del bilancio energetico: effetto dei termini energetici di accumulo

L'incremento maggiore nella chiusura del bilancio energetico si ha considerando i flussi aggiuntivi di accumulo come il flusso della fotosintesi, la variazione di entalpia nella vegetazione e nell'aria e il flusso di calore nel suolo superficiale. Il bilancio energetico al suolo quindi può essere riscritto nella sua forma completa come:

$$Rn - G - (Hs + Hc) - (LEs + LEc) = F_{CO_2} + S_{canopy} + S_{air} + S_{soil} \quad (3)$$

dove  $F_{CO_2}$  è il flusso della fotosintesi,  $S_{canopy}$  e  $S_{air}$  sono le variazioni di entalpia nella vegetazione e nell'aria e  $S_{soil}$  è il flusso di calore nello strato superficiale di suolo.

Questi termini di accumulo sono calcolati secondo Corbari, 2010. Questi termini sono spesso trascurabili, specialmente a scala di bacino ad una bassa risoluzione spaziale, mentre a scala locale il loro contributo può essere rilevante. Infatti considerando questi termini aggiuntivi si raggiunge un incremento nella chiusura del bilancio energetico pari al 7.3 % che non è trascurabile anche se ogni termine fornisce un singolo contributo. In Figura 3 si nota come la retta di regressione lineare passi da  $y = 0.824 x$  a  $y = 0.897 x$ .

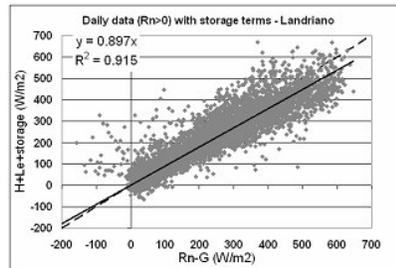


Figura 3 La chiusura del bilancio energetico considerando i termini di accumulo.

#### 4.4 Chiusura del bilancio energetico: effetto delle differenti scale di misura

Inoltre il bilancio energetico può essere visto come un problema di scala, perché la rappresentatività dei flussi misurati è una funzione della scala. Ogni flusso è una media spaziale della relativa area di misura. Di solito è valida l'assunzione che l'area di misura sia la stessa per tutti gli strumenti, ma queste aree in realtà possono essere molto diverse (Figura 4).

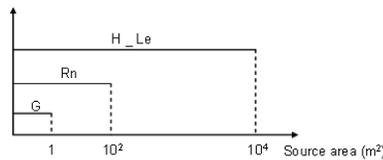


Figura 4 Aree di misura degli strumenti dei flussi energetici.

Quindi una parte dell'errore nella non chiusura del bilancio energetico può essere legato alla difficoltà di far combaciare l'area di footprint con l'area di misura degli strumenti che misurano la radiazione netta e il flusso di calore nel suolo (Kustas et al., 2006; Schmid, 1997; Twine et al, 2000; Anderson et al., 2007). Infatti l'area di misura del radiometro netto è il campo di vista dello strumento al nadir e direttamente legato all'altezza a cui è posizionato e quindi non cambia nel tempo. Invece il footprint della tecnica eddy covariance varia nel tempo e nello spazio in funzione principalmente della velocità e direzione del vento e della rugosità (Schmid, 1997). L'area di misura dello

strumento per il flusso di calore nel suolo è di circa  $1 \text{ m}^2$  che è di diversi ordini di grandezza inferiore rispetto al footprint della tecnica eddy. Inoltre G può essere molto variabile nel campo (Kustas et al., 2000).

In letteratura sono stati proposti diversi metodi per correggere la mancata chiusura del bilancio energetico, come per esempio la correzione basata sul metodo Bowen-ratio che incrementa sia il calore latente che quello sensibile (Twine et al, 2000) o che assegna tutto il residuo al flusso di calore latente (Prueger et al., 2005).

In questo lavoro è quindi proposto un modo differente per migliorare la chiusura del bilancio energetico osservato ad una stazione eddy covariance sostituendo il flusso di calore nel suolo misurato con quello modellato da un modello distribuito di bilancio di massa ed energia (FEST-EWB) (Corbari et al., 2008; Corbari, 2010). Il flusso di calore nel suolo è stato scelto per essere sostituito perché è il flusso misurato con uno strumento che ha un'area di influenza con può essere anche di due ordini di grandezza inferiore del footprint dei flussi turbolenti, inoltre è il flusso che ha la maggiore incertezza nella sua misura fino ad un errore del 50% (Foken, 2008) e inoltre è un flusso molto variabile in un'area ristretta.

#### 4.4.1 FEST-EWB model

FEST-EWB è un modello idrologico distribuito di bilancio di massa ed energia (Corbari et al., 2008; Corbari, 2010) che è stato sviluppato a partire dal FEST-WB e dai modelli ad evento FEST98 and FEST04 (Mancini, 1990; Rabuffetti et al., 2008; Ravazzani et al., 2008). FEST-WB calcola tutti processi principali del ciclo idrologico come l'evapotraspirazione, l'infiltrazione, flusso superficiale e profondo e la dinamica della neve (Corbari et al., 2009). Nel FEST-EWB è stato sviluppato un approccio innovativo per la soluzione del bilancio di massa ed energia tra suolo e bassa atmosfera per applicazioni a scala locale e di bacino idrografico. In particolare il bilancio energetico è risolto ricercando quella temperatura rappresentativa di equilibrio termodinamico (RET) che è definita come la temperatura superficiale (LST) che chiude il bilancio energetico. Utilizzando questo approccio, l'umidità del suolo è direttamente legata al flusso di calore latente e quindi alla temperatura superficiale. L'approccio basato sulla RET è stato testato a diverse scale di risoluzione: dalla scala di campo a Landriano, Moscazzano (Italia) e Bondville (USA), di distretto agrario a Barrax (Spagna) alla scala di bacino idrografico nel bacino dell'alto Po, utilizzando come controllo i flussi energetici delle stazioni eddy covariances e i dati nell'infrarosso termico da satellite, aereo e misure al suolo (Corbari, 2010). In Tabella 3 sono riportati i confronti tra i flussi simulati ed osservati mostrando una buona affidabilità del modello.

	$\eta$	RMSE ( $\text{Wm}^{-2}$ )	Angular coefficient	$R^2$	Total energy (%)
Rn	0.96	38.3	$y = 0.95 x$	0.97	2.4
Le	0.75	54.8	$y = 0.87 x$	0.70	3.4
H	0.71	29.6	$y = 0.80 x$	0.66	-1.3
G	0.68	22.5	$y = 0.84 x$	0.80	7.2

**Tabella 3** Confronto tra flussi energetici misura e simulati

#### 4.4.2 Stima di G attraverso il FEST-EWB nella chiusura del bilancio energetico misurato

In Figura.5 è riportata la chiusura del bilancio energetico per i dati diurni considerando i termini di accumulo e sostituendo il flusso di calore nel suolo simulato dal FEST-EWB. In particolare la regressione lineare forzata per l'origine passa da  $y = 0.897 x$  utilizzando G osservato (Figura.3) a  $y = 0.945 x$  con G simulato, portando un miglioramento del 5.1 %.

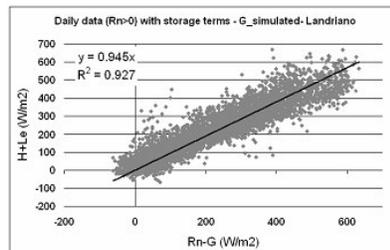


Figure.5 Chiusura del bilancio energetico con il flusso di calore nel suolo simulato.

## 5 CONCLUSIONI

Questo lavoro ha analizzato l'accuratezza dei flussi misurati ad una stazione eddy covarianza e la possibilità di migliorare la chiusura del bilancio energetico osservato con un modello di bilancio di massa ed energia (FEST-EWB). Sono state quindi valutate le diverse fonti di errore che possono incidere sulla qualità del dato osservato; in particolare analizzando quali sono gli effetti della stabilità/instabilità dell'atmosfera, delle diverse aree di misura degli strumenti che misurano i flussi, dell'aggregazione temporale e dei termini di accumulo sulla chiusura del bilancio energetico di una stazione eddy covarianza. In particolare è stato proposto un modo differente per migliorare questa chiusura sostituendo il flusso di calore nel suolo osservato con quello simulato da un modello distribuito idrologico di bilancio di massa ed energia mostrando un buon miglioramento.

**Ringraziamenti.** Questo lavoro è stato sviluppato all'interno del progetto ACQWA EU/FP7 (grant number 212250) "Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water" e del progetto ACCA finanziato dalla Regione Lombardia in collaborazione con L'università di Milano "Misura e modellazione matematica dei flussi di ACqua e Carbonio negli agro-ecosistemi a mais".

## BIBLIOGRAFIA

- Anderson, M.C., Norman, J.M., Mecikalski, J.R., Torn, R.D., Kustas, W.P. & Basara, J.B. A multiscale remote sensing model for disaggregating regional fluxes to micrometeorological scales, *J. Hydrometeorol.*, 2007, 5, 343-363.
- Baldocchi, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future, *Global change Biol.* 2003, 9, 479-492.

- Baldocchi, D.D., E. Falge, L. Gu, R. Olsen, D. Hollinger, S. Running, P. Anthoni, C. Bernhofer, K. Davis, R. Evans, J. Fuentes, A. Goldstein, G. Katul, B. Law, X. Lee, T. Mahl, T. Meyers, W. Munger, W. Oechel, K.T. Paw, U. Pilegaard, H.P. Schmid, R. Valentini, T. Vesala, K. Wilson & S. Wofsy, FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities, *Bull. Am. Met. Soc.* 2001, 82, 2415–2434.
- Corbari, C., Horeschi, D., Ravazzani, G. & Mancini, M. Land surface temperature from remote sensing and from an energy water balance model for irrigation management, *Options Méditerranéennes*, Series A (Mediterranean Seminars) 84, CIHEAM, Bari, 2008, pp. 223–234
- Corbari, C., Ravazzani, G., Martinelli, J. & Mancini, M. Elevation based correction of snow coverage retrieved from satellite images to improve model calibration, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2009, 13, 639–649 ([www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/639/2009/](http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/13/639/2009/)).
- Corbari, C. Energy water balance and land surface temperature from satellite data for evapotranspiration control, PhD dissertation, Politecnico di Milano, Milan, Italy, 2010.
- Foken, T. & Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agr. Forest Meteorol.*, 1996, 78, 83–105.
- Foken, T. *Micrometeorology*, C.J. Nappo, Springer, Berlin, 2008.
- Horeschi D., 2008. *Misure sperimentali per la determinazione del bilancio idrologico*, PhD thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy (in italian).
- Jacobs, A.F.G., Heusinkveld, B.G. & Holtslag, A.A.M. Towards closing the energy surface budget of a mid-latitude grassland, *Bound.-lay. Meteorol.*, 2008, 126, 125–136.
- Kustas, W. P., Anderson, M. C., French, A. N. & Vickers, D. Using a remote sensing field experiment to investigate flux footprint relations and flux sampling distributions for tower and aircraft-based observations, *Adv. Water Resour.* 2006, 29, 355–368.
- Kustas, W.P., Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Ramalingam, K. & Hipps, L.E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site, *Agr. Forest Meteorol.*, 2000, 103, 249–264.
- Mancini, M. *La modellazione distribuita della risposta idrologica: effetti della variabilità spaziale e della scala di rappresentazione del fenomeno dell'assorbimento*, PhD dissertation, Politecnico di Milano, Milan, Italy (in italian), 1990.
- Massman, W.J. & Lee, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges, *Agr. Forest Meteorol.* 2002, 113, 121–144.
- Meyers, T.P. & Hollinger, S.E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean, *Agr. Forest Meteorol.*, 2004, 125, 105–115.
- Monin, A.S. & Obukhov A.M., Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, *Tr. Akad. Nauk SSSR Geophys. Inst.* 1954, 24(151), 163–187.
- Prueger, J.H., Hatfield, J.L., Kustas, W.P., Hipps, L.E., MacPherson, J.I. & Parkin, T.B. Tower and aircraft eddy covariance measurements of water vapour, energy and carbon dioxide fluxes during SMACEX, *J. Hydrometeorol.*, 2005, 6, 954–960.
- Rabuffetti, D., Ravazzani, G., Corbari, C. & Mancini, M. Verification of operational Quantitative Discharge Forecast (QDF) for a regional warning system - the AMPHORE case studies in the upper Po River, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2008, 8, 161–173.
- Ravazzani, G., Rabuffetti, D., Corbari, C. & Mancini, M. Validation of FEST-WB, a continuous water balance distributed model for flood simulation, *Proceedings of XXXI Italian Hydraulic and Hydraulic Construction Symposium*, Perugia, Italy, 2008.
- Schmid, H.P. Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes, *Agr. Forest Meteorol.* 1997, 87, 179–200.
- Twine, T.E., Kustas, W.P., Norman, J.M., Cook, D.R., Houser, P.R., Meyers, T.P., Prueger, J.H., Starks, P.J. & Wesely, M.L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland, *Agr. Forest Meteorol.*, 2000, 103, 279–300.
- Wilson, K., Goldstein, A., Falge, E., Aubinet, M., Baldocchi, D., Berbigier, P., Bernhofer, C., Ceulemans, R., Dolman, H., Field, C., Grelle, A., Ibrom, B.E. Law, A. Kowalski, T. Meyers, J. Moncrieff, R. Monson, W. Oechel, J. Tenhunen, R. Valentini, S. Verma: Energy balance closure at FLUXNET sites, *Agr. Forest Meteorol.* 2002, 113, 223–243.