

Anàlisi del balanç energètic a la superfície
Problema del tancament
Cabauw, Holanda

Treball pràctic

Albert Torres i Galí
Màster oficial en Meteorologia
Universitat de Barcelona
Facultat de Física
Setembre de 2008

Índex

1ª Part

0. Sumari	3
1. Introducció.....	3
2. Descripció de l'indret de mesura i la seva instrumentació.....	4
3. Estudi dels components del balanç energètic a la superfície (SEB) del cicle diari mitjà mensual.....	6
4. Evolució diària del tancament del SEB.....	11
5. Percentatge de tancament del cicle diürn mitjà mensual.....	12
6. Tancament del SEB del cicle diari mitjà mensual.....	14

2ª Part

7. Anàlisis del SEB per dies isolats.....	23
7.1 Anàlisis del 13 de Maig de 2004.....	23
7.2 Anàlisis del 17 i el 26 de Desembre de 2003.....	25
7.3 Anàlisis del 12 d'Agost de 2003. Influències de la no homogeneïtat del terreny.....	29
8. Conclusions.....	33
9. Referències.....	34

Anàlisi del balanç energètic a la superfície

Problema del tancament

Cabauw, Holanda

Màster oficial en Meteorologia
Universitat de Barcelona
Albert Torres i Galí
Setembre de 2008

Sumari. Tot i els progressos realitzats en la matèria fins a dia d'avui, els resultats mostren que el problema del no tancament del balanç energètic a la superfície (SEB) roman obert. El present text analitzarà el comportament dels termes del SEB, els tancaments del cicle diari mitjà mensual així com l'evolució dels tancaments diaris i diürns. En el darrer apartat s'analitzarà el tancament del SEB per dies isolats, cercant raons de l'evolució del tancament diari i les causes del no tancament. El conjunt de dades emprades referents als fluxos turbulents per la realització de l'estudi es varen obtenir emprant el mètode d'Eddy Correlation en el període comprès entre el 1 d'Agost de 2003 i el 31 d'Agost de 2004 a l'estació de Cabauw, Holanda. Dels tretze mesos estudiats, els resultats obtinguts del tancament del SEB es van situar en la majoria casos dins de la normalitat, entre el 65 i el 85 %, llevat dels mesos d'Abril i Febrer amb un tancament del 56 i el 58 % respectivament i el mes de Desembre de 2003 amb un 32 % de tancament. L'origen del no tancament del SEB es va observar que es produïa per la subestimació dels fluxos turbulents pel mètode d'Eddy Correlation, la no homogeneïtat del terreny amb els diferents usos del sòl i les influències de les adveccions.

1. Introducció

Fins a dia d'avui diferents estudis en la matèria han cercat les raons del no tancament del balanç energètic a la superfície terrestre. L'estudi del balanç energètic a la superfície SEB s'explica com la raó existent entre l'energia disponible i la suma dels fluxos turbulents, entenent com a energia disponible la suma de la radiació neta i el flux de calor a través del sòl, mentre que els fluxos turbulents són els fluxos de calor latent i calor sensible. El balanç energètic a la superfície té lloc quan l'energia disponible s'equipara amb la suma dels fluxos de calor latent i calor sensible. En aquesta situació es parla de tancament del balanç energètic a la superfície. A la pràctica la realitat mostra que el tancament en la majoria d'indrets i ecosistemes on s'ha estudiat és una situació que rarament es compleix, quedant en molts casos un romanent energètic que s'anomena residu.

En el present estudi sobre el balanç energètic, les dades experimentals dels fluxos turbulents s'obtenen aparti del mètode d'Eddy Correlation basat en la mesura directe dels fluxos turbulents mitjançant anemòmetres sònics. Diverses són les raons que poden afectar el tancament del SEB, destacarem les més importants citades en diferents estudis sobre la matèria. Les observacionals o relacionades amb la instrumentació en són una d'elles. Per exemple un dels problemes dels anemòmetres sònics és que provoquen en la seva majoria problemes de distorsió dels fluxos de calor latent i calor sensible. A més les mesures obtingudes pel mètode d'Eddy s'ha provat que indueixen una subestimació dels fluxos turbulents de calor latent i calor sensible de manera sistemàtica (Foken et al., 2006; Kanda et al., 2003). Aquesta subestimació dels fluxos turbulents és una de les principals causes del no tancament energètic emprant aquest mètode com a mètode de mesura directe. També cal tenir present que el mètode d'Eddy és vàlid sota certes assumpcions teòriques i que la qualitat de les mesures es pot veure afectada per

possibles desviacions d'aquestes assumpcions. Una altra font d'errors pot ser de caire meteorològic (pluges fortes, neu, torb, boira...) que provoquin errors instrumentals (Foken i Wichura, 1995) alterant els senyals de mesura i provocant problemes de no estacionaritat dels fluxos turbulents que poden acabar afectant el tancament. Cal remarcar que la mesura dels quatre termes que constitueixen l'equació del balanç energètic, es realitza de manera independent i que a més a més el terme de radiació neta s'obté aparti de la mesura de quatre components més que componen el balanç radiatiu, són els components de radiació d'ona llarga i ona curta entrant i sortint. Aquest fet és significatiu doncs mostra la dependència de cada terme de l'equació del balanç energètic a la superfície respecte dels sistemes de mesura i per tant de la possible afectació dels errors instrumentals i de les seves limitacions operatives. Una altra de les possibles influències del no tancament del SEB és la inexistència d'homogeneïtat horitzontal a la superfície del sòl, fruit dels diferents usos del sòl i l'alteració de la rugositat de la superfície, que poden generar remolins que quedin emmascarats en situar-se en escales temporals més grans que no els remolins mesurats amb el mètode de Eddy amb la pèrdua d'informació corresponent. (Panin et al, 1998). En altres paraules les diverses hipòtesis teòriques pressuposen l'homogeneïtat de la superfície del terra, però aquesta premissa a la pràctica no se sol donar gairebé mai causant una alteració del balanç energètic a la superfície. També hi ha la possibilitat de l'existència de circulacions que transportin suplement d'energia sense arribar a entrar en contacte amb la superfície, conegudes com a circulacions secundàries, que no poden ser detectades pel mètode de Eddy Correlation o la influència de les adveccions en el tancament del SEB (Longhui Li et al., 2007). Finalment una causa més i prou significativa per la seva influència en el tancament del balanç energètic a la superfície, és l'energia emmagatzemada a la capa superficial (sòl, vegetació, capa límit atmosfèrica) (Foken et al., 2006; Jacobs, Heusinkveld, 2007) que en no quedar prou determinada degut a la diferent escala de localització dels instruments de mesura, com la radiació neta mesurada a 1.5 m, els fluxos turbulents mesurats a 5.7 m i el flux de calor a través del sòl mesurat 10 cm sota terra. Aquesta darrera causa s'entén com l'existència de més d'una capa de balanç enlloc d'una única capa on s'avalua tal i com es considera en l'equació de tancament, que motivaria el desajust que s'observa en molt casos. Diversos Estudis en diferents ecosistemes, emprant com a mesura dels fluxos turbulents el mètode directe d'Eddy Correlation han mostrat que un percentatge de tancament que es situï en el rang comprès entre el 70 i 90 % és força habitual (Foken et al., 2006).

2. Descripció de l'indret de mesura i la seva instrumentació

L'observatori de Cabauw es troba situat als Països Baixos, conegut amb el sobrenom de CESAR 'Cabauw Experimental Site for Atmospheric Research', és un centre de recerca i estudi de l'atmosfera i les seves interaccions amb la superfície. Localitzat a la zona oest dels Països Baixos (51.97 ° N, 4.93 °E) a 0,7 metres per sota el nivell del mar, molt a prop de la llera del riu Lek s'alça la torre de 213 metres d'alçada que conté bona part de la instrumentació en un entorn agrícola. El període en què es van dur a terme les mesures era dominat per pastures (figura 1), exceptuant el sector oest amb predomini de camps de blat de moro durant la segona meitat de la primavera i l'estiu, amb l'afectació corresponent en les mesures de fluxos amb règims de vent de l'Oest.



fig.1. Cabauw a l'esquerra. A la dreta pastures i bestiar al peu de la torre principal.

L'indret on s'ubica l'estació disposa de molt pocs obstacles elevats al seu voltant i es troba situat a 50 km del Mar del Nord. L'enclavament fou escollit per les seves característiques pel (KNMI) 'Royal Neetherlands Meteorological Institute' en el moment de la seva creació l'any 1972. Per l'interès de l'estudi realitzat en aquest text, es descriuen a continuació les principals característiques dels instruments de mesura i el seu entorn:

Porositat de la superfície del sòl: 49 %

- Mesures de radiació

-Radiació d'ona curta entrant i sortint: les mesures s'enregistren a 1.5 m d'alçada, orientades al sud de la Torre. L'instrument és ventilat a fi d'evitar la formació i afectació d'elements com la rosada, neu o gebrà. Els instruments de mesura consisteixen en piranòmetres *Kipp&Zn CM11*, amb un datalogger propi del KNMI *XQ1/XD0/XF0-SIAM*. La calibració de l'instrument es va dur a terme pel mateix KNMI prenent com a referència la calibració feta a Suïssa.

-Radiació d'ona llarga entrant i sortint: Mesurada a 1.5 m d'alçada amb els sensors situats al sud de la torre de mesura, a l'interior d'una garita, ventilada per evitar la formació de gebrà, rosada o neu i també l'escalfament de la part superior de la gàbia que ve equipada amb termistors emprats per aplicar correccions en cas d'escalfament d'aquesta. L'instrument de mesura consisteix en un Eppley amb un datalogger, *KNMI XLO-SIAM*, calibrat també a Suïssa..

-Radiació neta: S'obté a 1.5 m a partir de les anteriors.

- *Fluxos:* Els fluxos turbulents a la superfície es mesuren a 5,37 m d'alçada, en una ubicació 200 m al sud de la torre principal. Les fluctuacions turbulentes de les tres components del vent i la temperatura es mesuren amb un anemòmetre sònic i un termòmetre. L'angle d'obertura azimuthal emprat per l'anemòmetre sònic per vents horitzontals és de 120 °. Els sensors es disposen de tal manera que s'evitin possibles obstruccions del màstil en els fluxos. Mitjançant un sensor d'infraroig es mesuren les fluctuacions turbulentes d'humitat i de CO₂. L'anemòmetre sònic és un *Kaijo-denki tipus TR60-A*. Recorregut sònic de 0.2 m. Una resolució de 0.1 °K. Mentre que el sensor d' H₂O i CO₂ d'infraroigs té una resolució de 0.003 g/m³ H₂O i 0,15 ppm de CO₂. Això és vàlid pels fluxos de calor latent, calor sensible i de CO₂.



fig 1.b. A l'esquerra, la torre de mesura dels fluxos.
A la dreta la torre principal de 213 m.

Per al *flux de calor del terra* es prenen mesures a 0, -5 i -10 cm. Per al nostre cas treballarem amb les mesures a -10 cm. Les mesures s'enregistren 100 m al sud de la torre principal, mitjançant termifluxímetres col·locats als vèrtexs d'un triangle equilàter. Són instruments del fabricant TNO-Delft, tipus WS31S.



Fig 1.c. Fotografia de l'entorn des de la torre de 213 m.

3. Estudi dels components del cicle diari mitjà mensual del balanç energètic a la superfície.

Els quatre termes de l'equació de tancament del balanç energètic R_n , G , H i LE , es van obtenir en realitzar la mitja per cada un dels registres de cada franja horària d'enregistrament i per cadascun dels dies de cada mes. El procés es va repetir per tots els mesos del període comprés entre el 1 d'Agost de 2003 i el 31 d'Agost de 2004 ambdós inclosos. Del conjunt de registres obtinguts, els errors instrumentals, les diferents afectacions meteorològiques comentades a l'apartat 1 i les limitacions del propi mètode d'Eddy Correlation van provocar una absència de registres de mesura rellevant en alguns dels mesos estudiats. A la Figura 2 es mostra com els fluxos de calor latent i calor sensible presenten el pitjor comportament pel que fa a la no disponibilitat de dades aptes enregistrades mensualment, mentre que la quantitat de dades no aptes de radiació neta i sobretot de flux de calor a través del sòl se situa en llindars molt més baixos. Això es deu sobretot al bon comportament del sensor de mesura del flux de calor del sòl, molt robust i fiable en trobar-se enterrat al terra. Els fluxos de calor latent i calor sensible presenten un percentatge de dades no aptes que se situa entorn el 60 % pels mesos amb pitjor comportament, Desembre, Gener i Novembre. Disminueix fins prop del 40 % a l'Octubre, Febrer i Abril, mentre que la resta de mesos el volum de dades inútils se situa per sota del 30% esdevenint el Juny i Juliol els millors mesos en trobar-se al voltant del 10%.

Pel que fa al comportament de les mesures de radiació neta, aquesta presenta un volum de dades no aptes prou important pel mes d'Octubre situant-se en un 44 % i l'Agost de 2004 en un 29 %. La resta de mesos el comportament de dades disponibles és força bo, amb percentatges de dades no disponibles que se situen com màxim en el 15 % i fins i tot per l'Agost de 2003 i el Juliol de 2004 es disposa del 100 % de dades. El darrer terme el flux de calor a través del terra, té un comportament que ratlla gairebé la perfecció instrumental i només els mesos de Desembre, Abril i Octubre presenten un percentatge de dades inútils que no sobrepassa el 10 % en cap cas.

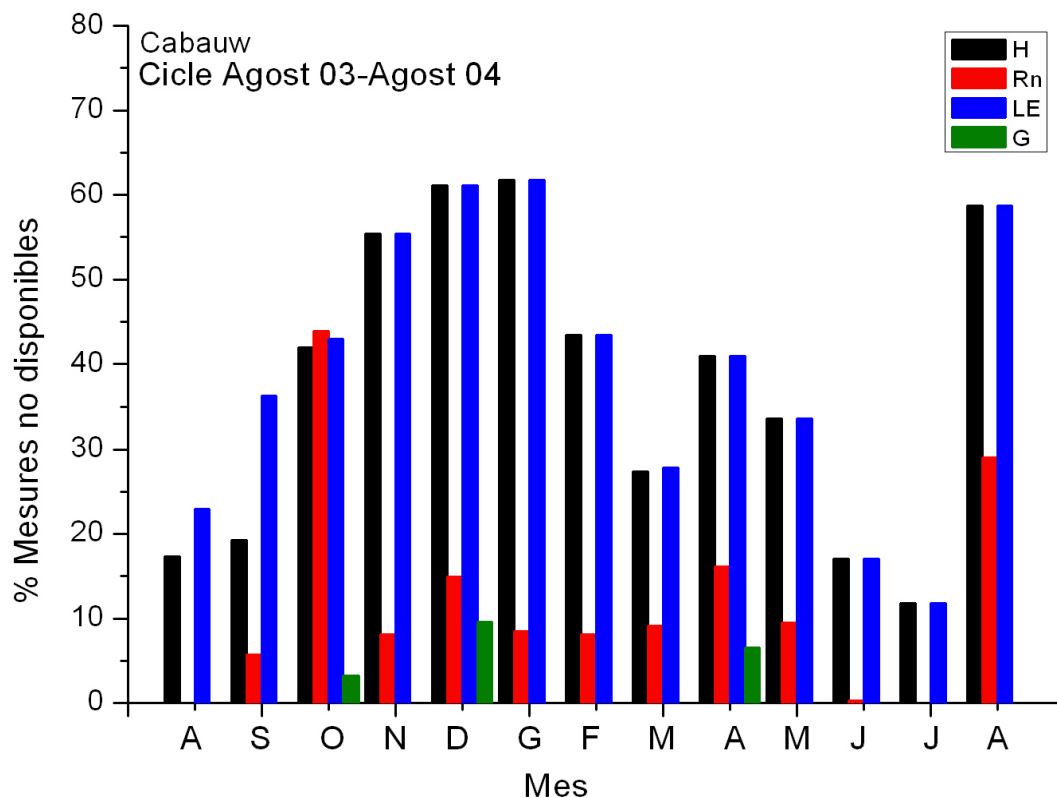
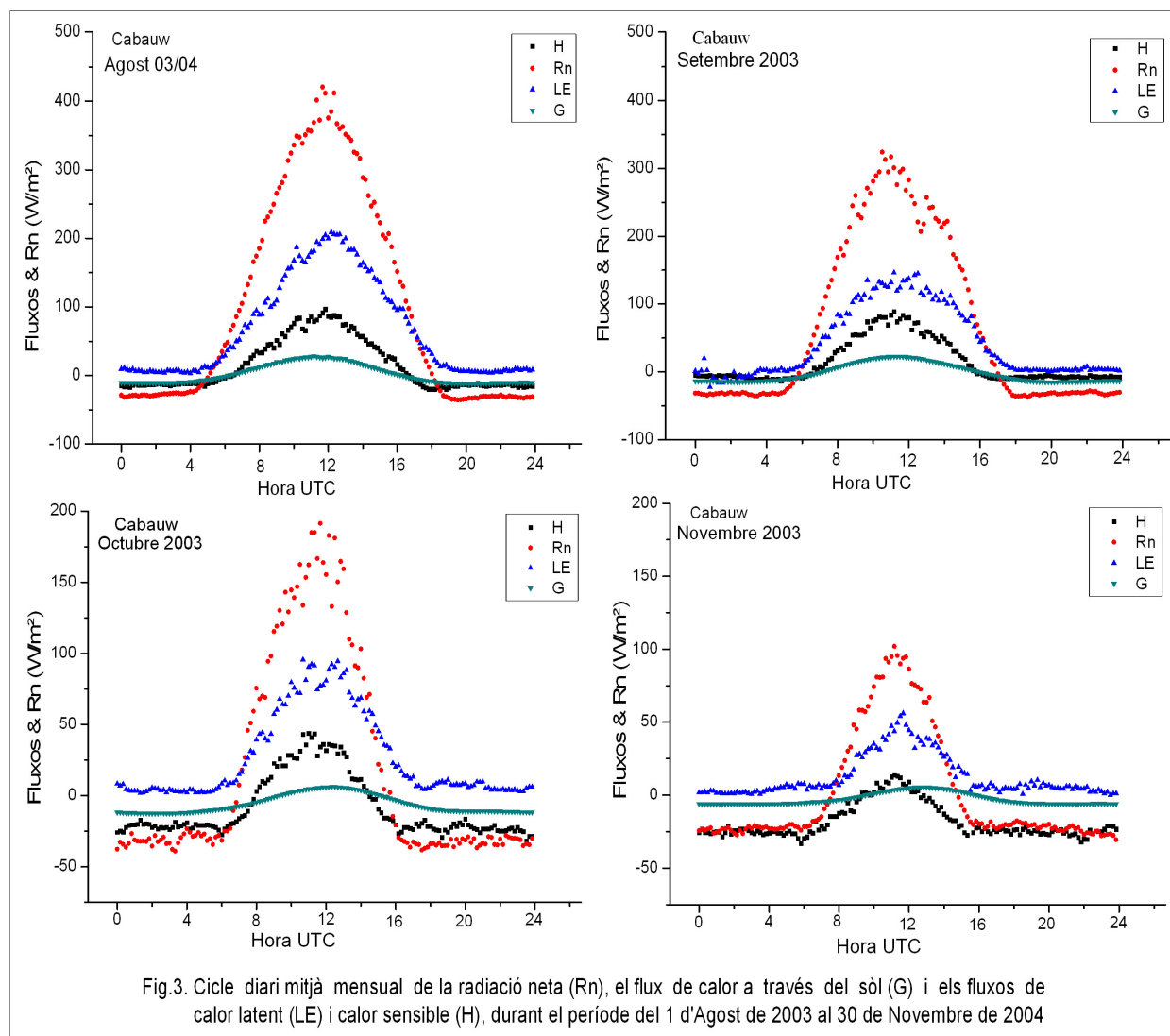


Fig.2 Percentatge de mesures experimentals enregistrades i que no són disponibles per la radiació neta (R_n), el flux de calor del terra (G), el flux de calor latent (LE) i el flux de calor sensible (H) per cada mes d'estudi.

A la figura 3 es representen els quatre termes del balanç energètic a la superfície, mostrant el comportament del cicle diari mitjà mensual durant el període Agost de 2003 - Novembre de 2004. En el cas del mes d'Agost els perfils s'han obtingut fent la mitja dels valors dels anys 2003 i 2004 per cada franja d'enregistraments ja que es disposava de les dades d'ambdós mesos per cadascun dels termes. Aquest fet ha permès que el perfil que descriuen els termes per aquest mes sigui molt més nítid en comparació amb el dels altres mesos en disposar per aquests darrers de menys dades aptes disponibles (fig.2) tal i com s'observa pels mesos d'Octubre i Novembre (fig.3).

El conveni de signes emprat en l'anàlisi dels termes del balanç energètic a la superfície, es consideren positius els fluxos de calor que escapen de la superfície i negatius quan transmeten calor cap aquesta.

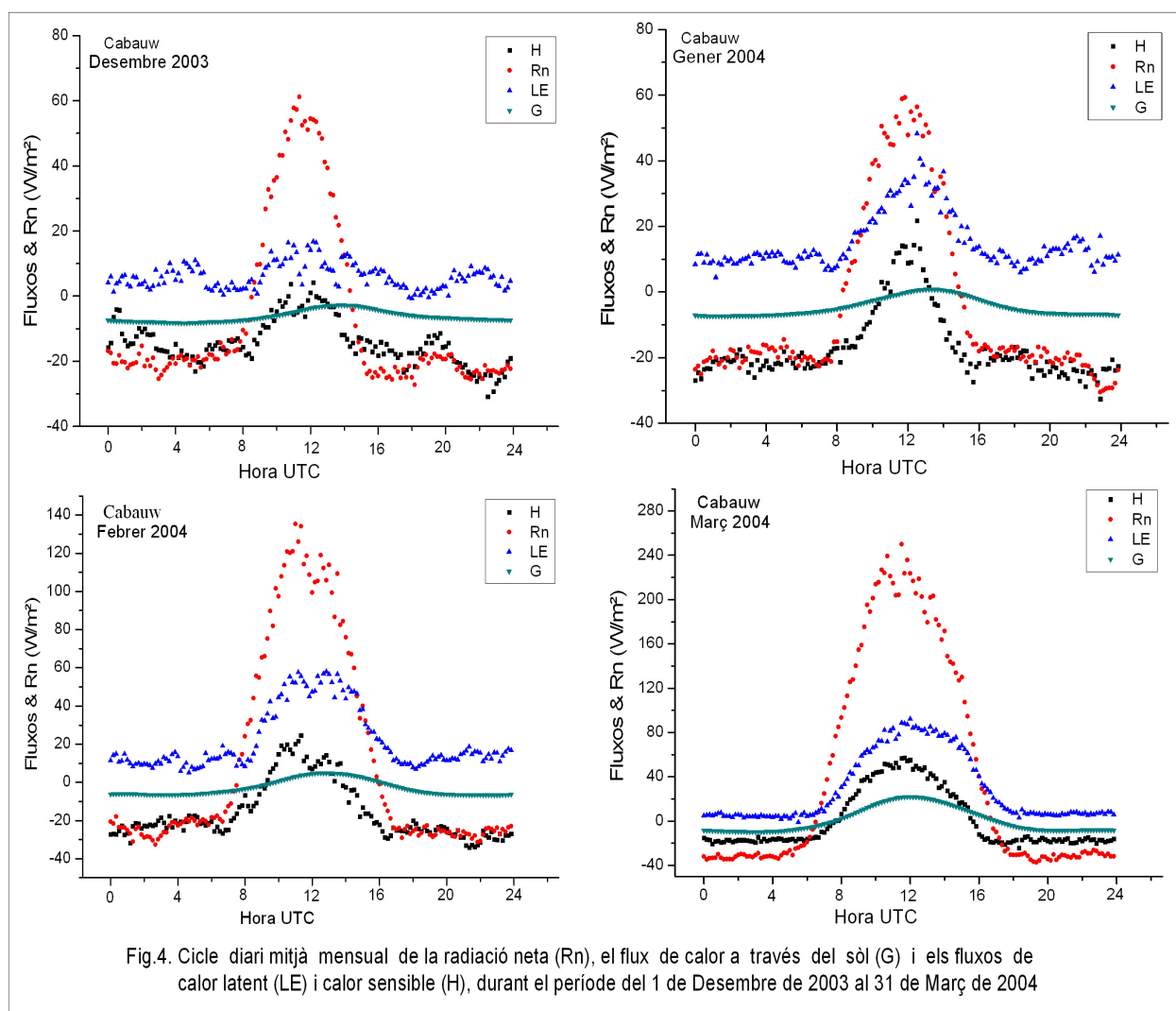
El cicle diari mitjà mensual dels components del balanç d'energia a Cabauw durant aquests quatre mesos, bé marcat per un clar patró de comportament diürn on destaca la importància del flux de calor latent durant tot el dia, sempre superant els valors del flux de calor sensible i del terra. Això ens posa de manifest que Cabauw durant aquests mesos és un indret humit i amb evaporació, d'aquí la importància del flux de calor latent en comparació amb els fluxos de calor sensible i del sòl. Durant la nit la pèrdua radiativa és balancejada en bona mesura mitjançant l'alliberament de calor del sòl juntament amb el flux de calor sensible també negatiu i descendent precisament per pal·liar la pèrdua radiativa de la superfície juntament amb un flux de calor latent poc important. Es pot observar més clarament aquest comportament els mesos d'Octubre i Novembre on les pèrdues radiatives són més significatives i aquest fenomen s'accentua.



Observar també com la forma de campana característica dels perfils de la radiació neta i els fluxos esdevé cada vegada més estreta i petita quantitativament durant les hores diürnes. Així passem dels 400 W/m² de l'Agost als poc més de 100 W/m² del Novembre o en el cas del flux de calor latent dels 200 W/m² als poc més de 50 W/m² i pel flux de calor sensible dels 95 W/m² als només 10 W/m².

A la figura 4 s'il·lustren els comportaments del cicle diari mitjà mensual dels components del balanç energètic durant el període del 1 de Desembre de 2003 al 31 de Març de 2004. Dels quatre mesos cal destacar-ne la baixa disponibilitat de dades útils veure (fig.2), especialment durant els mesos de Desembre, Gener i Febrer, efecte que s'observa clarament per la lleugera dispersió que indiquen els perfils dels fluxos turbulents de calor latent i calor sensible els més afectats per la manca de dades aptes. En canvi el Març amb un volum de dades disponibles més gran presenta uns perfils molt més nítids i amb menys dispersió en obtenir valors amb molt més pes. El tret bàsic del comportament dels components del balanç energètic d'aquest quadrimestre ve regit pel cicle diürn tal i com succeïa en l'anterior. Tant el Desembre com el gener degut a les poques hores d'insolació, presenten un terme radiatiu net molt petit comprès en el rang entre -30 a 62 W/m². Aquest baix valor del terme radiatiu

és balancejat en part amb un flux de calor del sòl establert en un rang entre els -7 a 1 W/m^2 juntament amb els fluxos turbulents de calor latent i calor sensible. El flux de calor sensible és negatiu pràcticament durant tot el dia llevat d'un parell d'hores al migdia el mes de gener i mitja hora el desembre; que sigui negatiu ens indica que el flux és descendent gairebé tot el dia i s'empra per transmetre calor al sòl, que s'invertirà en evaporar aigua continguda a la superfície. Així s'està balancejant el terme radiatiu negatiu, durant bona part del dia amb aquests dos termes juntament amb el flux de calor del terra. La diferència més notòria entre Desembre i Gener rau en el comportament del flux de calor latent, molt petit el desembre sobretot de nit apropant-se al valor de 0 W/m^2 i de dia entorn als 10 W/m^2 ; en canvi pel gener a la nit pren valors al voltant de 10 W/m^2 i de dia s'assoleixen els 40 W/m^2 .



Durant els mesos de Febrer i Març, augmenta l'escalfament radiatiu net diürn en augmentar el nombre d'hores de sol i el valor positiu de la radiació neta, provocant un eixamplament i allargament de la campana que descriu el perfil de l'evolució d'aquest terme. Destacar el balanç radiatiu negatiu a la nit més marcat durant el més de Març amb valors entorn dels -40 W/m^2 que no el Febrer amb valors entorn als -20 W/m^2 . Paral·lelament el flux de calor sensible és més negatiu a la nit durant el més de Febrer que el més de Març, el que indica que el flux de calor va ser descendent i més important durant

el Febrer, subministrant energia a la superfície per evaporar i en conseqüència també s'observa un flux de calor latent major al Febrer en hores nocturnes.

El quadrimestre que inclou els mesos d'Abril a Juliol de 2004, conté el millor percentatge de dades experimentals disponibles aptes per l'estudi de l'evolució dels termes de l'equació de balanç, veure fig(2) millorant d'Abril a Juliol. Es pot observar com aquests quatre mesos tenen un comportament

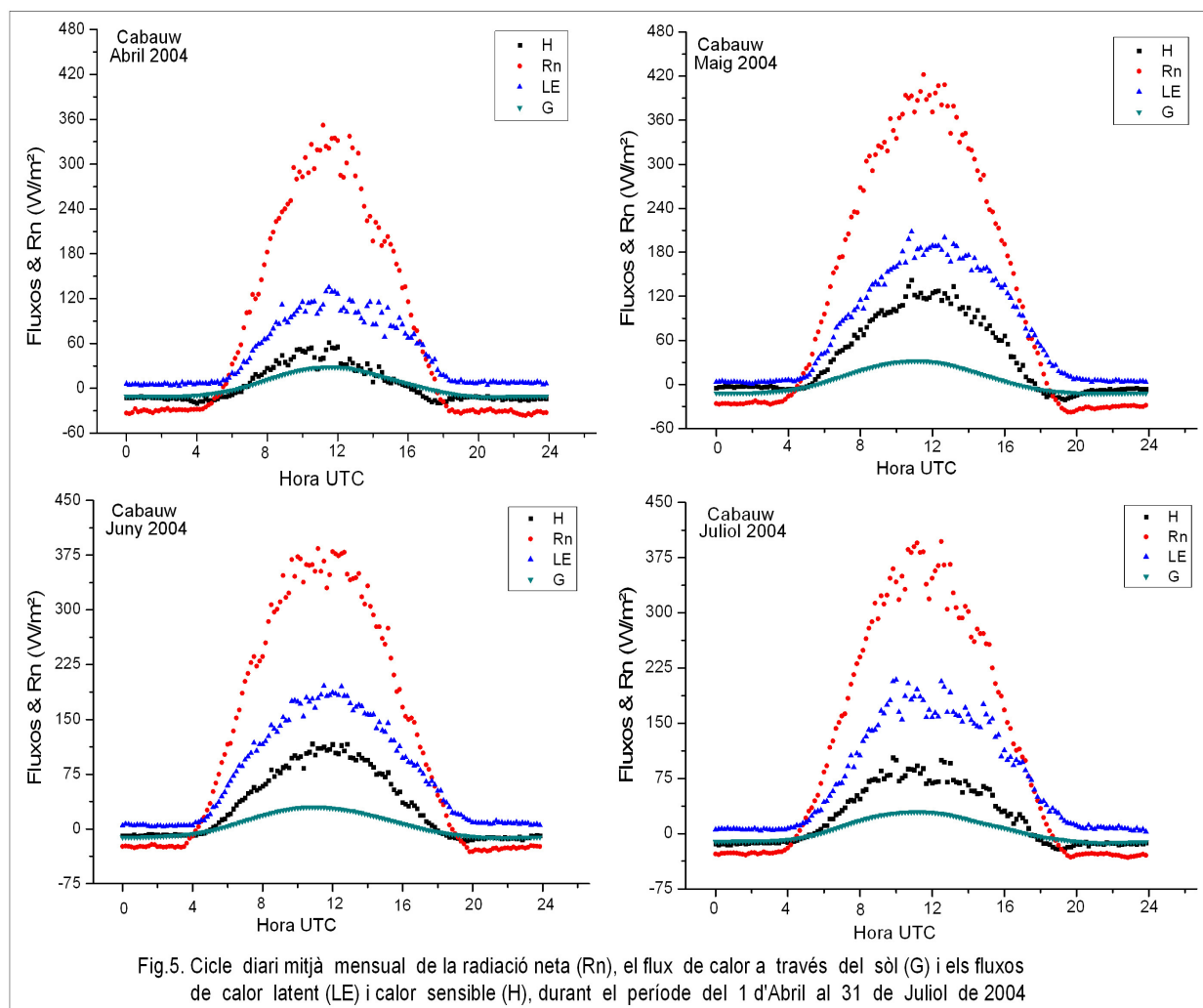


Fig.5. Cicle diari mitjà mensual de la radiació neta (Rn), el flux de calor a través del sòl (G) i els fluxos de calor latent (LE) i calor sensible (H), durant el període del 1 d'Abril al 31 de Juliol de 2004

pel que fa al perfil dels termes del balanç energètic, amb matisos, molt similar al patró observat en els quadrimestres anteriors. L'efecte diürn queda molt palès i pren més protagonisme a mesura que ens apropem als dies amb major nombre d'hores de balanç radiatiu positiu. Analitzant els perfils, s'aprecia com el més de Maig és el segon més d'entre tot el període de tretze mesos estudiat, amb un valor més important pel terme de la radiació neta, assolint valors de 420 W/m^2 una mica per sota dels 450 W/m^2 de l'Agost de 2003. Aquest escalfament radiatiu a la superfície de dia, és balancejat mitjançant els fluxos de calor latent i calor sensible ambdós positius, que adquireixen valors significatius de Maig a Juliol. Aquest comportament mostra l'existència de turbulència atmosfèrica i contingut d'aigua al sòl. Destacar el flux de calor a través del sòl, positiu que contribueix a balancejar el terme d'escalfament radiatiu i que és durant aquest quadrimestre que pren com a valors més importants 32 W/m^2 . De l'anàlisi dels diferents perfils per cadascun dels mesos d'estudi dels termes del balanç energètic, deduïm

que la zona de Cabauw li correspon un clima humit durant gairebé tot l'any, que coincideix amb la classificació climàtica de Köppen, en considerar-ho com a clima plujós durant tot l'any amb estius suaus i llargs. El perfil del cicle diari mitjà mensual del flux de calor latent durant tot el cicle estudiat ha estat positiu, corroborant el clima més aviat humit de l'indret on s'ubica l'estació de Cabauw.

4. Evolució diària del tancament del balanç energètic a la superfície

L'avaluació del grau de tancament a la superfície s'obté de l'equació del balanç energètic, equació (1), essent (R_n) la radiació neta, (G) el flux de calor del terra, (H) el flux de calor sensible i (LE) el flux de calor latent.

$$0 = R_n - G - H - LE \quad (1)$$

L'acompliment d'aquesta equació se satisfà poques vegades, representant millor el grau de tancament del SEB l'equació (2):

$$Res = R_n - G - H - LE \quad (2)$$

Aquesta equació conté un nou terme per donar compte del no tancament, és el residu Res . Quan major és aquest terme major serà l'ímbalanc i menor el tancament, mentre que el cas de major acord correspon a la situació en què no hi ha residu $Res = 0$. El tancament també es pot avaluar com un percentatge que té en compte el grau d'acord entre la suma dels fluxos turbulents $H+LE$, i l'energia disponible $R_n - G$:

$$T(\%) = \frac{H + LE}{R_n - G} \times 100 \quad (3)$$

Emprant l'equació (2) es va procedir a obtenir el residu mitjà diari per tota la mostra de dies per les que es disposaven registres i per cada dia dels tretze mesos estudiats figura 6a. El resultat que es va obtenir no deixa entreveure el seguiment d'un cicle estacional, amb els dies de menor residu durant el més de Maig, quan els fluxos de calor latent i calor sensible són significatius enfronts del terme radiatiu, a l'igual que succeeix durant el mes de Gener. Els màxims residus s'obtenen durant els mesos

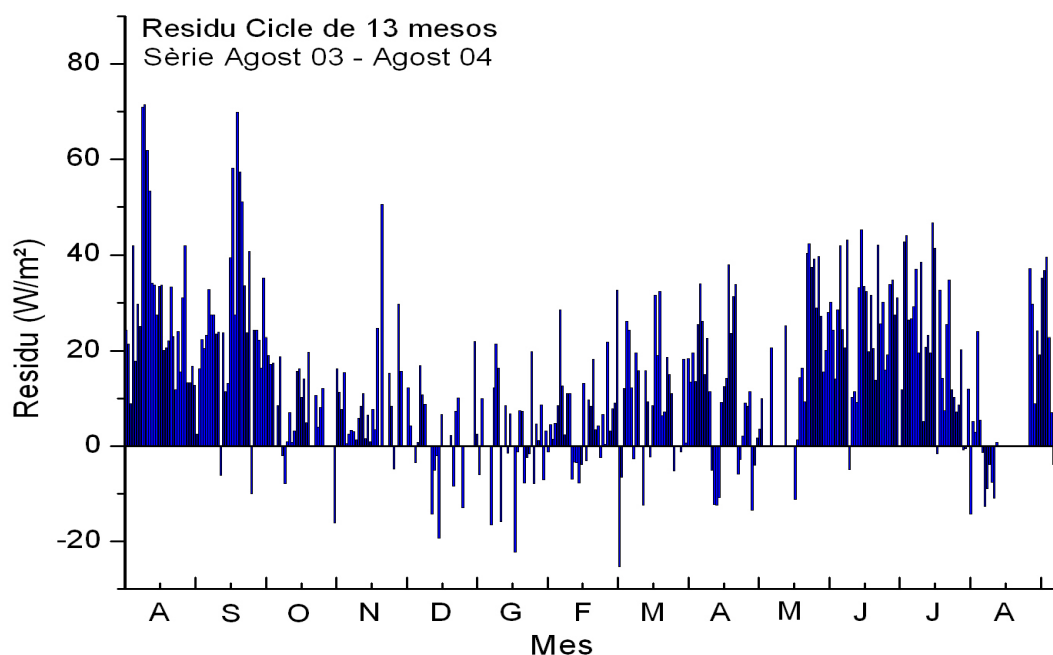


Fig. 6a. Residu diari pel període 1 d'agost de 2003 a 1 d'Agost de 2004

d'Agost i Setembre. El residu mitjà diari pren el valor de 14.6 W/m^2 amb una desviació estàndard de 16.6 W/m^2 i amb un rang situat entre els 87.4 i -25.7 W/m^2 . És important remarcar la disparitat existent entre el nombre de registres de mesura disponibles per cada un dels dies i per cadascun dels termes de l'equació de balanç, que fan que el residu obtingut depenent del dia tingui més o menys pes o fins i tot que sigui inexistent en el cas de no disposar de cap dada per alguns dels termes. Per minimitzar l'efecte del diferent pes en fer la mitjana del residu diari i perquè aquest no sigui molt dispar, es va imposar una restricció consistent en refusar tots els dies amb un percentatge de dades no disponibles superiors o igual al 20% de la mostra. El resultat final és visible a la figura 6b i consta d'una mostra de només 90 dies dels 396 dies possibles. Respecte dels resultats que es van obtenir sense restriccions, s'aprecia com els dies

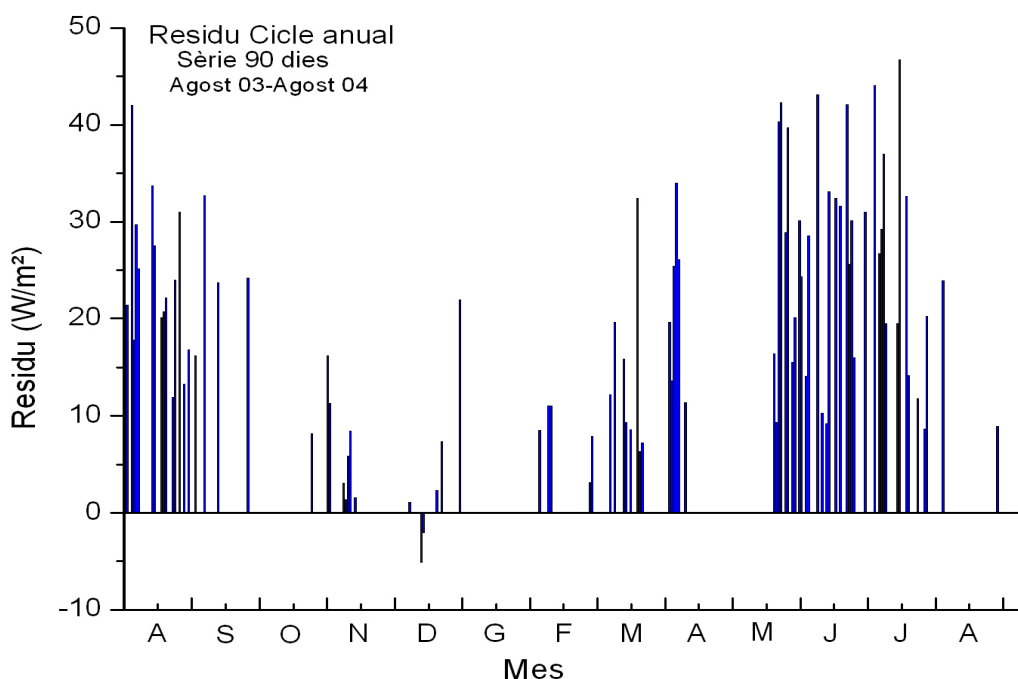


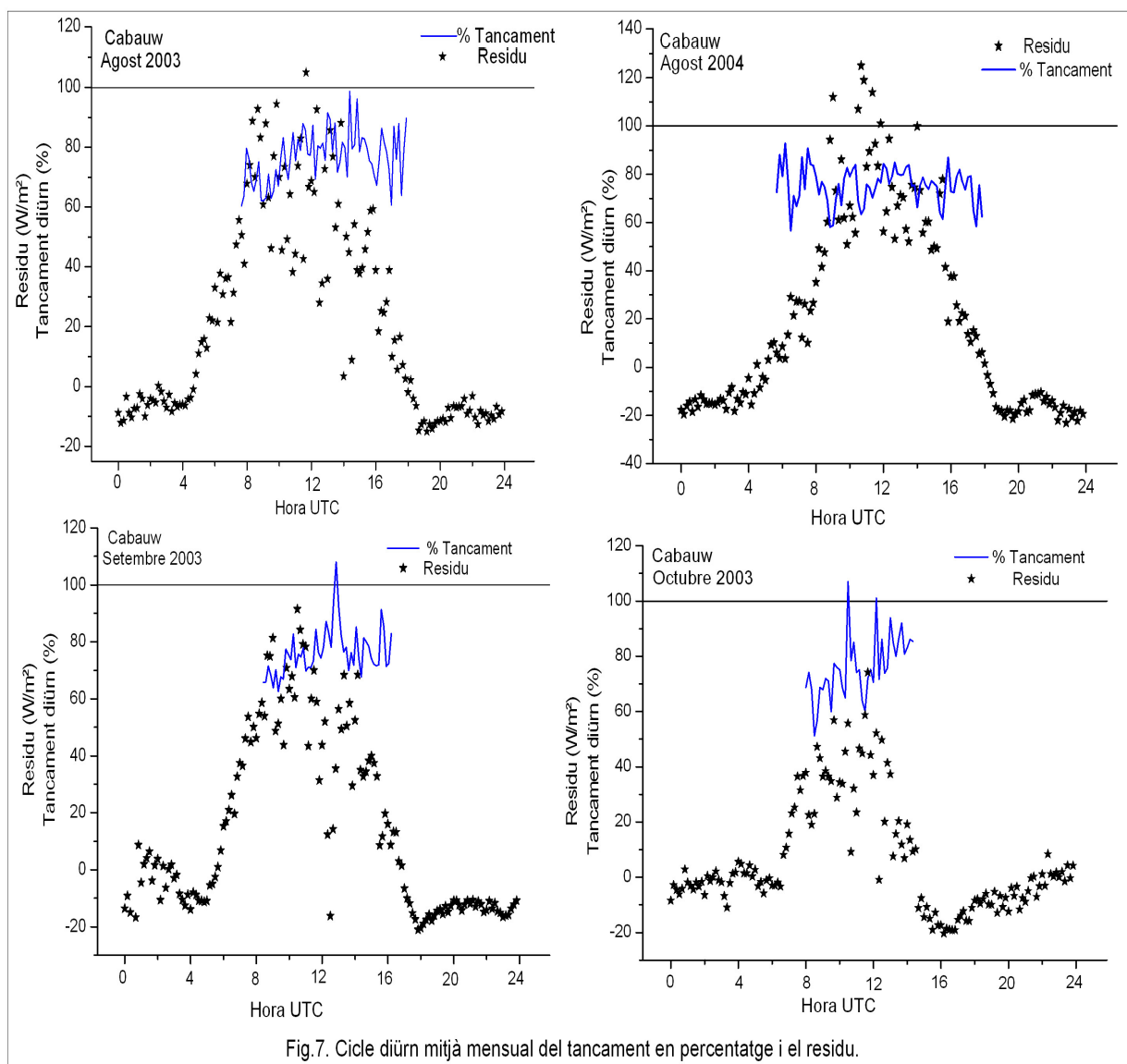
Fig. 6b. Residu diari amb la restricció que el conjunt de registres mesurats no aptes sigui inferior al 20%

de residu negatiu pràcticament desapareixen de la mostra a l'igual que els dies amb residus més importants. També és rellevant la poca representativitat dels mesos d'Octubre a Febrer per la manca de dies que sobreviuen a la restricció imposada, com també és rellevant el comportament tant dispar dels mesos d'Agost de 2003 i 2004.

5. Percentatge de tancament del cicle diürn mitjà mensual

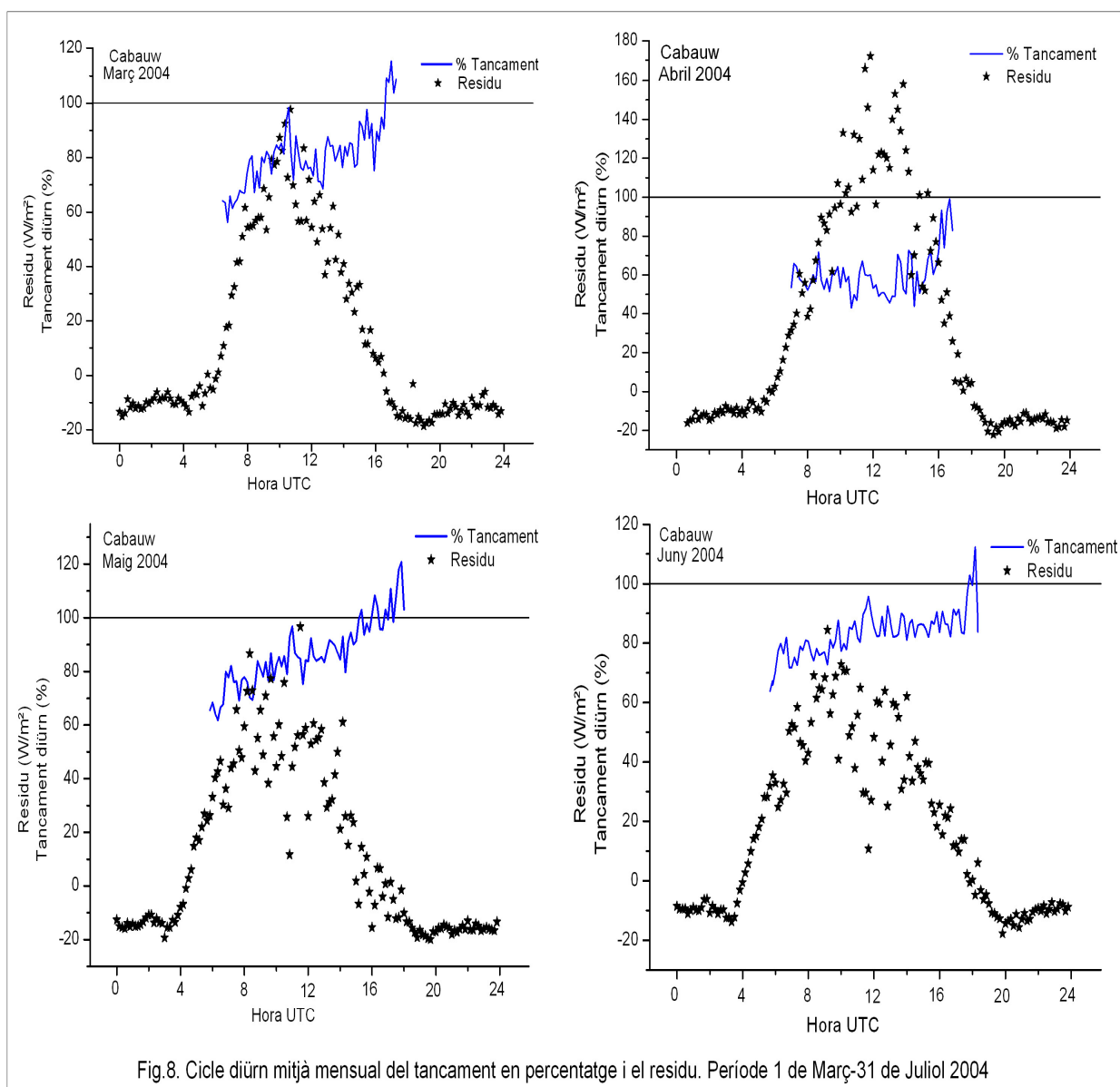
Un estudi més detallat, permet veure l'evolució del tancament del balanç energètic a la superfície SEB cada deu minuts durant el cicle diürn expressat en forma de percentatge. L'estudi engloba dos períodes, el primer compres entre l'Agost i l'Octubre de 2003 i el segon entre el Març i l'Agost de 2004, excloent els mesos amb menys hores d'insolació i menys hores diürnes. Per obtenir el tancament es recorre a l'expressió descrita a l'equació (3); aquesta expressió s'ha emprat des de poc després del crepuscle matutí fins una mica abans del crepuscle vespertí. D'aquesta manera s'evita que quan els termes de l'equació del balanç com el terme radiatiu, el flux de calor del terra o flux de calor sensible canvien el seu signe, provoquin problemes numèrics en adquirir el tancament valors exageradament grans o negatius que no tenen significat físic. A la figura 7 es representen el cicle diürn mitjà mensual del tancament en percentatge i el residu, pels mesos d'Agost de l'any 2003 i 2004 juntament amb els mesos de Setembre i Octubre de 2003. Pels mesos d'Agost a Octubre de 2003 el percentatge de

tancament mínim succeeix a primera hora del matí molt probablement degut a la subestimació que el mètode d'Eddy Correlation fa del flux de calor latent. Els tancaments majors s'observen a partir de migdia o primera hora de la tarda quan els fluxos turbulents de calor latent i calor sensible prenen els valors més grans, comportament detectat també per (Brotzge et al. 2002). Si s'observa amb detall es pot veure la relació entre els pics màxims i mínims de tancament amb el residu corresponent.



Així els pics màxims de tancament van associats a residus mínims i pics mínims amb residus màxims. Destacar el comportament dispar entre els mesos d'Agost dels anys 2003 i 2004, tant pel que fa a residu com en percentatge de tancament. El residu de l'Agost de 2004 va ser més extrem tant pel que fa a residus màxims durant les hores centrals del dia com els residus mínims nocturns, lleugerament inferiors als del 2003, comportament que està d'acord amb un tancament major que s'observa en percentatge durant l'Agost de 2003. A la figura 8 es mostren els resultats dels càlculs del cicle diürn mitjà mensual del tancament i el residu aplicats al quadrimestre que va de Març a Juny de 2004. El comportament dels mesos de Març, Maig i Juny és molt similar, amb mínims tancaments a primera hora del matí i màxims tancaments tant al migdia com avançada la tarda, amb una tendència clarament a l'alça amb el pas de les hores. El comportament del mes d'Abril és sensiblement diferent amb

tancaments inferiors situats en el rang entre el 50 i 70 % la major part del dia, llevat de les darreres hores de la tarda on millora fins apropar-se al tancament. Això es deu a la subestimació dels fluxos de calor latent i calor sensible veure (fig.5), més marcada que la dels altres mesos d'aquest quadrimestre quan es compara amb l'energia disponible.



6. Tancament del balanç d'energia del cycle diari mitjà mensual

L'estudi del tancament del SEB aplicat al cycle diari mitjà mensual va ser estudiat per cadascun dels tretze mesos de què es disposen dades. La metodologia emprada va consistir en representar gràficament per cada un dels tretze cycles diaris mensuals, l'energia disponible, la suma dels fluxos turbulents i el residu a fi de veure el comportament d'aquests termes i obtenir-ne conclusions. El grau de tancament es va avaluar realitzant un ajust lineal entre la suma dels fluxos turbulents i l'energia disponible, ajust que es va forçar a passar per l'origen. La figura 9 conté pels mesos d'Agost de 2003 i 2004 el comportament del cycle diari mitjà per l'energia disponible, la suma dels fluxos turbulents i el residu juntament amb la regressió lineal forçada a l'origen. El resultat va mostrar un acord important en el tancament per

ambdós mesos, assolint valors que es troben dins del rang considerat habitual emprant Eddy Correlation com a mètode de mesura i que difereixen només en un 2% . Aquesta diferència en el tancament es pot explicar observant les gràfiques dels fluxos turbulents i l'energia disponible on s'aprecia una lleugera subestimació dels fluxos turbulents entre les 9 i les 11 hores del matí més evident fins i tot l'any 2004.

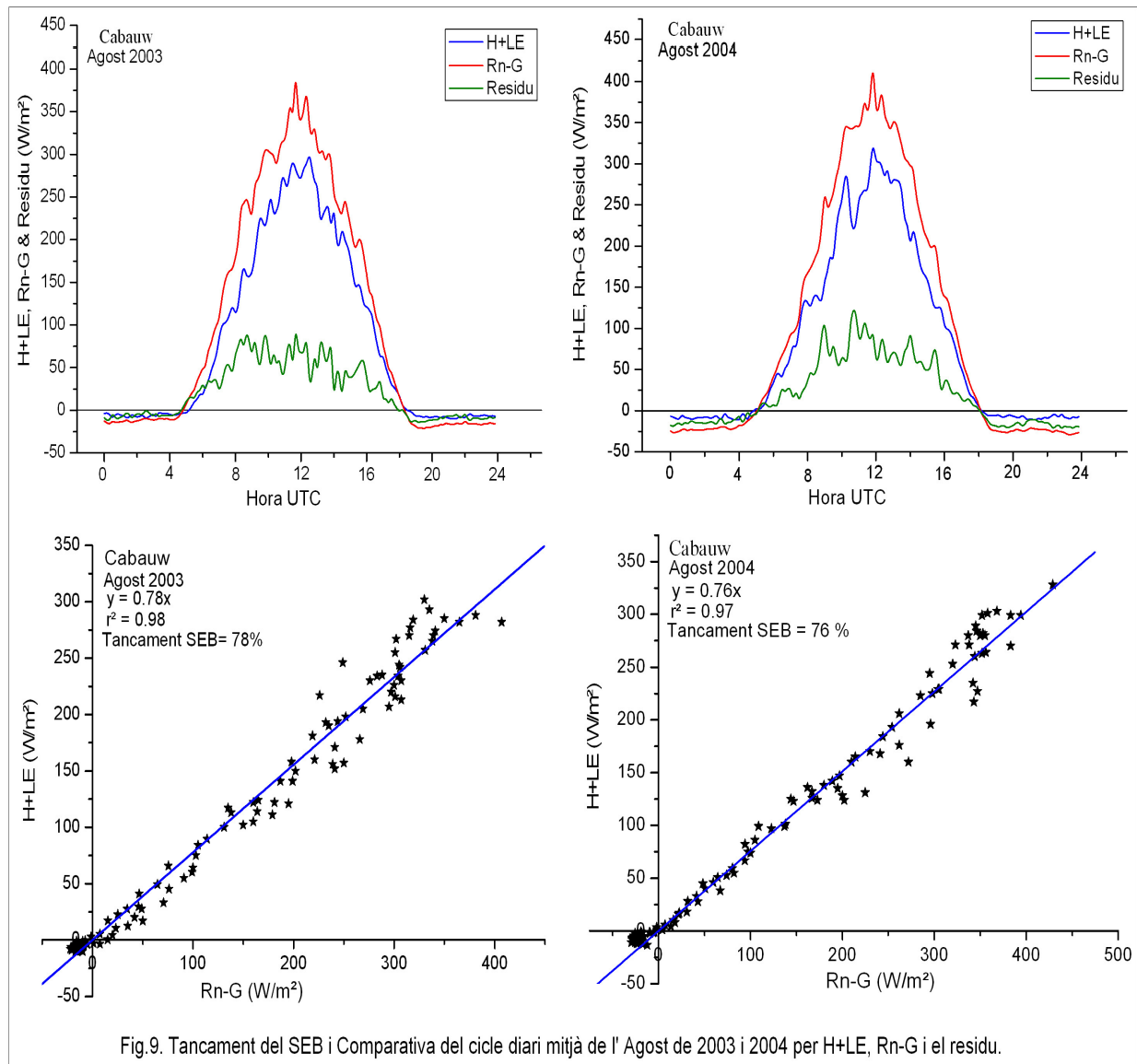
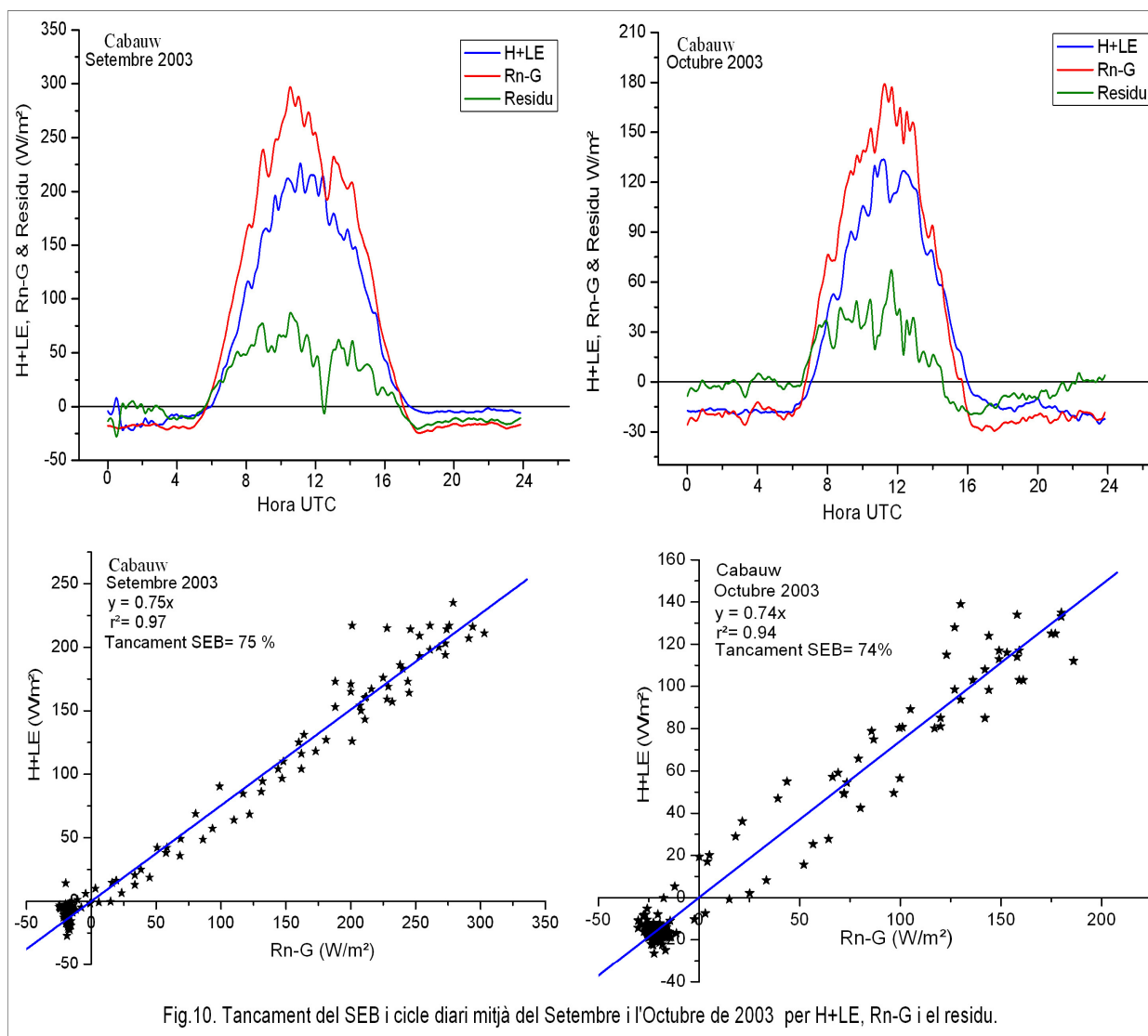


Fig.9. Tancament del SEB i Comparativa del cicle diari mitjà de l'Agost de 2003 i 2004 per H+LE, Rn-G i el residu.

Això explica, perquè el residu presenta un màxim al voltant del migdia que assoleix un valor entorn els $100 W/m^2$. Observant la recta de regressió el major desacord entre l'energia disponible i els fluxos turbulents té lloc de dia, mentre que de nit l'acord és major disminuint el residu.

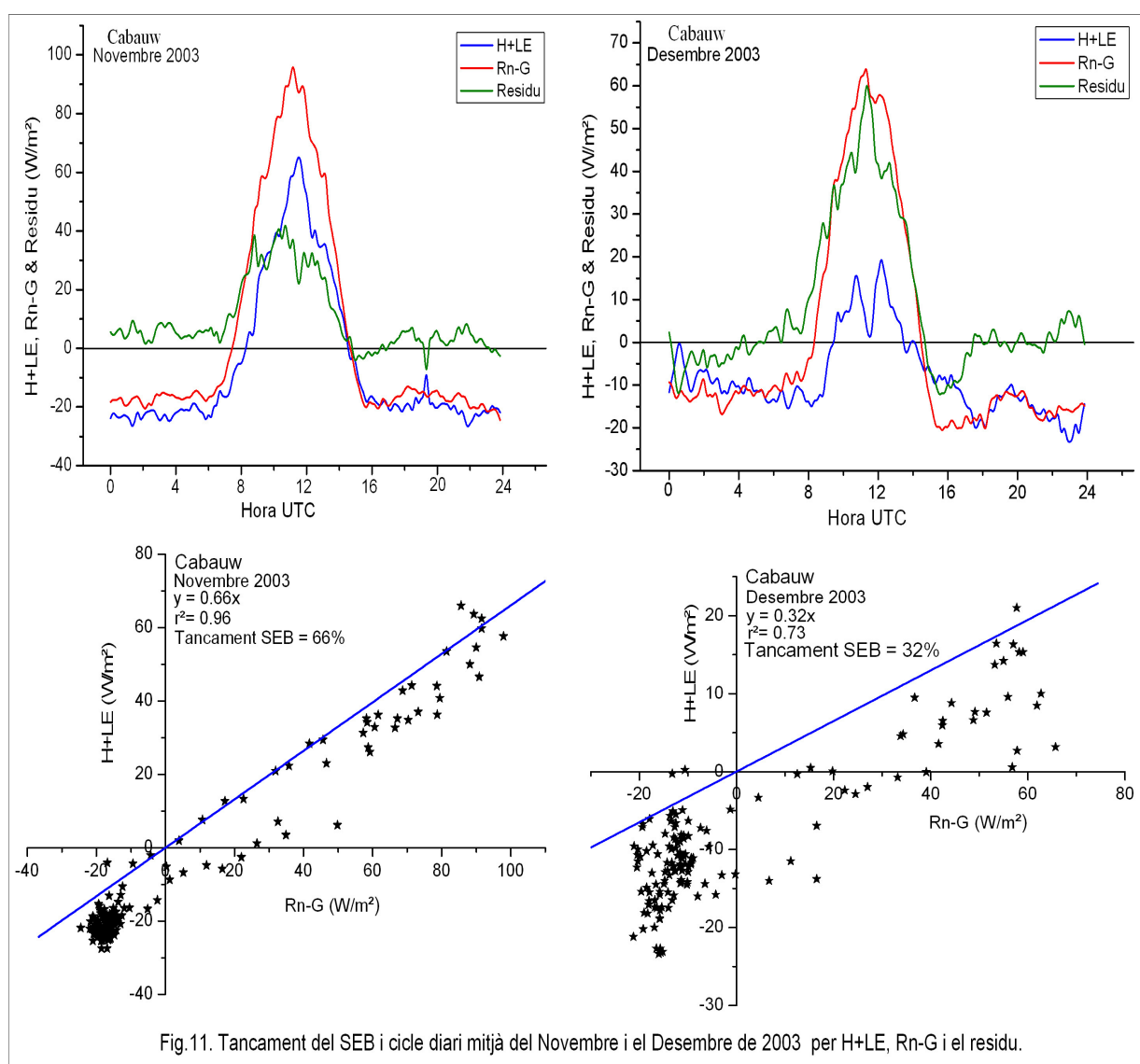
La figura 10 contempla els mesos de Setembre i Octubre de 2003, en la qual s'observa un tancament del balanç energètic molt similar mostrant un tancament del SEB del 75 i 74 % respectivament. El comportament del mes de Setembre és molt similar al de l'Agost del mateix any amb els fluxos turbulents subestimats durant el matí fins a migdia, esdevenint el residu màxim en aquest període i lleugerament inferior als $100 W/m^2$. Destacar el descens del residu poc després de migdia fins aproparse al tancament, fruit del descens brusc de $80 W/m^2$ de l'energia disponible, observable també per la suma dels fluxos turbulents però en menor mesura. En canvi l'octubre presenta un canvi de patró quan a

comportament tant nocturn com diürn. El major refredament radiatiu de la nit i el valor negatiu del flux de calor sensible veure (fig.3), possibiliten tancaments nocturns. Durant el dia els fluxos turbulents assoleixen el màxim poc després de mig matí quan el balanceig entre l'energia disponible i els fluxos turbulents és més propera, observant una disminució puntual del residu. La subestimació dels fluxos turbulents per aquests dos mesos es pot considerar



dins de la normalitat. Els mesos de Novembre i Desembre de 2003 mostren un canvi de tendència en el patró de comportament del tancament del SEB veure figura 11. Concretant el mes de novembre el tancament del SEB en percentatge disminueix respecte dels mesos precedents, situant-se en el 66 %. L'allunyament de la situació ideal de balanç durant aquest mes es deu al poc pes dels fluxos turbulents de calor latent i calor sensible respecte l'energia disponible en hores diürnes, mentre que en hores nocturnes el balanceig és més proper i el tancament s'aconsegueix esporàdicament. Crida l'atenció el comportament del mes de Desembre amb un tancament del SEB que se situa en el 32 % que denota un molt mal balanceig entre l'energia disponible i la suma dels fluxos turbulents. Aquest resultat es deu en part a uns valors molt baixos del flux de calor latent i calor sensible durant el dia (fig.4), la suma dels

quals està lluny dels valors que pren l'energia disponible. El resultat és un residu que durant el dia és equiparable al valor de l'energia disponible, una cota que s'ha de considerar totalment fora de lloc i que és difícilment explicable. Les possibles causes poden ser l'existència d'una subestimació enormement gran dels fluxos turbulents deguda al mètode de Eddy però dubtosa fins arribar a aquestes cotes, també una possible determinació menysvalorada del flux de calor del terra que sobreestimi l'energia disponible o bé una darrera possibilitat podria estar relacionada amb la molt baixa disponibilitat de dades (fig 2). Aquesta darrera opció és poc probable ja que d'altres mesos amb valors similars de dades no disponibles els corresponen tancaments que se situen en el rang considerat normal, tot i així no es pot descartar. A la nit a l'igual que el mes anterior s'observen de manera puntual, petits períodes



en què s'assoleix el tancament total. Com un element més d'informació addicional del mes de desembre a la figura 12 es representen els trets bàsics del comportament diari dels paràmetres meteorològics més importants com són la temperatura, temperatura de rosada i dies de pluja. Destaquen els 16 dies de pluja i el valor de la temperatura de rosada molt pròxim o coincident amb la temperatura, indicant un ambient molt humit i bastant fred, que pot ser una explicació al baix volum de dades disponibles (fig.2). L'evolució del flux de CO_2 també mostra un comportament sense cap anomalia destacable, amb valors

baixos habituals en un mes de desembre i el mínim del cicle diürn figura 13. Una millor conclusió del no tancament del SEB i sobretot d'aquest elevat valor de no tancament es podria obtenir comparant aquest resultat amb l'obtingut durant altres mesos de Desembre d'altres anys, d'aquesta manera es podria concloure si és un fenomen isolat o més aviat habitual.

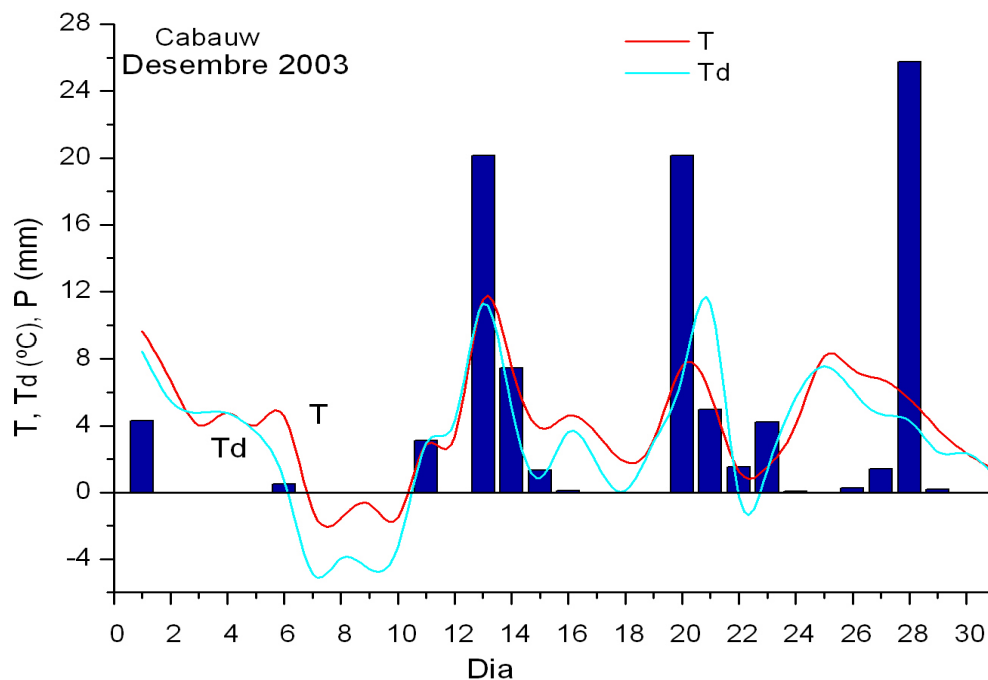


Figura 12. Temperatura (T), Temperatura de rosada (Td) i precipitació diària durant el mes de Desembre de 2003.

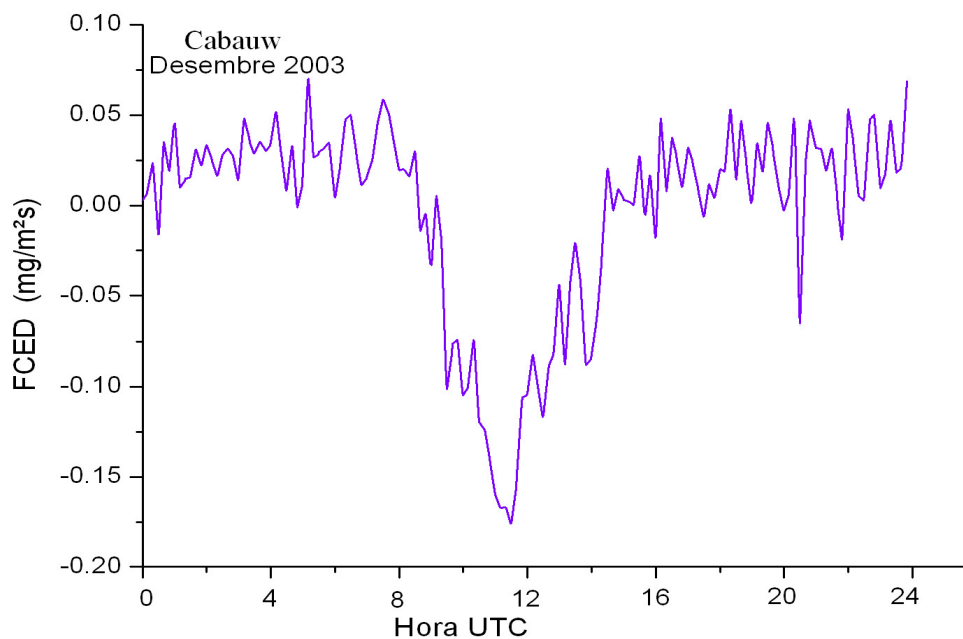


Figura 13. Cicle diari mitjà del flux de CO₂ durant el mes de Desembre de 2003.

El mes de Gener amb un volum de dades aptes disponibles idèntiques a les del mes de Desembre presenta un tancament molt més bo, arribant a una cota de balanceig del 74 % pel cicle mitjà diari del mes, veure figura 14. El comportament de la suma dels fluxos turbulents és molt millor sobretot a partir del migdia, presentant un residu diürn molt petit, comportament que evidencia que per aquest mes, de dia els fluxos turbulents van ser molt poc o gens subestimats fig.14. Interessant observar el pic que presenta la suma dels fluxos turbulents al voltant de les 13 hores assolint valors superiors als de l'energia disponible i implicant un residu molt petit que arriba a prendre valors negatius, un fet poc freqüent de dia. A la nit l'acord entre l'energia disponible i la suma dels fluxos turbulents esdevé major, presentant diverses fases amb tancaments puntuals. En canvi el Febrer el balanceig se situa

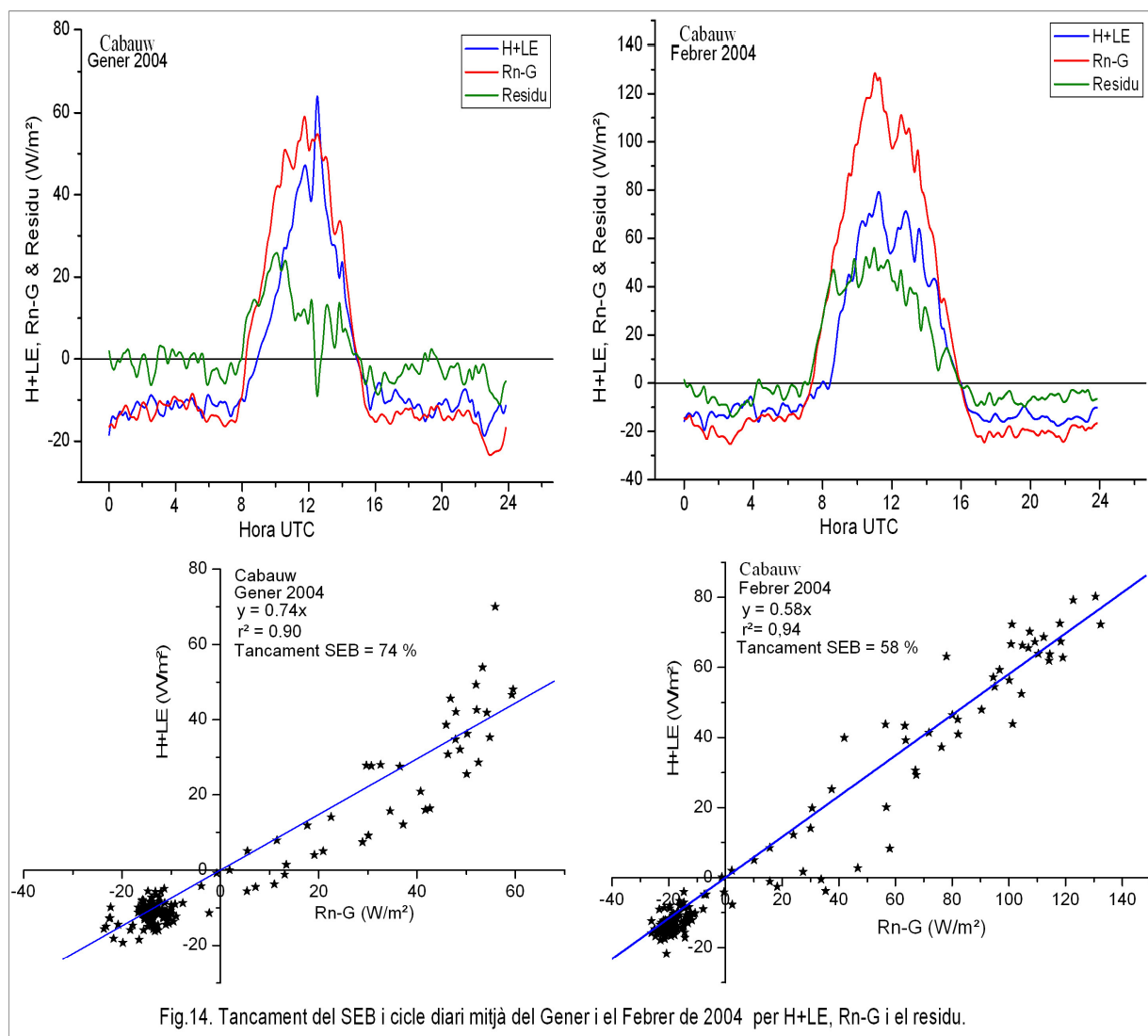
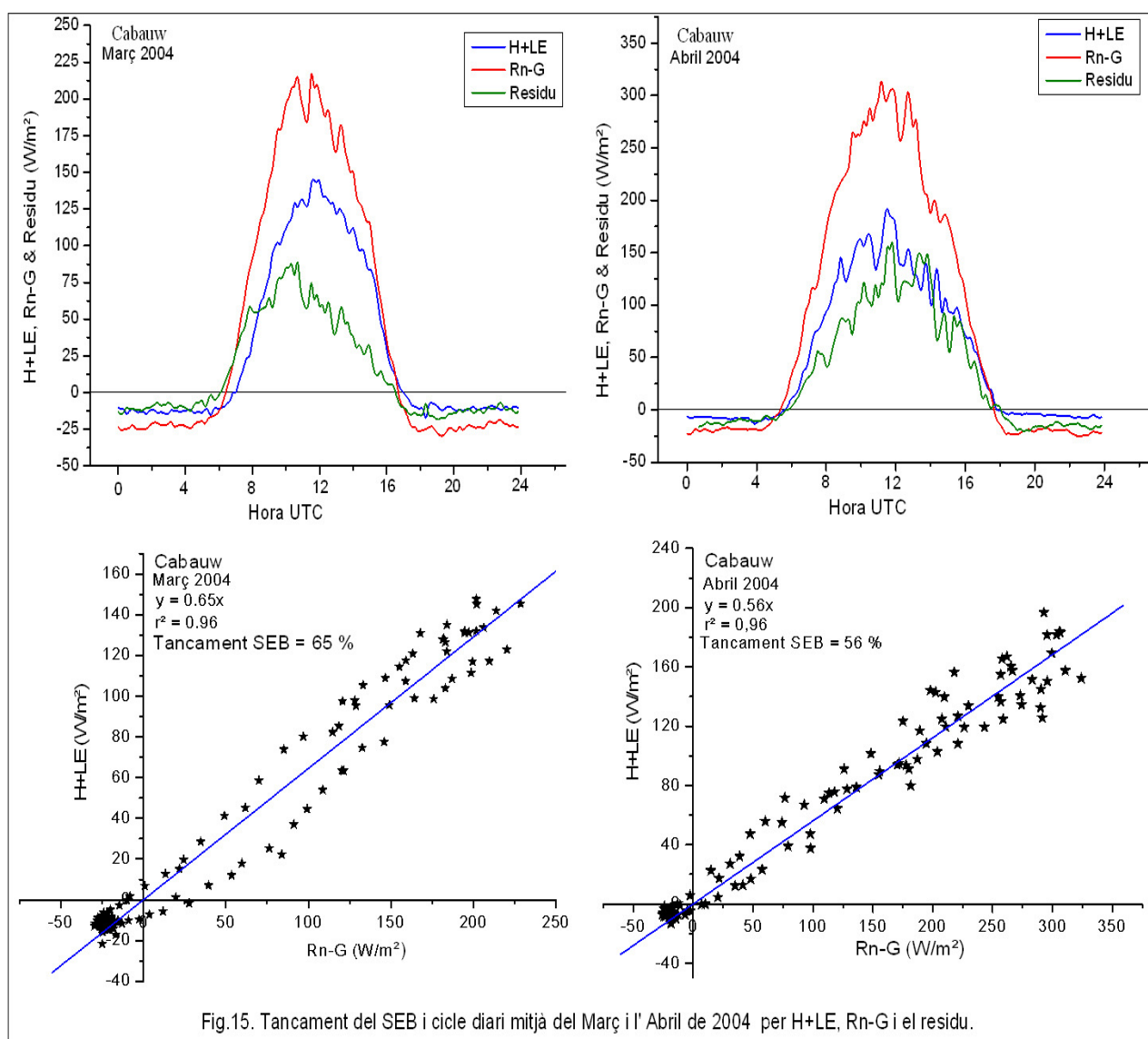


Fig.14. Tancament del SEB i cicle diari mitjà del Gener i el Febrer de 2004 per H+LE, Rn-G i el residu.

en el 58 %, apreciable pel menor acord entre els fluxos turbulents i l'energia disponible. Aquest desacord s'observa a la recta de regressió amb una major dispersió dels punts durant el dia, mentre que a la nit l'acord és més gran no hi ha tanta dispersió i es mostren algunes fases de tancament, tot i ser menors en nombre si es fa la comparació amb les del mes anterior.

Durant els mesos de Març i Abril el major nombre d'hores d'insolació es van fer paleses amb un augment del terme radiatiu net, increment que també s'observa en els valors que pren l'energia

disponible i els fluxos turbulents figura 15. Tot i aquest fet una vegada més es va visualitzar l'efecte de la subestimació dels fluxos turbulents durant les hores diürnes, molt més clar durant el mes d'Abril. Durant aquest darrer mes el tancament del balanç energètic a la superfície es va situar en el 56 % enfront del 65 % del mes de Març que presenta un millor ajust lineal i un residu diürn inferior al del mes d'Abril. Ressaltar també què a diferència dels mesos precedents amb menys hores d'insolació no es produeixen tancaments del balanç energètic en hores nocturnes en cap dels dos mesos.



El cicle diari mitjà dels mesos de Maig i Juny, figura 16, mostra un acord considerable entre l'energia disponible i la suma dels fluxos de calor latent i calor sensible tant de dia com de nit. Aquest acord es manifesta amb uns residus diürns petits i unes rectes de regressió lineal molt ben ajustades amb poca dispersió dels punts, quedant un remament energètic en forma de residu que suposen el 15 i el 18 % del tancament del balanç energètic a la superfície en percentatge respectivament. Igual que en els dos mesos precedents tampoc es produeixen tancaments nocturns del balanç energètic a la superfície. Maig i Juny són els dos mesos de la mostra estudiada amb millor comportament pel que fa al tancament del SEB amb uns valors molt bons.

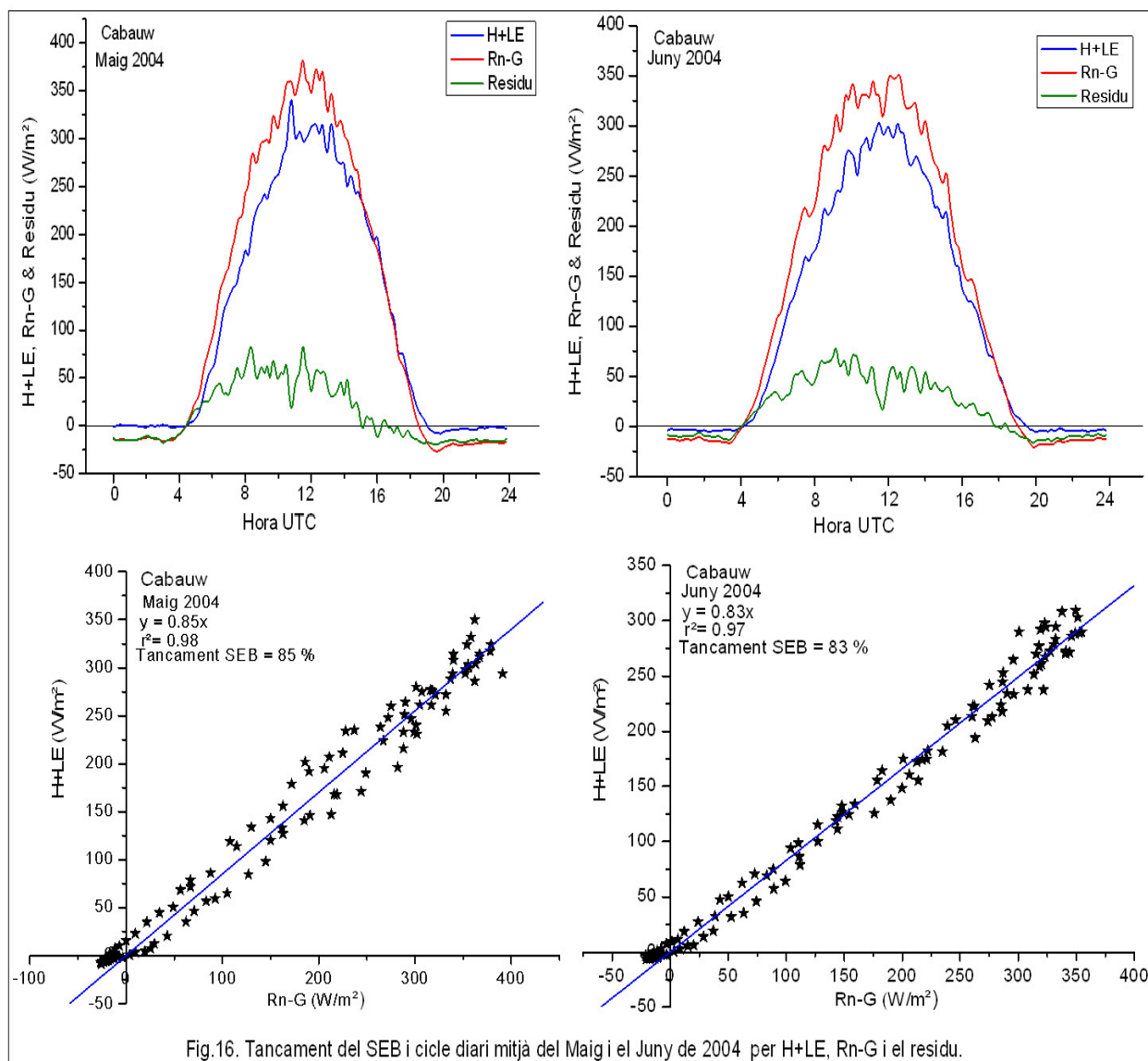


Fig.16. Tancament del SEB i cicle diari mitjà del Maig i el Juny de 2004 per H+LE, Rn-G i el residu.

El darrer mes de la mostra és el mes de Juliol de 2004 i presenta un tancament del SEB, figura 17, que segueix la tònica marcada pels dos mesos precedents amb un balanç raonable del 81 %. Durant les hores diürnes la suma dels fluxos turbulents és molt propera a l'energia disponible i això es tradueix amb un residu petit, mentre que a la nit el residu és molt menor i tampoc es presenten fases de tancament del SEB tal i com succeïa el Juny i el Maig. La recta de regressió lineal posa de manifest, aquest acord entre ambdós termes més bona per valors baixos de l'espectre energètic i més modesta pels valors més grans assolits durant les hores centrals del dia i que acostumen a correspondre amb les subestimacions més importants dels fluxos turbulents de calor latent i calor sensible.

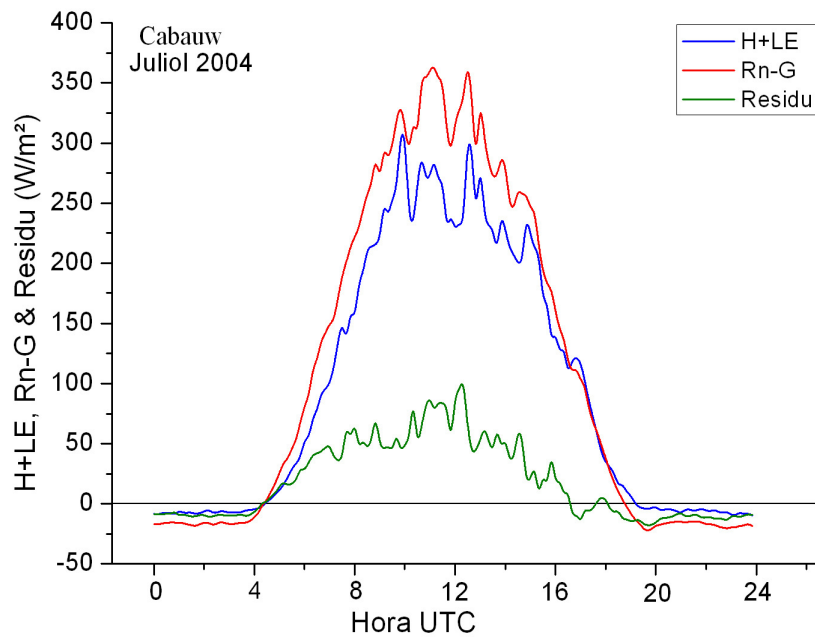


Fig. 17 a) Cicle diari mitjà del mes de Juliol per H+LE, Rn-G i el residu.

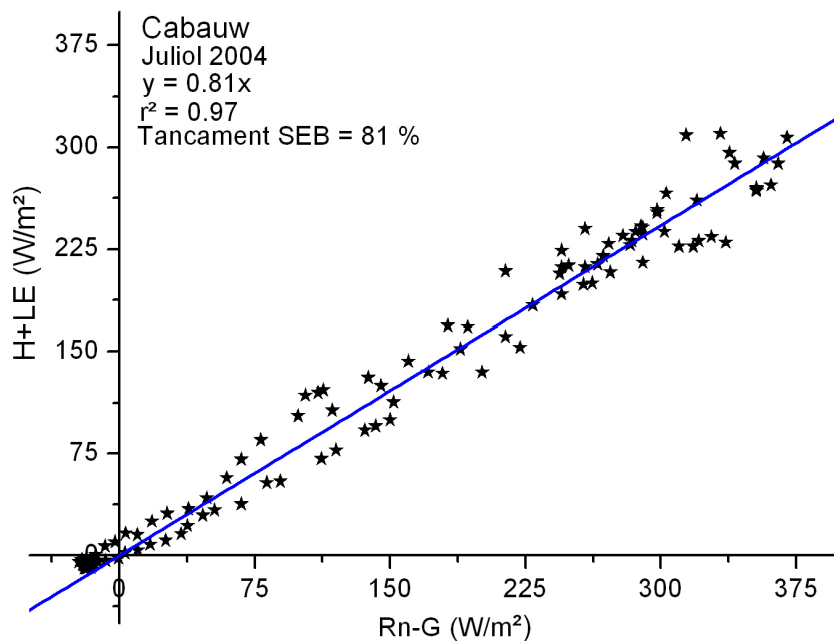


Fig.17 b) Tancament del SEB del mes de Juliol.

Per concloure aquest apartat es presenta un resum global del comportament del percentatge de tancament del balanç energètic a la superfície pel cicle diari mitjà mensual per cadascun dels 13 mesos estudiats, aportant més informació i permetent fer una comparació dels tancaments veure figura 18. S'observa com el final de la primavera i l'estiu és el període amb uns millors tancaments mentre que durant el període hivernal succeeix tot el contrari. El percentatge de tancament del SEB no pot estar

condicionat per l'època de l'any ni l'estació i aquest fet es visualitza amb el mal comportament del mes de Desembre amb un no tancament del SEB del 68 %, seguit d'un no tancament del SEB del 26 % pel mes de Gener. També en el cas de la primavera, l'Abril amb un 44 % de no tancament del SEB precedeix el mes de Maig només amb un 15 % de no tancament del SEB.

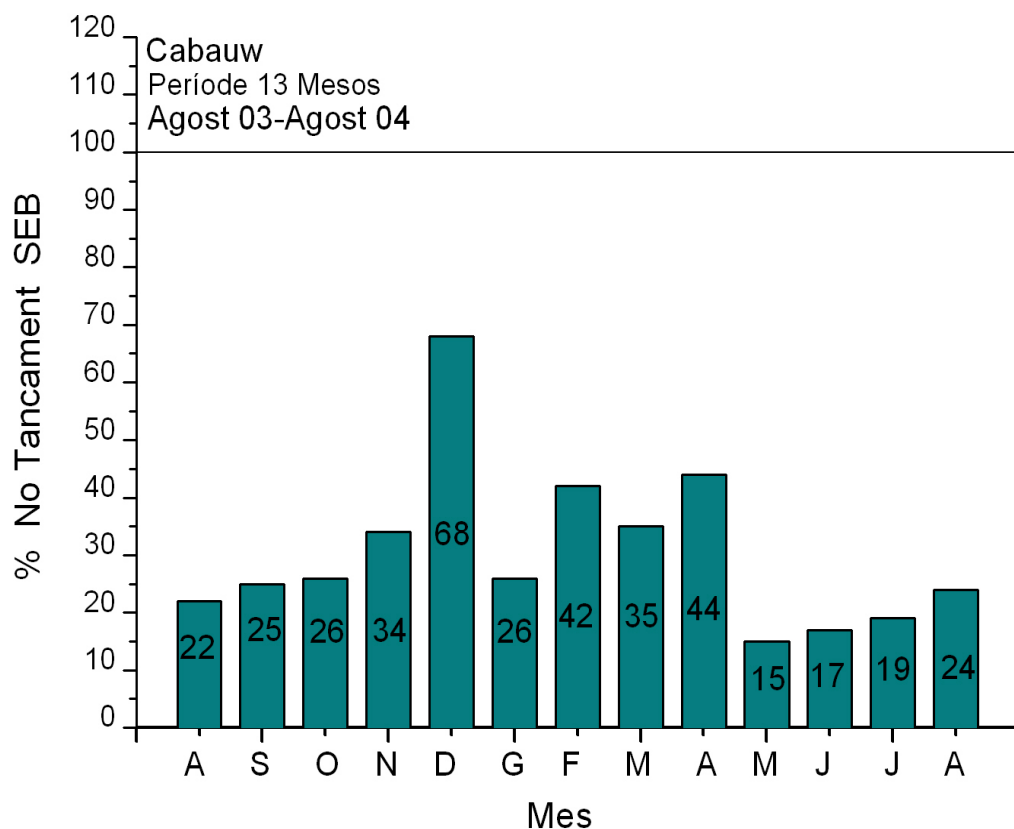


Fig.18. Percentatge de no tancament del SEB pel període comprès entre Agost 03-Agost 04