



Consorzio per la Gestione dell'
OSSERVATORIO AMBIENTALE

PROGETTO

ADEGUAMENTO DEL SISTEMA MODELLISTICO DI PREVISIONE DELLA QUALITÀ
DELL'ARIA DI ARPA LAZIO AL COMPENSORIO DI CIVITAVECCHIA

RELAZIONE FINALE DEL PROGETTO

OTTOBRE 2016

A cura di:

*Stefania Argentini, Simone Bucci, Giampietro Casasanta, Alessandro Conidi, Stefano Federico,
Giangiuseppe Mastrantonio, Igor Petenko*
Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (ISAC/CNR)

PREMESSA

I processi atmosferici in prossimità della costa hanno caratteristiche diverse da quelli osservati in mare aperto e sulla terra a causa della repentina discontinuità della rugosità, della temperatura e della orografia. Questi processi sono poco conosciuti e la loro variabilità è fortemente dipendente, oltre che dai parametri superficiali sopra citati, dalla distanza dalla linea di costa e dalla interazione della circolazione locale con quella a scala sinottica, a sua volta modulata dalla orografia circostante il sito di misura.

Affinché la modellistica numerica per la circolazione atmosferica ed i modelli di diffusione e dispersione degli inquinanti possano rappresentare in maniera adeguata i processi osservati è fondamentale la conoscenza approfondita della meteorologia costiera e la disponibilità di un set di misure da utilizzare in input a questi modelli.

In questo rapporto mostriamo le serie temporali e la statistica dei principali parametri meteorologici a partire da novembre 2015 e per l'anno 2016 fino al mese di agosto.

1. INTRODUZIONE

Lo studio osservativo della meteorologia e micro-meteorologia della regione costiera presso il Laboratorio Atmosferico **CO**stiero presso le Saline di Tarquinia (LACOST) in prossimità di Civitavecchia costituisce l'oggetto di questa convenzione. A tal fine le misurazioni meteorologiche e micrometeorologiche iniziate nel 2015 sono proseguite nel 2016. Il LACOST è attivo H24 dal mese di maggio 2015, le interruzioni presenti nei dati sono dovute ad eventuali interruzioni della erogazione di energia elettrica o al malfunzionamento del data logger. I risultati presentati in questa relazione si riferiscono al periodo novembre 2015- agosto 2016.

La relazione segue lo schema seguente:

- descrizione del LACOST;
- descrizione delle misure *in situ* e di remote sensing;
- serie temporali delle principali grandezze micrometeorologiche;
- serie temporali delle componenti radiative (onda lunga e corta);
- andamento diurno stagionale a varie quote della intensità e della direzione del vento;
- andamento stagionale della intensità e della direzione del vento con la quota;
- statistica stagionale dei principali parametri meteorologici;
- andamento dell'altezza dello strato rimescolato in funzione dei principali parametri micrometeorologici;
- sommario e conclusioni.

2. Il Laboratorio Atmosferico **CO**stiero Saline di Tarquinia (LACOST)

Per parametrizzare in maniera dettagliata i processi meteo e micro-meteorologici di una regione è necessario conoscere la climatologia statistica dei diversi parametri caratteristici.

Con LACOST abbiamo monitorato in maniera continuativa i processi meteo e micro-meteorologici nella zona di confine tra il mare e la superficie terrestre, con particolare attenzione allo sviluppo temporale e spaziale della circolazione nella bassa atmosfera e alle condizioni dispersive dell'atmosfera, attraverso la misura dei seguenti parametri:

- struttura verticale della turbolenza termica dell'atmosfera;
- campo tridimensionale della velocità del vento;
- altezza dello strato rimescolato;
- turbolenza atmosferica (grandezze micrometeorologiche: flussi di calore e di momento, temperatura, velocità etc.);
- radiazione ad onda corta e lunga (bilancio radiativo).

Il LACOST è situato sul litorale laziale in prossimità della Riserva Naturale Statale di Popolamento animale delle Saline di Tarquinia (42°12'14" E, 11°43'22" N, Figura 1) in prossimità del mar Tirreno. Le Saline sono costituite da vasche di acqua salata di profondità variabile da 0.1-1.0 m soggette a forte riscaldamento dell'acqua, e nei mesi estivi ad elevata evaporazione. Le vasche sono separate dal mare da una duna costiera, e da un fosso drenante dai terreni circostanti. La centrale ENEL di Torrevaldaliga Nord a Civitavecchia, e la zona portuale di Civitavecchia si trovano circa 10 Km in linea d'aria (Figura 2). Circa 90 km a sud-est si trova la città di Roma.



Figura 1. La riserva naturale delle Saline di Tarquinia

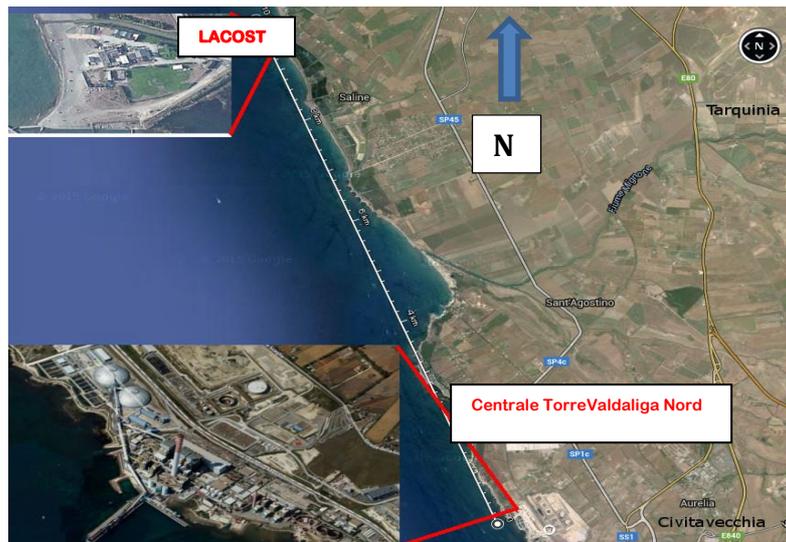


Figura 2. Litorale marino nel tratto di costa tra Civitavecchia e le Saline di Tarquinia. A nord (N) il sito del LACOST. A sud la centrale di Torrevaldaliga Nord a Civitavecchia.

LACOST utilizza strumentazione per il remote sensing da terra (SODAR- SOund Detection And Ranging) ed il monitoraggio della turbolenza e radiazione atmosferica (stazione MICROMETEOROLOGICA).

In Figura 3 è mostrato il SODAR Doppler triassiale utilizzato nel LACOST. Il SODAR è un telesensore di tipo attivo che utilizza le onde acustiche per il monitoraggio dell'atmosfera. Il segnale misurato consiste in echi prodotti dalla interazione delle onde acustiche con l'atmosfera nei primi 500-1000 metri. Nella configurazione utilizzata (monostatica) la causa prevalente degli echi retro-diffusi è la fluttuazione della temperatura sulla scala della mezza lunghezza d'onda utilizzata dallo strumento. L'eco ricevuto dopo l'emissione del tono acustico viene registrato come una traccia verticale la cui gradazione di nero (o di colore) è proporzionale all'intensità dell'eco mentre l'altezza di ogni punto sulla traccia indica la quota da cui proviene (*ecogramma* o *facsimile*). Registrando gli echi retrodiffusi in maniera sequenziale, si ha una rappresentazione "pittorica" della evoluzione della *struttura termica* dello strato limite atmosferico.

In Figura 4 è mostrata la corrispondenza canale (antenna) - asse coordinato (x, y, z) - frequenza di emissione. Il sistema di acquisizione del SODAR è stato sviluppato su piattaforma LabWindows/CVI dall'ISAC-CNR sezione di Roma.



Figura 3. SODAR Doppler triassiale. In primo piano piranometri e pirgeometri



Figura 4. Antenne SODAR con la corrispondenza frequenza-canale- asse.

In Figura 5 è mostrata la stazione MICROMETEOROLOGICA costituita dalla seguente strumentazione:

- anemometro ultrasonico triassiale USA1 – Metek Scientific (<http://metek.de>) , posto ad una altezza di 5 m (a.g.l);
- stazione radiometrica Kipp & Zonen ;
- termo-igrometro Vaisala;
- barometro Vaisala;
- pluviometro LASTEM.

I dati della stazione MICROMETEOROLOGICA, acquisiti con un datalogger Campbell - CR3000, vengono trasmessi tramite linea RS232 ad un computer posto in uno shelter a qualche decina di metri dalla strumentazione.

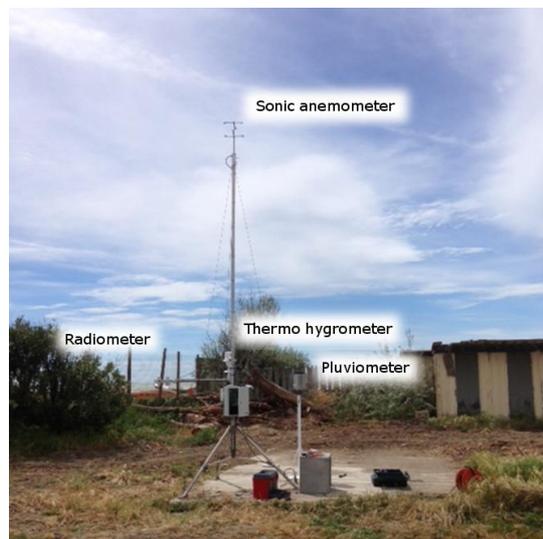


Figura 5. Stazione MICROMETEOROLOGICA

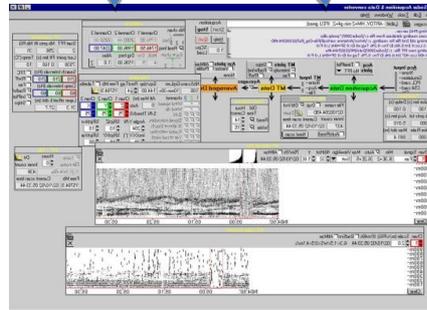
I dati acquisiti dal SODAR e dalla stazione MICROMETEOROLOGICA vengono trasmessi al server dell'ISAC-CNR per l'elaborazione con software sviluppato ad hoc, e quindi resi disponibili in rete sul sito <http://lacost.artov.isac.cnr.it/>. Alle ore 0900 LST di ogni giorno viene prodotto in maniera automatica un bollettino che riporta le principali grandezze misurate, e le carte del tempo a scala sinottica prese dai siti disponibili in rete.



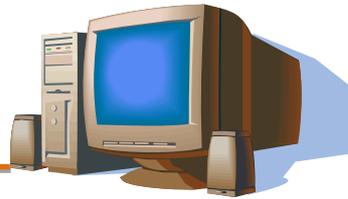
SODAR



Stazione micrometeo



PC saline di



ISAC-CNR



Bollettino



Sito web

Figura 6. Diagramma a blocchi che riassume il funzionamento di LACOST.

<http://lacost.artov.isac.cnr.it/>

In Figura 7 è mostrato l'indice del bollettino. In "archivio bollettini" sono riportati i bollettini dei giorni precedenti.

Sommario	
1 Obiettivo del bollettino	3
2 Situazione meteorologica	4
2.1 Situazione sinottica	6
2.2 Copertura nuvolosa a grande scala	7
2.3 Campi di vento	8
2.4 Precipitazioni a grande scala	13
2.5 Distribuzione della temperatura e mixing ratio del vapore acqueo a grande scala (ISAC-CNR)	14
2.6 La mappa di pressione slm e campo di vento a 925 hPa (750 m)	17
2.7 La mappa di geopotenziale e campo di vento a 500 hPa sull'Italia	20
3 Monitoraggio della situazione micrometeorologica	22
3.1 L' anemometro sonico	22
3.2 Velocità e direzione del vento	23
3.3 Umidità e precipitazioni	23
3.4 Pressione e pressione al suolo e temperatura	24
3.5 Energia cinetica turbolenta e flusso di calore sensibile	24
3.6 Il flusso di momento e la varianza della velocità verticale del vento	25
3.7 Lunghezza di Monin-Obukhov e coefficiente di struttura della temperatura	25
4 Il bilancio radiativo	26
4.1 Il radiometro	26
4.2 Radiazione visibile ad onda corta (solare)	27
4.3 Radiazione infrarossa ad onda lunga (infrarossa)	27
4.4 Radiazione netta ed albedo	28

Figura 7. Indice del bollettino giornaliero del LACOST

Misurazioni disponibili in quasi-real time sul sito del LACOST:

Sistema SODAR (range di indagine 20-800 m)

Grafici disponibili sul sito e sul bollettino del LACOST per una consultazione immediata:

- struttura termica dell'atmosfera *ecogramma/facsimile* (vedi esempio in Figura 8),
- profili orari della velocità e direzione del vento (vedi esempio in Figura 9),
- profili orari della varianza della velocità verticale del vento (vedi esempio in Figura 10),
- campo del vento orizzontale (vedi esempio in Figura 11).

Le Figure 8-11 mostrano un esempio dei grafici riportati nel bollettino del giorno 10/03/2016. Il principio di funzionamento del SODAR ed il significato delle grandezze fisiche mostrate nei grafici è riportato sul sito lacost.artov.isac.cnr.it.

Stazione MICROMETEOROLOGICA e di radiazione

Grafici disponibili sul sito e sul bollettino del LACOST per una consultazione immediata:

- velocità e direzione del vento,
- flussi turbolenti di calore e di momento,
- energia cinetica turbolenta,
- radiazione atmosferica ad onda corta (visibile) down (trasmessa dall'atmosfera) e up (riflessa dal terreno),
- radiazione atmosferica ad onda lunga (infrarossa) down (diffusa dall'atmosfera) e up (emessa dal terreno),
- precipitazione,
- umidità relativa,
- temperatura,
- pressione atmosferica.
-

I dati in formato ascii sono disponibili nella sezione "Documenti Dati" con password di accesso.

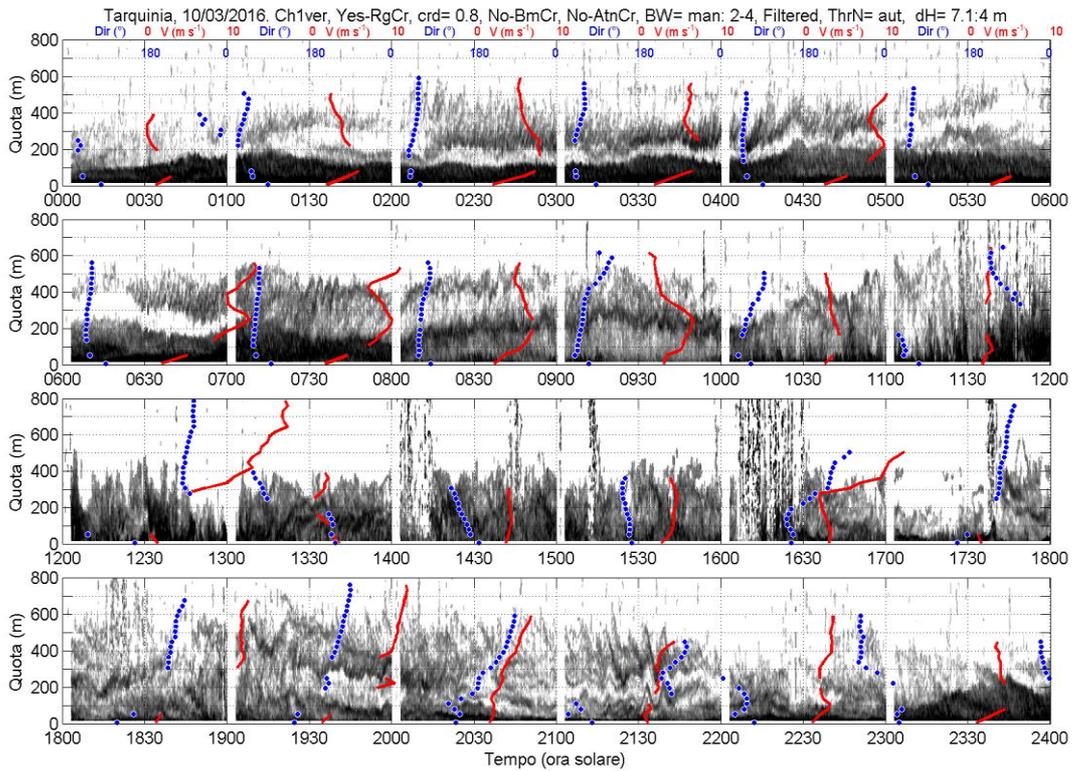


Figura 8. Struttura termica dell'atmosfera per il giorno 10 marzo 2016

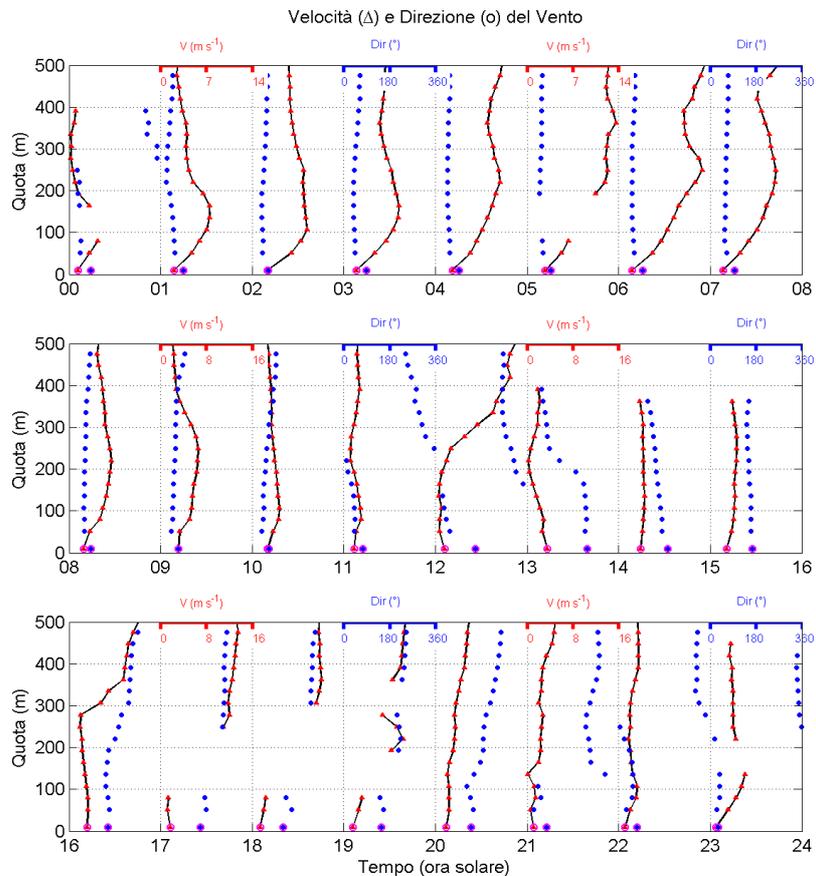


Figura 9. Profili orari della velocità (punti rossi con linea nera) e della direzione del vento (punti blu) per il giorno 10 marzo 2016. Al suolo (in magenta) le misurazioni dell'anemometro sonico.

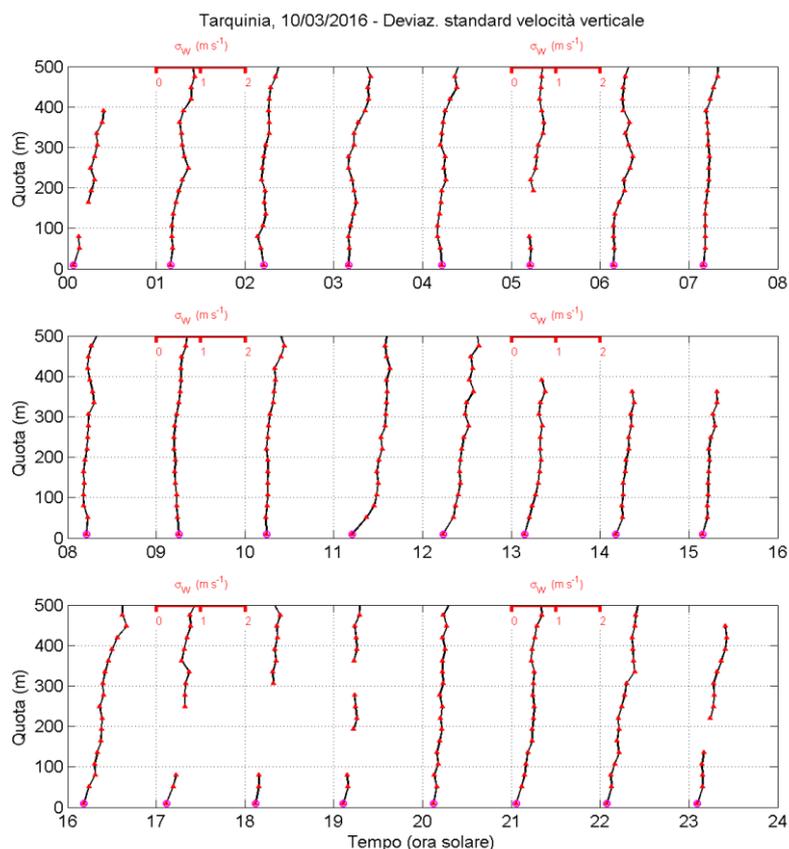


Figura 10. Profili orari della varianza della velocità verticale del vento per il giorno 10 marzo 2016. Al suolo (in magenta) le misurazioni dell' anemometro sonico.

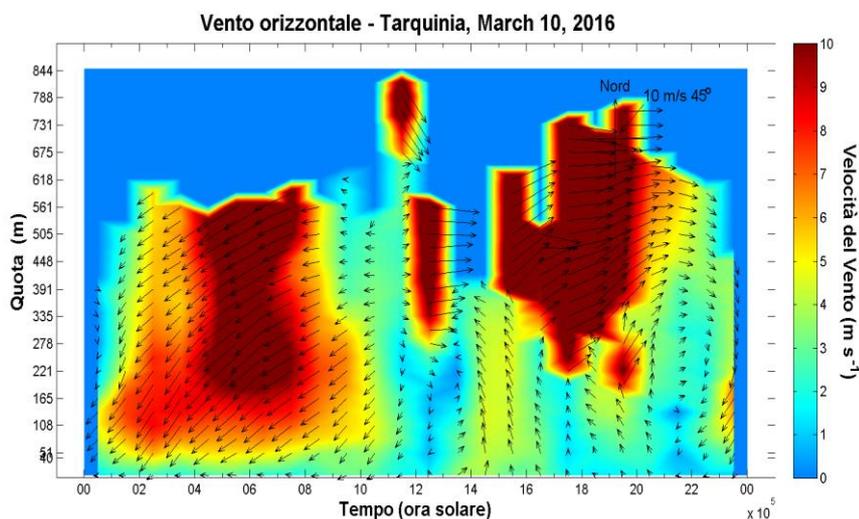


Figura 11. Campo del vento orizzontale per il giorno 10 marzo 2016.

3. MISURE IN SITU E DI REMOTE SENSING

Nei paragrafi 3.1 e 3.2 sono riportate, per ogni mese, le serie temporali delle grandezze micrometeorologiche da novembre 2015 ad agosto 2016 (Figure 12-21) e le componenti radiative visibile ed infrarosso (Figure 22-31). Nel paragrafo 3.3 sono riportati i grafici stagionali della distribuzione giornaliera della velocità e della direzione del vento con la quota (5 m, 80 m, 136 m, 193 m) misurati dall' anemometro sonico a 5 m e dal SODAR alle altre quote (Figure 32-34), e l' andamento stagionale con l' altitudine della velocità e della direzione del vento (Figure 35-37).

3.1 MISURE *in situ* MICROMETEOROLOGICHE

Le Figure 12-21 mostrano per ogni mese del periodo novembre 2015 agosto 2016 i valori orari per: (a) velocità (blu) e direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

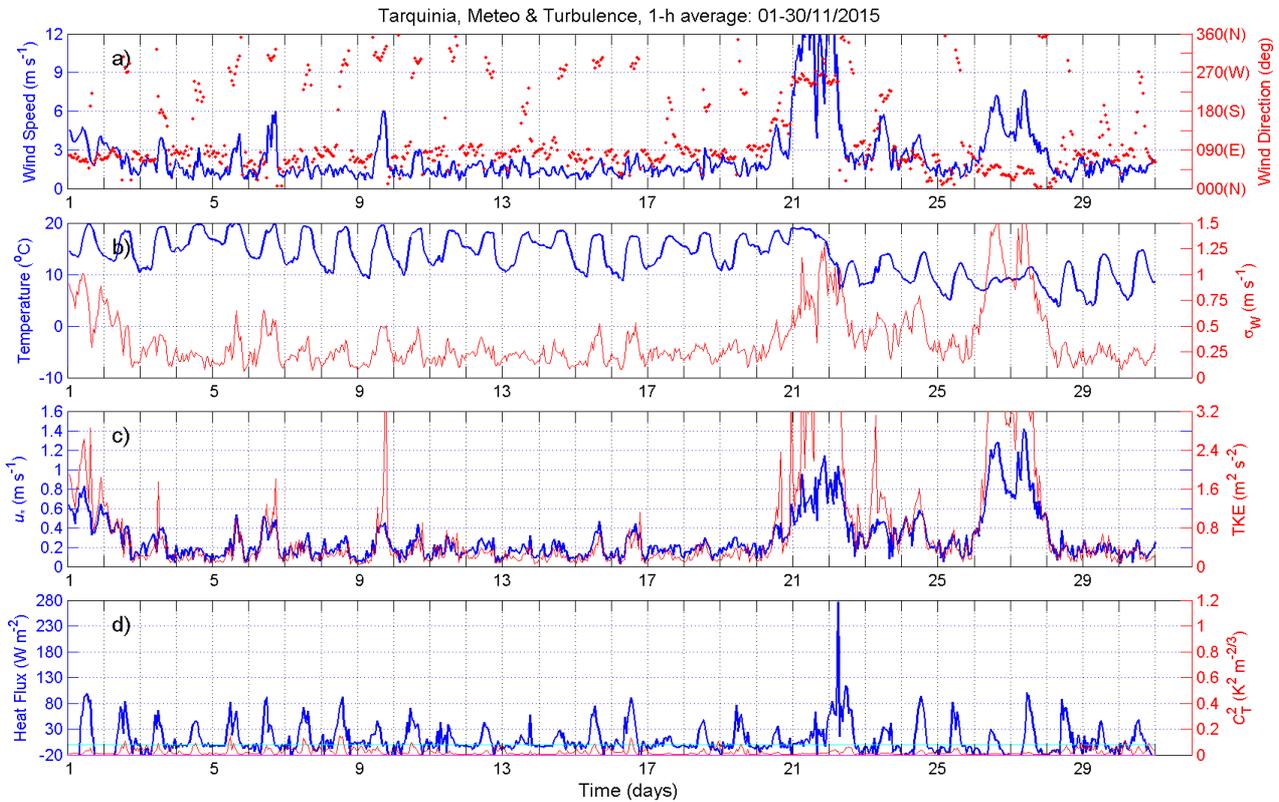


Figura 12. NOVEMBRE : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

NOVEMBRE 2015

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento è per l'intero mese molto bassa ad eccezione dei giorni 9, 21-22 e 26-27. Le velocità più basse sono osservate di notte in presenza di venti da est (brezza di terra). Quelle più intense (6 e 12 m s^{-1}) si hanno invece per venti da ovest (W) e nord-ovest.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento: la temperatura generalmente varia tra 10°C (di notte) e 20°C (di giorno) con valori più bassi nei giorni 22-30. La varianza della velocità verticale del vento, una grandezza che tiene conto delle capacità di rimescolamento atmosferico lungo la verticale, ha un picco in corrispondenza del massimo di temperatura e generalmente ne segue l'andamento. I valori della varianza variano tra $0.1 - 0.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ con picchi di $1.5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$.

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa: la velocità di attrito, strettamente correlata ai valori assunti dalla velocità del vento, varia tra $0.1 - 0.8 \text{ m s}^{-1}$. L'energia cinetica turbolenta è una misura diretta dell'intensità delle fluttuazioni del vento nelle tre direzioni u, v, w (il motore che tiene in vita la turbolenza in atmosfera), $\text{TKE} = \frac{1}{2} (u'^2 + v'^2 + w'^2)$, dove le grandezze u', v', w' sono le fluttuazioni della velocità del vento verso est (u), verso nord (v), lungo la verticale (w). La TKE varia tra $0.4 - 3.2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ ed ha il valore massimo in corrispondenza dei picchi della velocità del vento.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura: il flusso di calore sensibile ha valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco che variano tra $30 - 80 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura (C_T^2) è calcolato utilizzando l'ipotesi di Taylor del congelamento della turbolenza, considerando le misure a due istanti successivi. I valori per questa variabile hanno picchi che variano tra $0.01 - 0.1 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

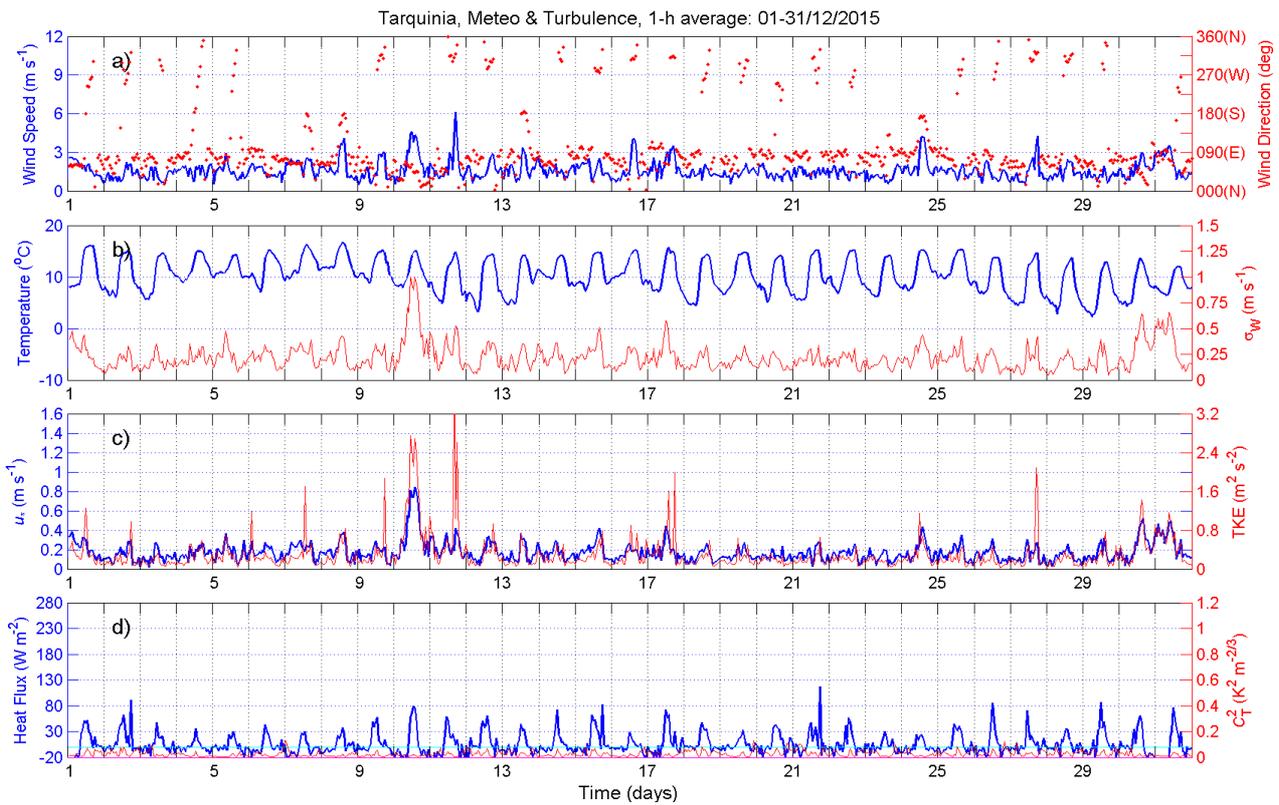


Figura 13. DICEMBRE : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

DICEMBRE 2015

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento per l'intero mese non supera generalmente i 3 m s^{-1} . Il minimo della velocità (circa minore di 1.5 m s^{-1}) è osservato durante le ore notturne. La direzione del vento è generalmente tra $0-90^\circ$.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura varia tra 5°C (di notte) e 17°C (di giorno). La varianza della velocità verticale del vento oscilla tra 0.1 m s^{-1} e 0.5 m s^{-1} con un picco di 1 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): assumono entrambe valori massimi in corrispondenza di quelli della velocità del vento, come aspettato, ed hanno un picco pronunciato il giorno 10.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco che variano tra $30-80 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura varia tra $0.01-0.1 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

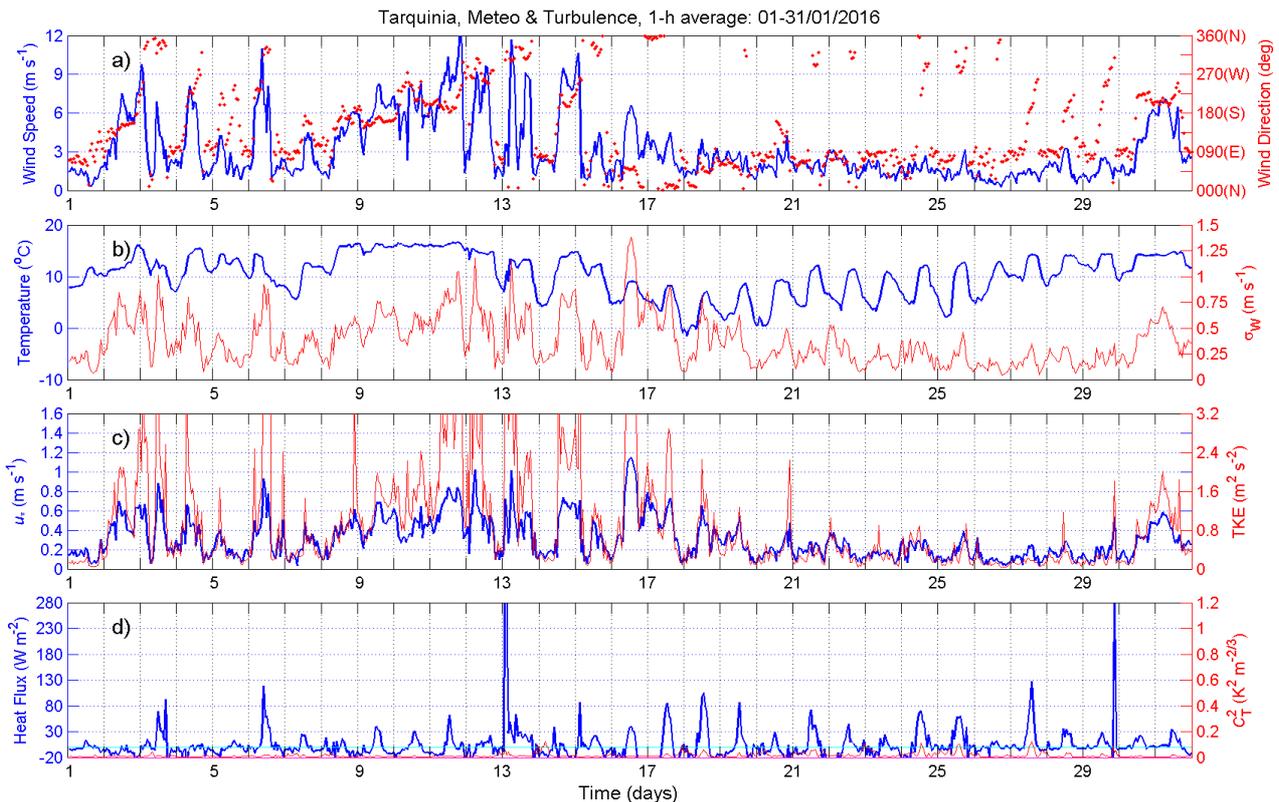


Figura 14. GENNAIO: (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

GENNAIO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità massima del vento varia tra $3.0 - 12 \text{ m s}^{-1}$. Il minimo della velocità è osservato durante le ore notturne. I valori massimi si hanno in presenza della brezza di mare, anche quando interagisce con la circolazione a scala sinottica. Il mese è diviso in un periodo (1-17 gennaio) caratterizzato da valori di picco della velocità del vento che raggiungono 12 m s^{-1} (direzione $180^\circ\text{-}270^\circ$) ed un periodo (18-30 gennaio) caratterizzato da venti con velocità inferiori a 3 m s^{-1} provenienti dal settore $0\text{-}90^\circ$.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): nel periodo 1-17 gennaio la temperatura ha valori superiori a 10° C e non mostra un andamento giornaliero molto marcato. Nella restante parte del mese (18-30 gennaio) assume valori che generalmente non superano 10° C . Nel periodo 1-17 gennaio la varianza della velocità verticale del vento ha valori elevati, che raggiungono 1.5 m s^{-1} , mentre in quello 17-30 gennaio la varianza della velocità verticale del vento non supera 0.5 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): entrambe le grandezze hanno un andamento che vede i valori della prima metà del mese (1-17 gennaio) superiori a quelli della seconda metà del mese (18-30 gennaio).

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile ha valori generalmente inferiori a 30 W m^{-2} e non mostra un andamento giornaliero marcato nel periodo 1-17 gennaio. Nel periodo 18-30 gennaio il flusso di calore sensibile è generalmente superiore a 30 W m^{-2} , talvolta anche 80 W m^{-2} ed ha un andamento giornaliero. Il parametro di struttura per la temperatura mostra picchi che variano tra $0.01\text{-}0.2 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

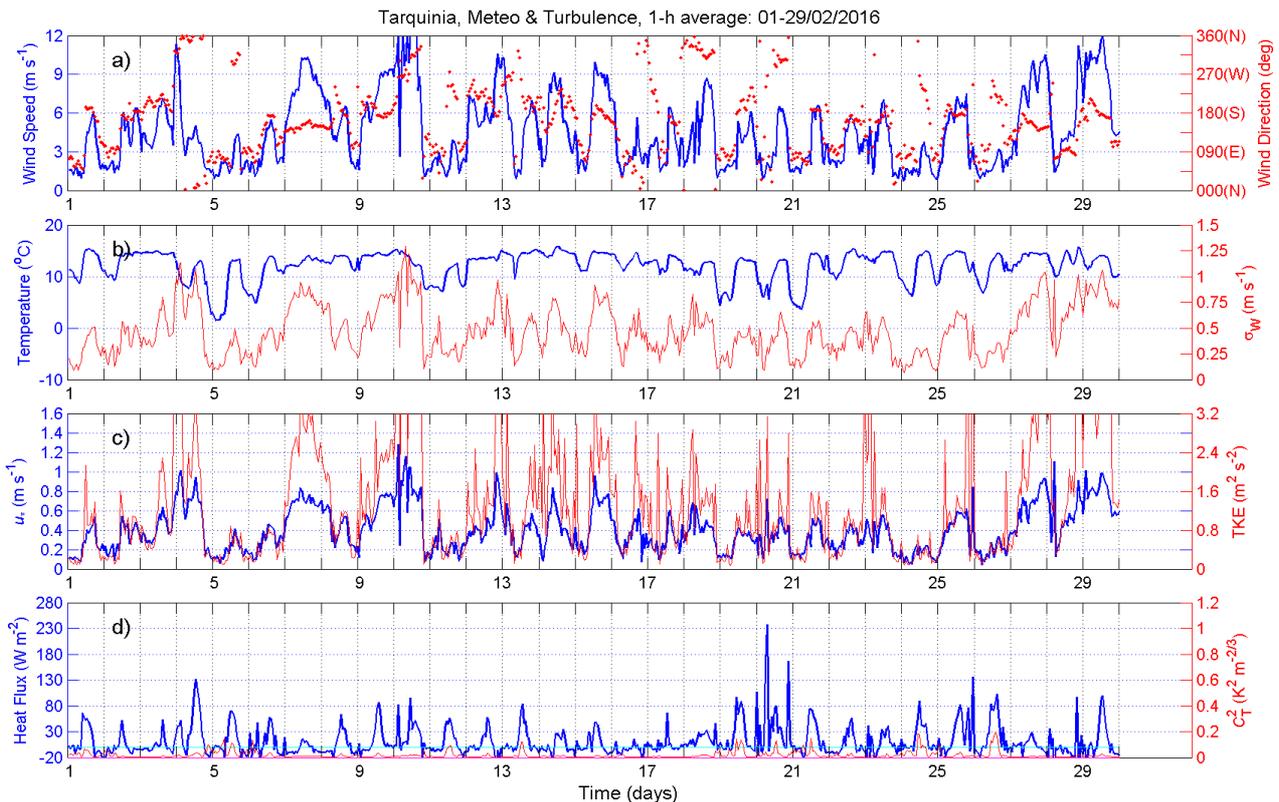


Figura 15. FEBBRAIO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

FEBBRAIO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento varia generalmente tra 1.5 m s^{-1} e 12 m s^{-1} . Il minimo della velocità (anche $< 1.5 \text{ m s}^{-1}$) è osservato durante le ore notturne. La velocità non ha un andamento giornaliero regolare soprattutto nella prima parte del mese sebbene i picchi siano generalmente osservati nelle ore diurne. L'assenza di regolarità nel picco della velocità del vento è da attribuirsi alle oscillazioni della direzione tra $90\text{-}360^\circ$ a seconda delle ore del giorno. Queste oscillazioni sono dovute ad un periodo di elevata variabilità meteorologica.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura varia tra $2\text{-}12^\circ\text{C}$ ma non mostra un definito andamento giornaliero per effetto della sopracitata variabilità meteorologica. La varianza della velocità verticale del vento ha valori che oscillano tra 0.1 m s^{-1} e 0.5 m s^{-1} , con picchi che possono raggiungere 1 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi tra $30\text{-}80 \text{ W m}^{-2}$ nei giorni 20 e 21 febbraio supera 80 W m^{-2} . Il parametro di struttura per la temperatura è generalmente inferiore a $0.2 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

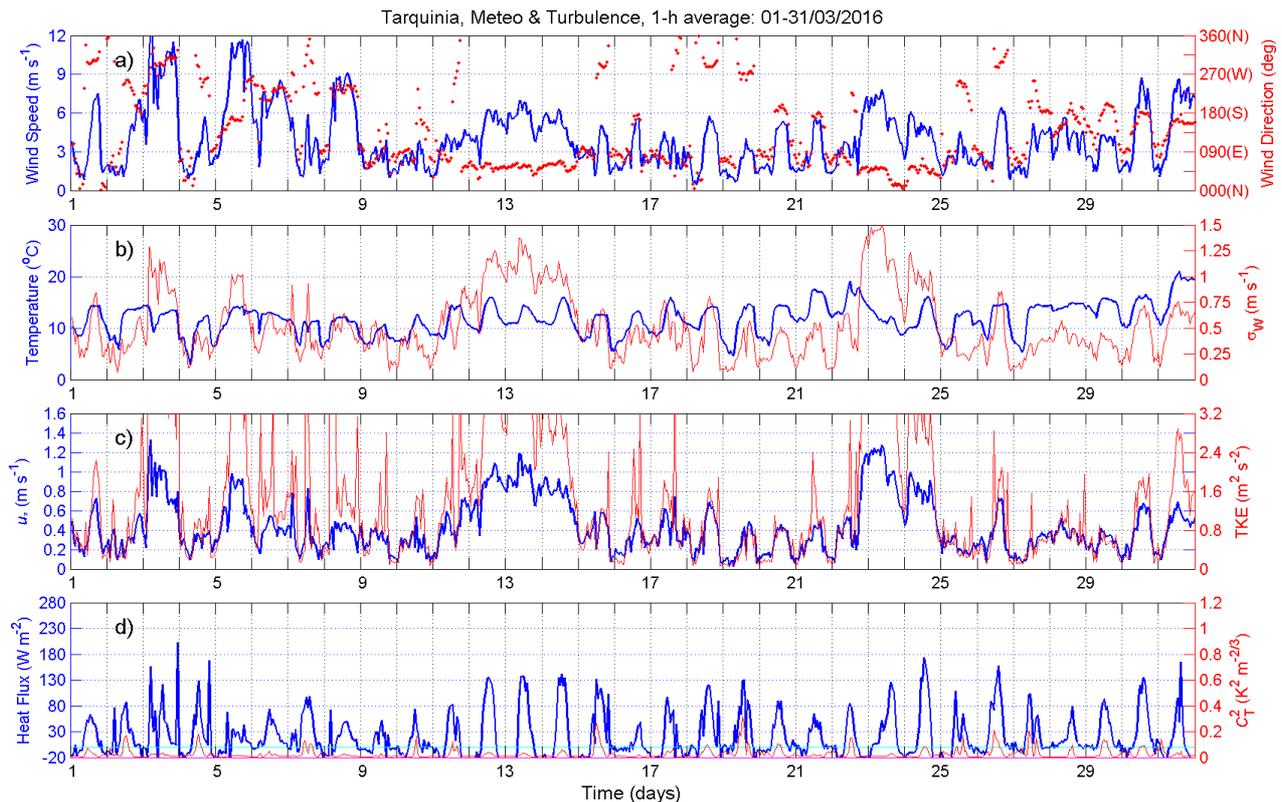


Figura 16. MARZO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

MARZO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento varia generalmente tra 1.5 m s^{-1} e 12 m s^{-1} . In questo mese è evidente come l'intensità del vento sia legata alla direzione del vento (giorni 3, 8, 16). Le velocità del vento più basse sono associate alla brezza di terra con venti provenienti da est (90°), quelle più elevate a venti provenienti da ovest (270°).

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura generalmente oscilla tra 5°C (di notte) e 15°C (di giorno). La varianza della velocità verticale del vento oscilla tra 0.25 m s^{-1} ed 1.5 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco che variano tra -20 e 180 W m^{-2} . Il parametro di struttura per la temperatura mostra picchi che possono raggiungere $0.2 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

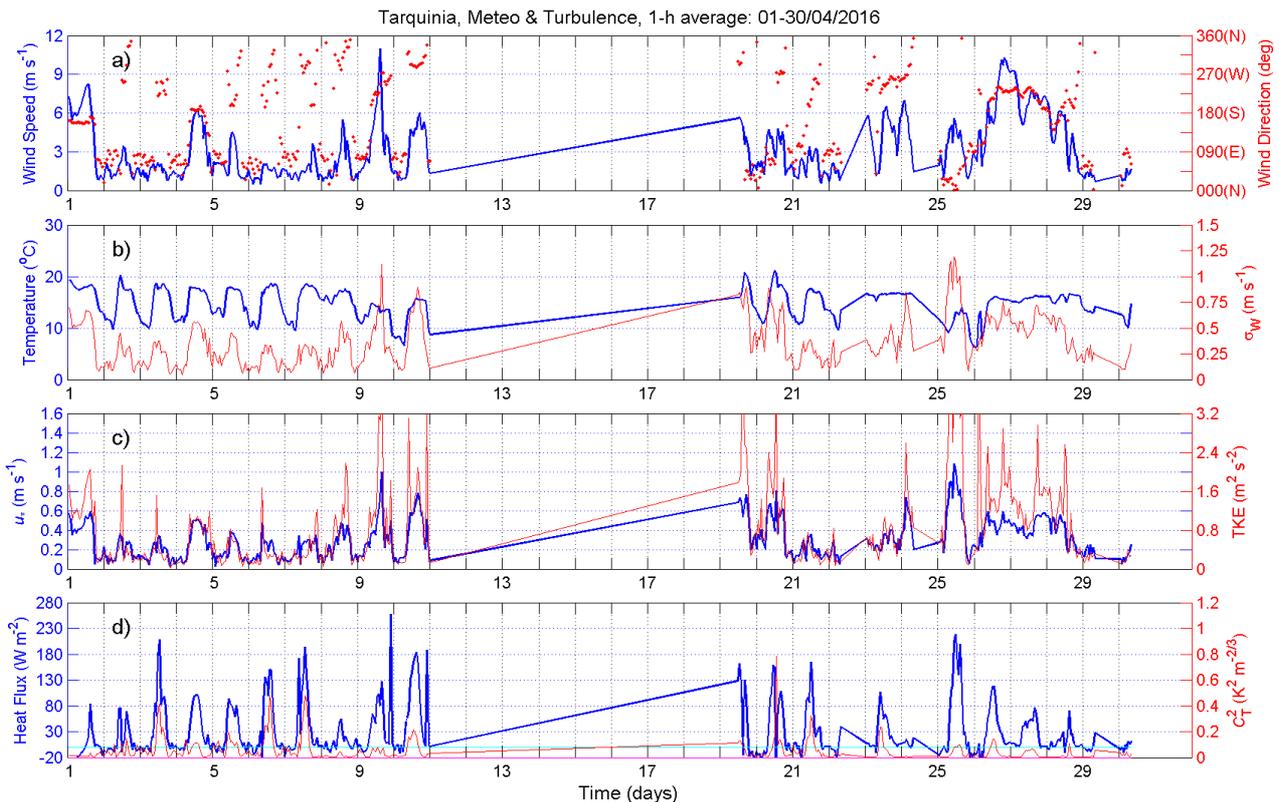


Figura 17. APRILE : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

APRILE 2016.

Interruzione dal 12 al 20 per un problema al data logger.

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento si attesta generalmente al di sotto dei 6 m s^{-1} , con direzione prevalente da est di notte e da ovest di giorno. Al variare della direzione del vento varia anche la sua intensità (vedi giorni 26, 27, 28). Per i giorni durante i quali la velocità del vento è bassa è evidenziato un andamento giorno-notte.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura oscilla tra 10°C (di notte) e 20°C (di giorno). La varianza della velocità verticale del vento oscilla tra 0.1 m s^{-1} ed 1.0 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco che variano tra $80 - 180 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura mostra valori di picco che variano tra $0.1 - 0.4 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

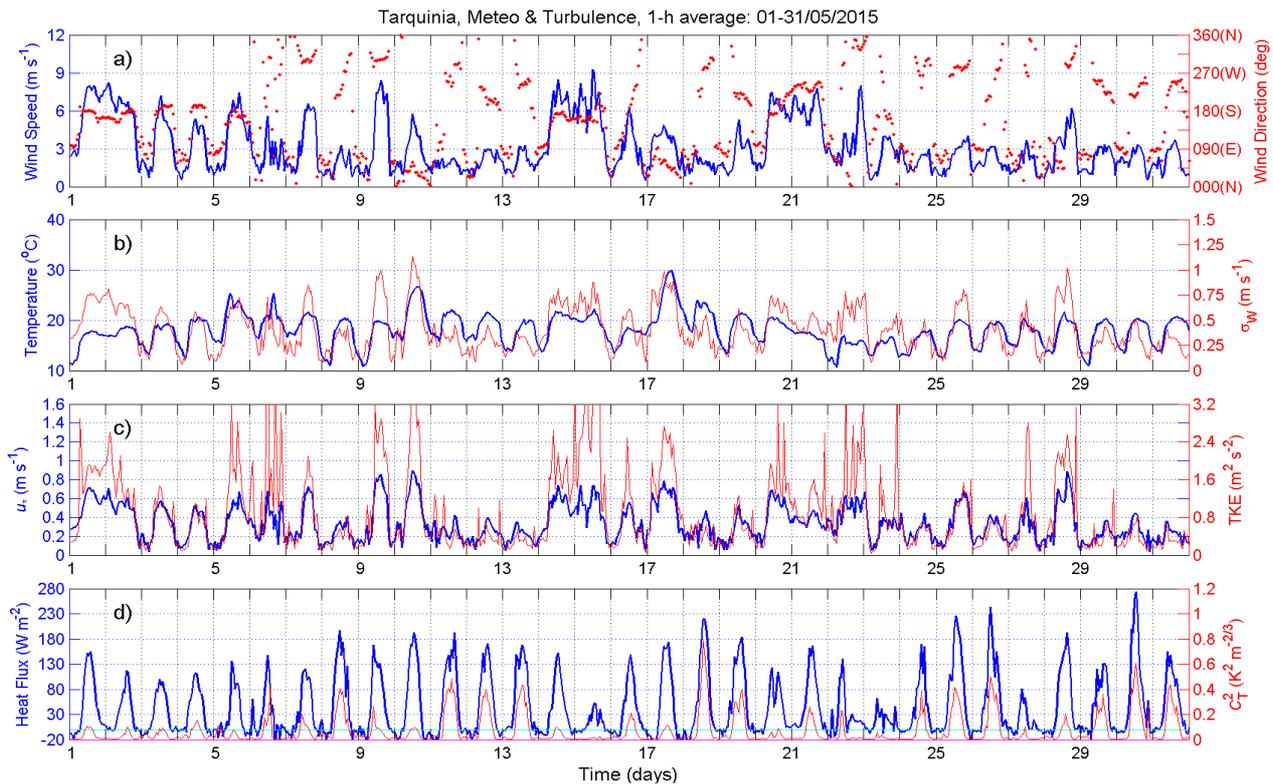


Figura 18. MAGGIO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

MAGGIO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento raggiunge in alcuni giorni 9 m s^{-1} , i valori più elevati sono associate a venti da sud (S), quelli più bassi (3 m s^{-1}) a venti da est (E).

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura oscilla tra 10°C (di notte) e 20°C (di giorno). In questo mese, la varianza della velocità verticale del vento segue solo parzialmente l'andamento temporale della temperatura. I valori oscillano tra 0.1 m s^{-1} ed 1.0 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco di $130\text{-}180 \text{ W m}^{-2}$, in alcuni casi $230\text{-}280 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura mostra picchi che variano tra $0.1 - 0.6 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

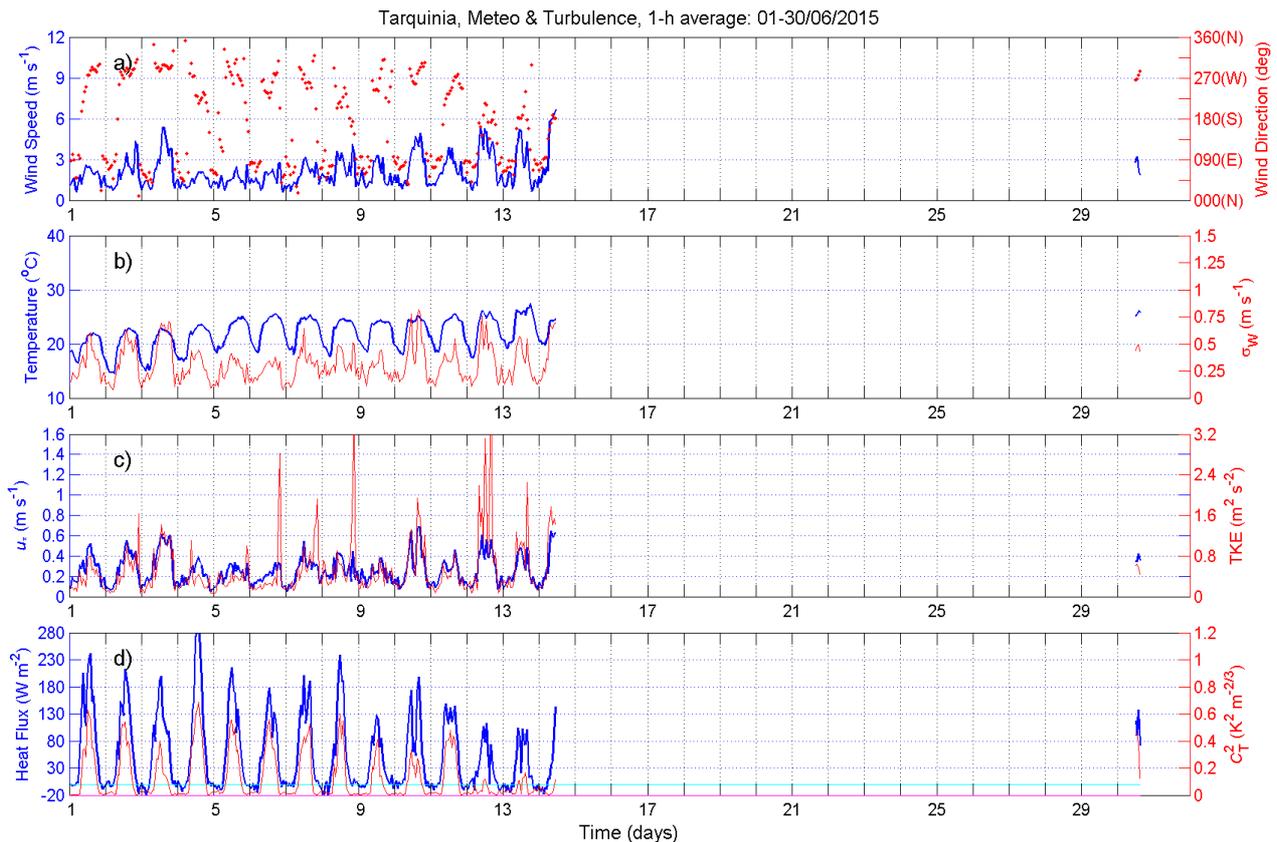


Figura 19. GIUGNO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

GIUGNO 2016.

Interruzione dal giorno 14 per un problema al data logger

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento non supera 3 m s^{-1} . Le velocità più elevate sono associate a venti da ovest, quelle meno elevate si osservano di notte, in corrispondenza dei venti da est (brezza di terra).

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura è in leggero trend di crescita durante le due settimane di misure. La temperatura oscilla tra circa 20°C (di notte) e 25°C (di giorno). Anche in questo mese la varianza della velocità verticale del vento segue solo parzialmente l'andamento temporale della temperatura. I valori oscillano tra 0.25 m s^{-1} ed 0.75 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco minimo 80 W m^{-2} , in alcuni casi $130\text{-}230 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura ha picchi che variano tra $0.1 - 0.6 \text{ K}^2\text{m}^{-2/3}$.

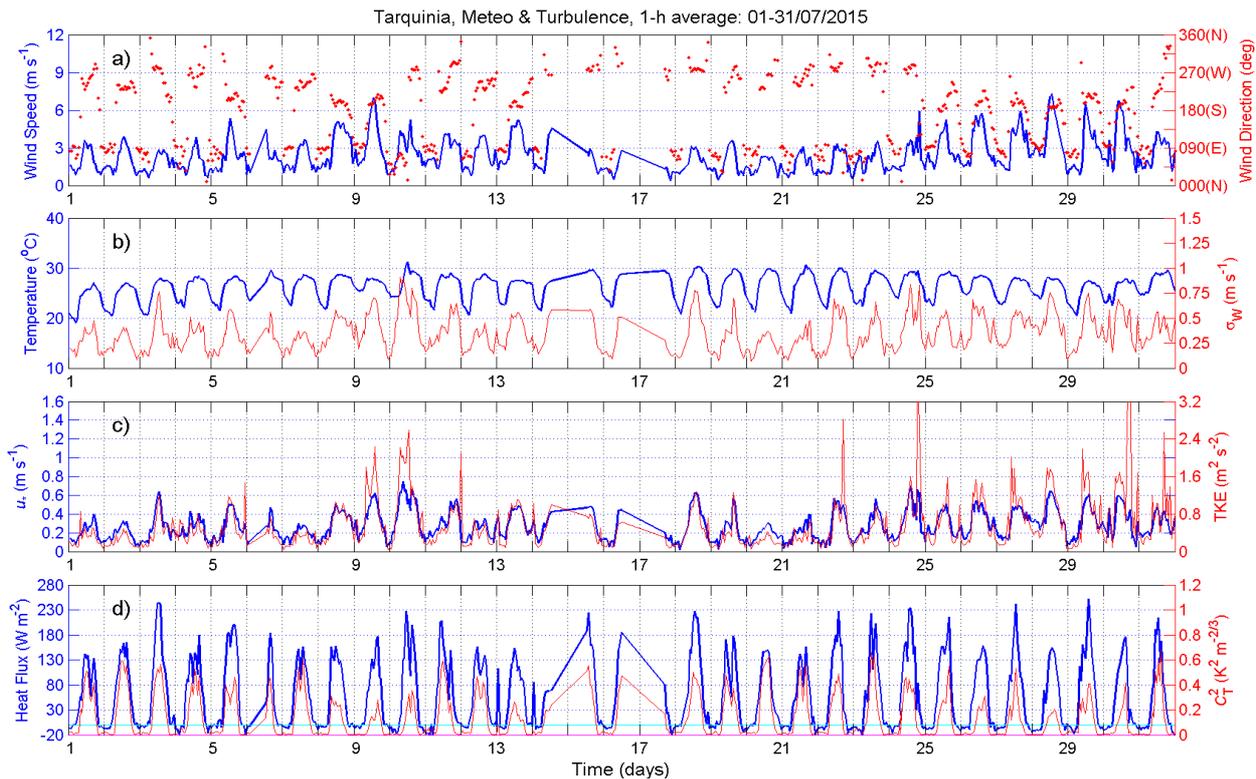


Figura 20. LUGLIO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

LUGLIO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento non supera generalmente 3 m s^{-1} (venti da sud), in alcuni giorni 6 m s^{-1} (venti da ovest). I valori meno elevati si osservano di notte in corrispondenza dei venti da est (brezza di terra).

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): la temperatura oscilla tra circa 20°C (di notte) e 30°C (di giorno). La varianza della velocità verticale del vento oscilla tra 0.1 m s^{-1} ed $0.75\text{-}1 \text{ m s}^{-1}$.

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): er entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume valori massimi nella parte centrale della giornata con valori di picco di $130\text{-}180 \text{ W m}^{-2}$, in alcuni casi $230\text{-}280 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura varia tra $0.1\text{-}0.6 \text{ K}^2\text{m}^{-2/3}$.

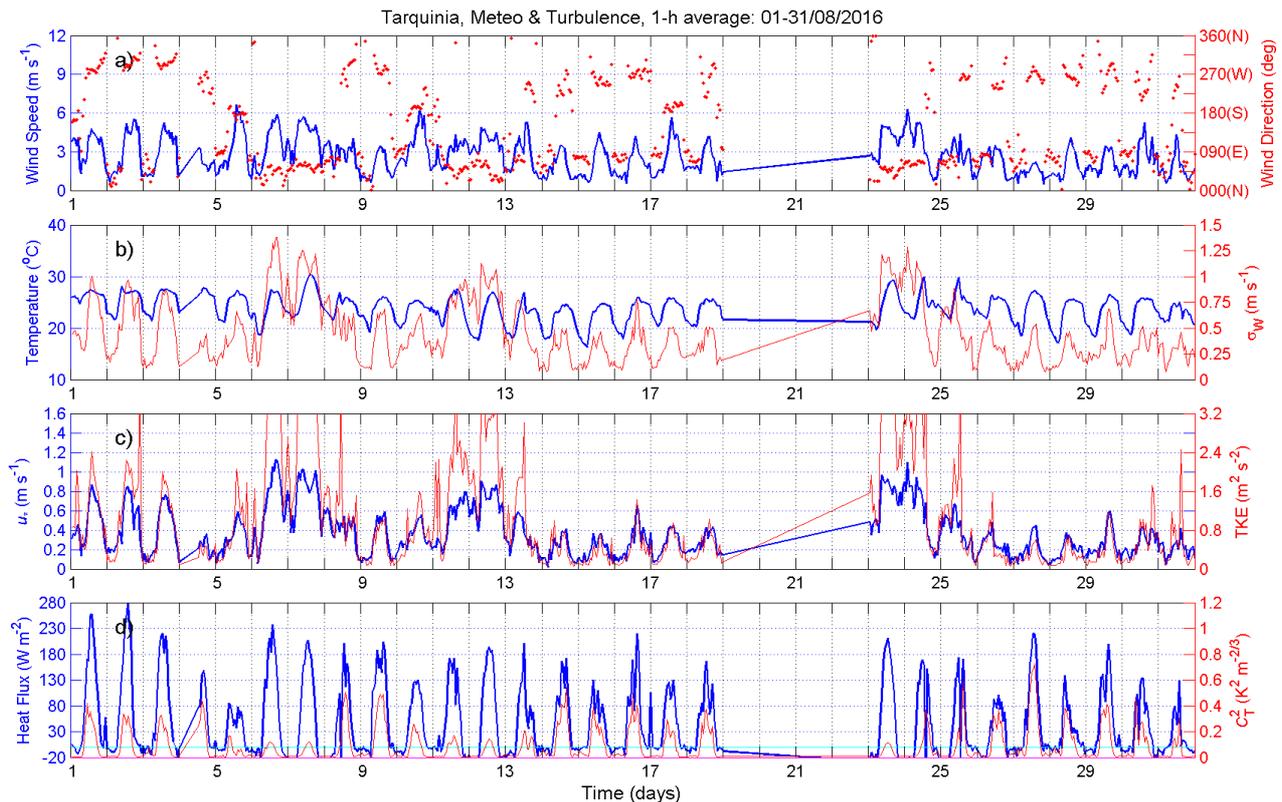


Figura 21. AGOSTO : (a) andamento della velocità (blu) e della direzione del vento (rosso), (b) temperatura (blu) e varianza della velocità verticale (rosso), (c) velocità di attrito (blu) ed energia cinetica turbolenta (rosso), (d) flusso di calore sensibile (blu) e coefficiente di struttura per la temperatura (rosso).

AGOSTO 2016

Velocità e direzione del vento (a): la velocità del vento oscilla tra 1.5 e 3 m s^{-1} ; in alcuni giorni raggiunge anche 6 m s^{-1} . Le velocità meno intense sono osservate di notte in presenza di venti da est (brezza di terra), quelle più intense di giorno quando prevalgono venti da sud e da ovest. L'andamento generale di entrambi i parametri è caratteristico di un sistema di circolazione locale a mesoscala, come quello di brezza.

Temperatura e varianza della velocità verticale del vento (b): La temperatura oscilla tra circa 20°C (di notte) e 28°C (di giorno). La varianza della velocità verticale del vento oscilla tra 0.1 m s^{-1} ed 1.5 m s^{-1} .

Velocità di attrito ed energia cinetica turbolenta per unità di massa (c): Per entrambe le grandezze, che come aspettato seguono l'andamento della velocità del vento, valgono le medesime considerazioni fatte per quest'ultima.

Flusso di calore sensibile e coefficiente di struttura per la temperatura (d): il flusso di calore sensibile assume i valori più elevati nella parte centrale della giornata. Nelle giornate serene supera 180 W m^{-2} , in alcuni casi $230\text{-}280 \text{ W m}^{-2}$. Il parametro di struttura per la temperatura ha picchi che variano tra $0.1 - 0.6 \text{ K}^2 \text{ m}^{-2/3}$.

3.2 MISURE in situ di RADIAZIONE

Le Figure 22-32 mostrano per ogni mese del periodo novembre-agosto 2016 l'andamento temporale delle medie orarie dei valori della : (a) temperatura (blu) e radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e lunga (IR) up (rosso).

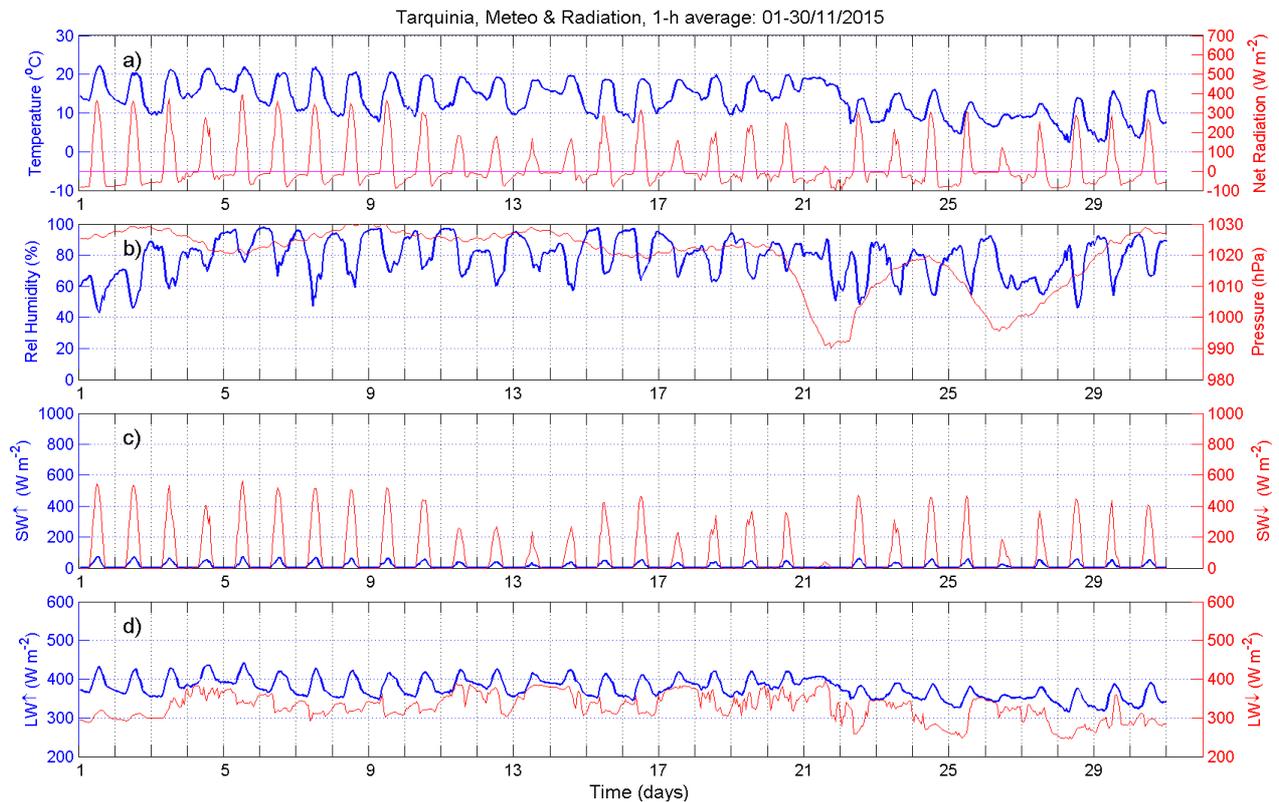


Figura 22. NOVEMBRE : (a) temperatura (blu) e radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

NOVEMBRE 2015

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 300 W m^{-2} . Il picco della radiazione si osserva in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 60% - 90%.

La pressione oscilla generalmente tra 1020 - 1030 hPa esclusi i giorni dal 22 al 29.

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione ad onda corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 40 W m^{-2} mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 500 W m^{-2} .

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 250 - 400 W m^{-2} , la radiazione emessa dal terreno tra 350 - 410 W m^{-2} .

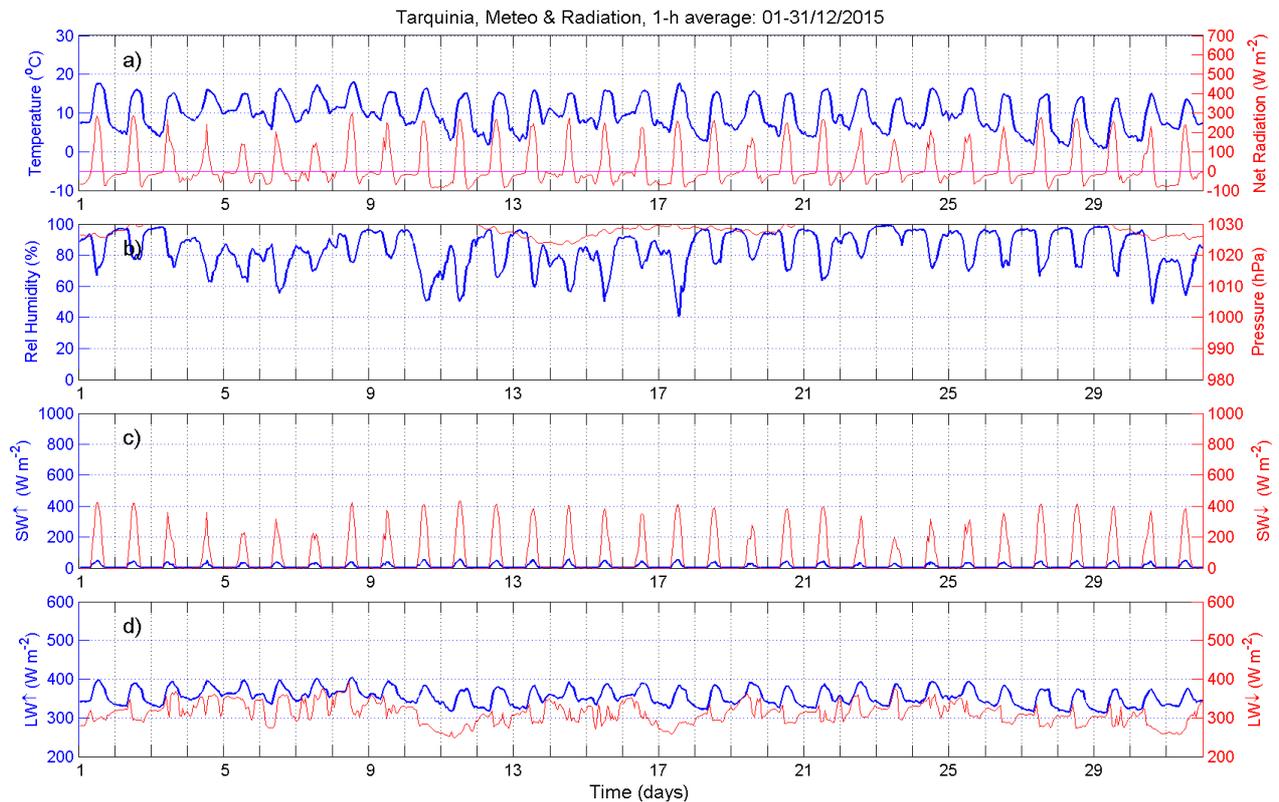


Figura 23. DICEMBRE: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

DICEMBRE 2015

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 200 W m⁻². Il picco della radiazione si ha in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 60% - 90%.

La pressione varia tra 1020 - 1030 hPa.

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0-70 W m⁻² mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 400 W m⁻².

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 250 - 400 W m⁻², la radiazione emessa dal terreno tra 300 - 400 W m⁻².

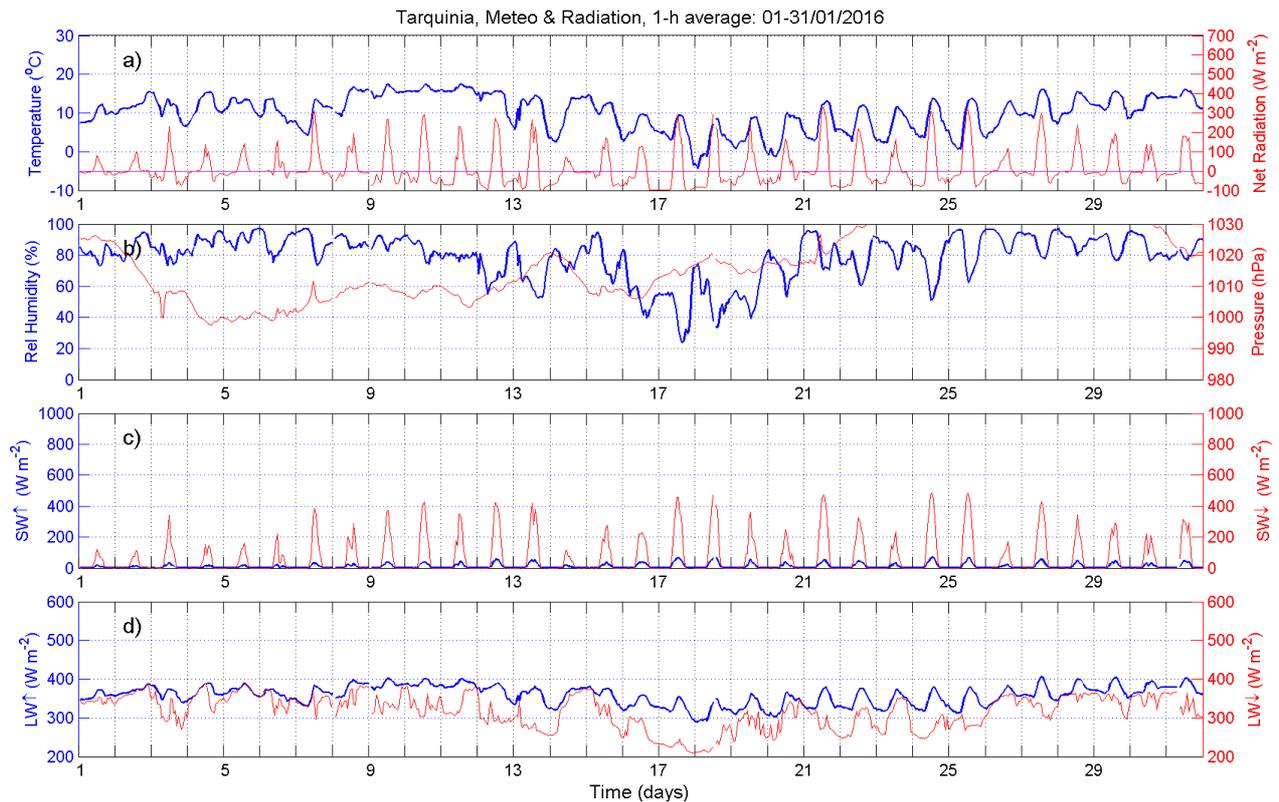


Figura 24. GENNAIO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

GENNAIO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 200 W m^{-2} . Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90% .

La pressione oscilla generalmente tra 1000 - 1030 hPa .

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 90 W m^{-2} mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 400 W m^{-2} .

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 350 - 400 W m^{-2} , la radiazione emessa dal terreno tra 200 - 400 W m^{-2} .

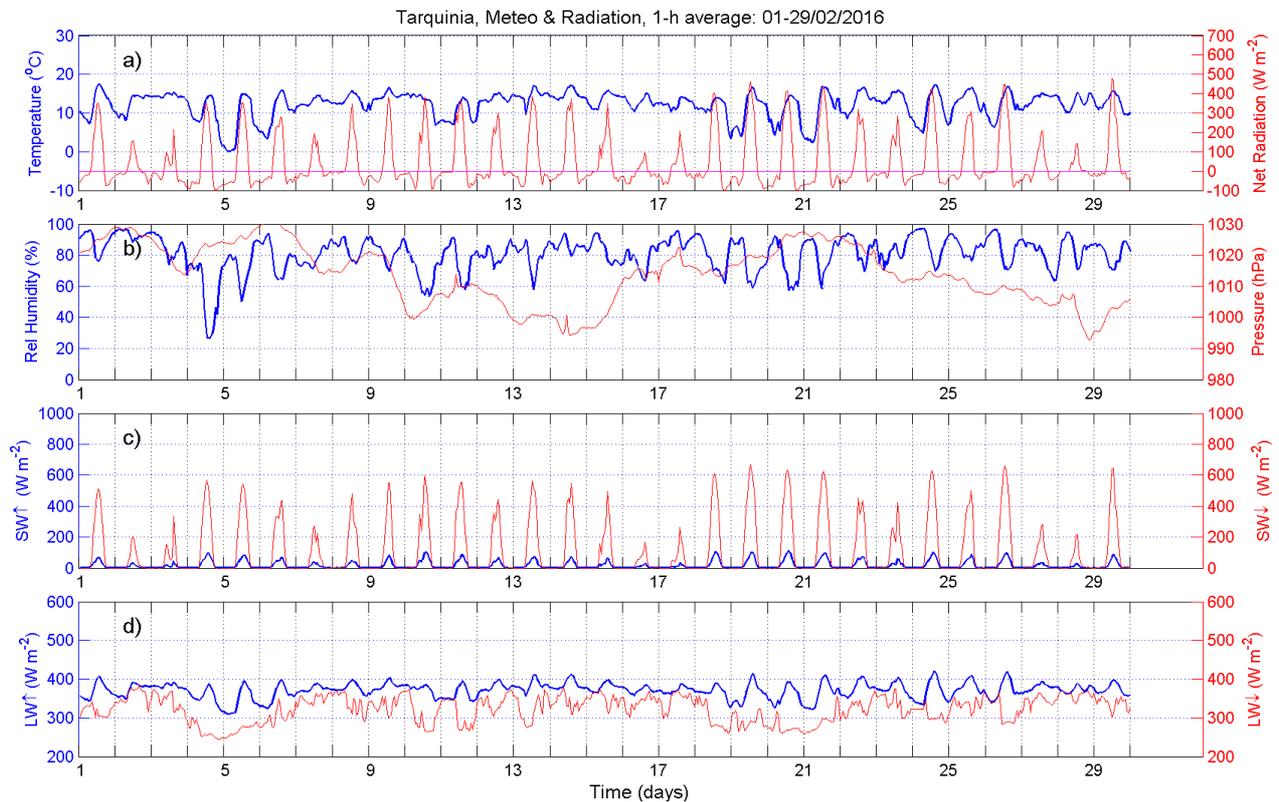


Figura 25. FEBBRAIO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

FEBBRAIO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 400 W m⁻². Il picco della radiazione si registra in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 20% - 90%.

La pressione oscilla generalmente tra 995 - 1030 hPa.

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0-100 W m⁻² mentre la radiazione visibile trasmessa varia tra 0 - 600 W m⁻².

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 350 - 400 W m⁻², la radiazione emessa dal terreno tra 300 - 400 W m⁻².

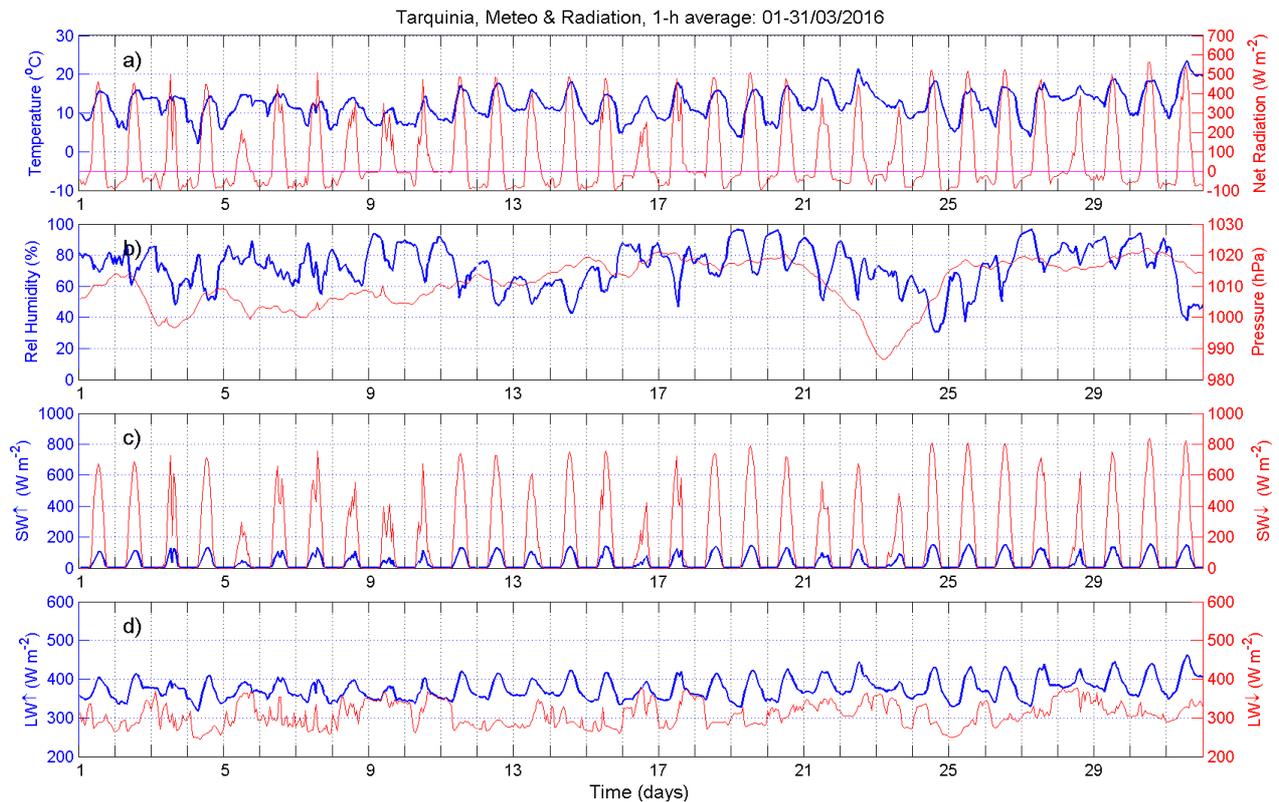


Figura 26. MARZO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

MARZO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 500 W m^{-2} . Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90% .

La pressione oscilla generalmente tra 1000 - 1030 hPa .

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 180 W m^{-2} mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 e 800 W m^{-2} .

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 350 - 450 W m^{-2} , la radiazione emessa dal terreno tra 250 - 350 W m^{-2} .

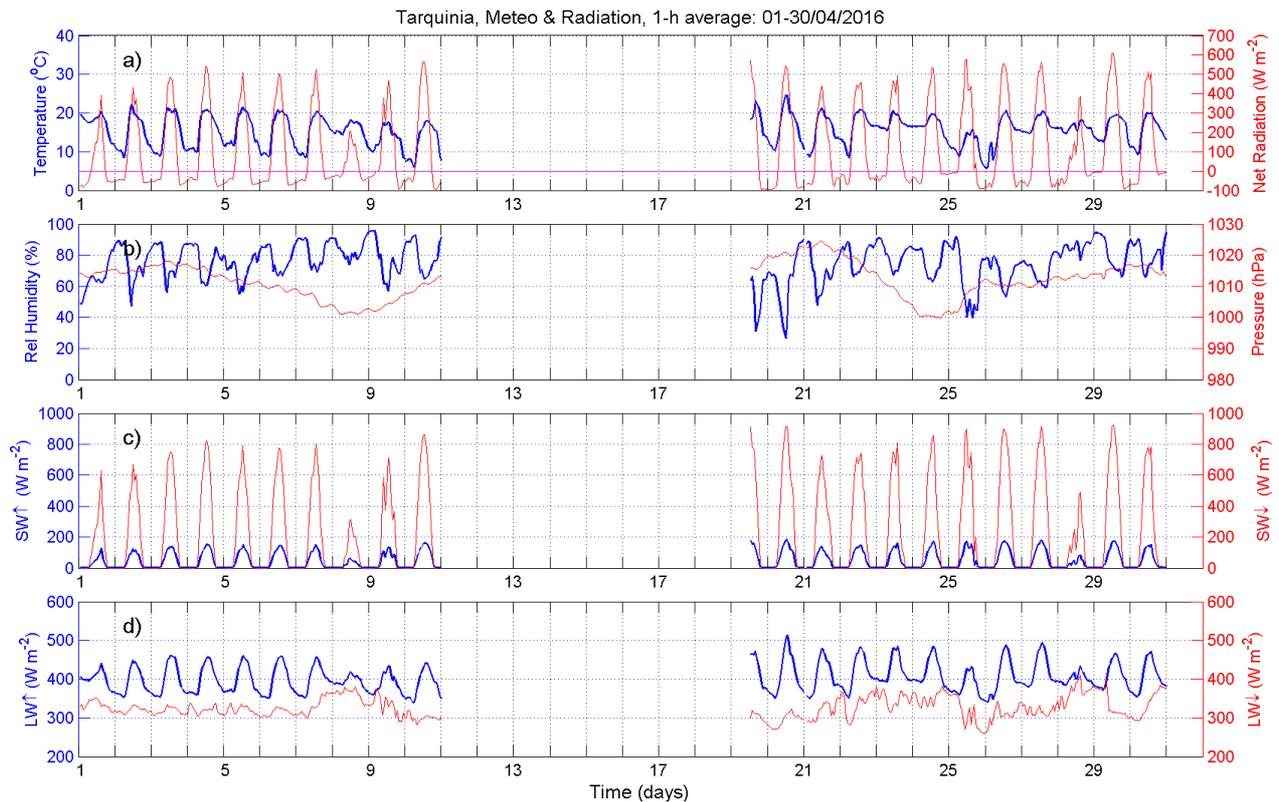


Figura 27. APRILE: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

APRILE 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra $-50 - 500 \text{ W m}^{-2}$. Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90%.

La pressione oscilla generalmente tra 1000 - 1020 hPa.

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra $0 - 180 \text{ W m}^{-2}$ mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra $0 - 900 \text{ W m}^{-2}$.

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra $300 - 400 \text{ W m}^{-2}$, la radiazione emessa dal terreno tra $350 - 500 \text{ W m}^{-2}$.

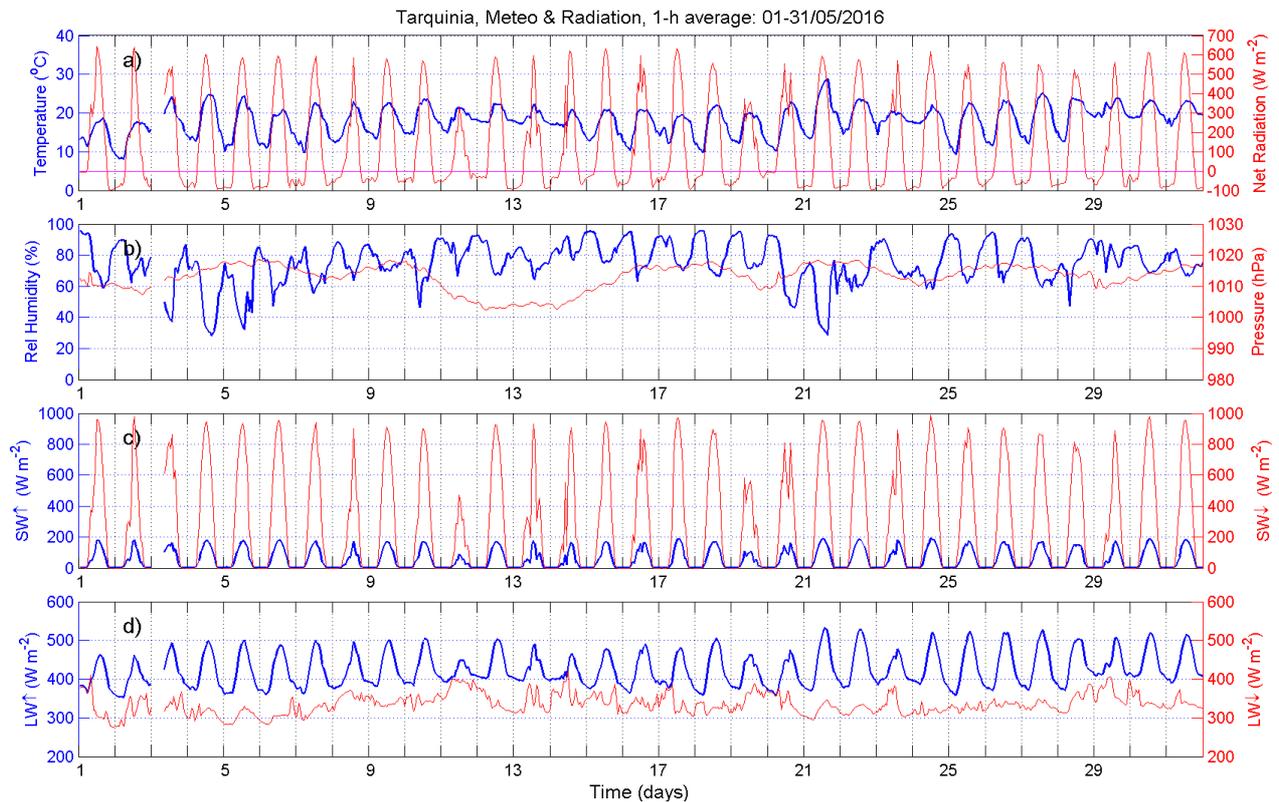


Figura 28. MAGGIO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

MAGGIO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 600 W m^{-2} . Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90% .

La pressione oscilla generalmente tra 1000 - 1020 hPa .

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 200 W m^{-2} mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 1000 W m^{-2} .

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 300 - 400 W m^{-2} , la radiazione emessa dal terreno tra 370 - 500 W m^{-2} .

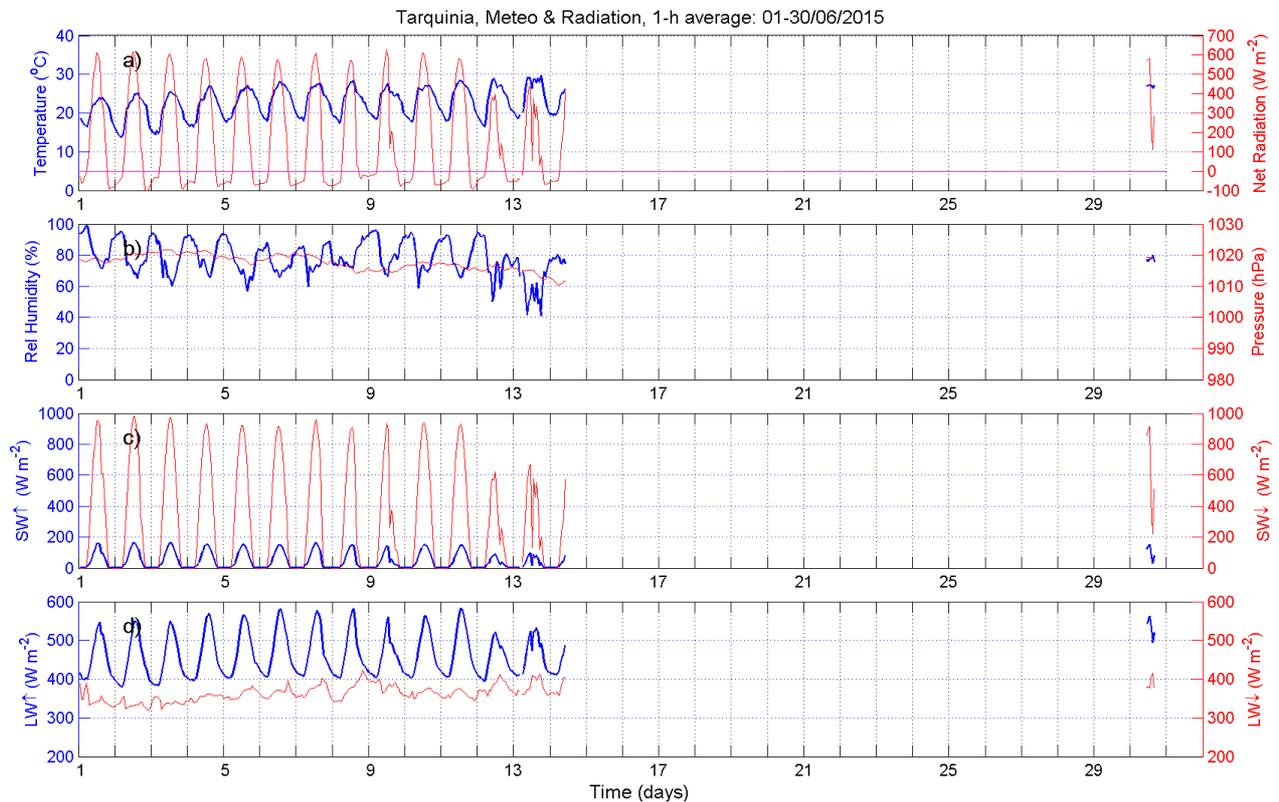


Figura 29. GIUGNO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

GIUGNO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e 600 W m^{-2} . Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90% .

La pressione oscilla generalmente tra 1000 - 1020 hPa .

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 200 W m^{-2} mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 1000 W m^{-2} .

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 350 - 400 W m^{-2} , la radiazione emessa dal terreno tra 400 - 600 W m^{-2} .

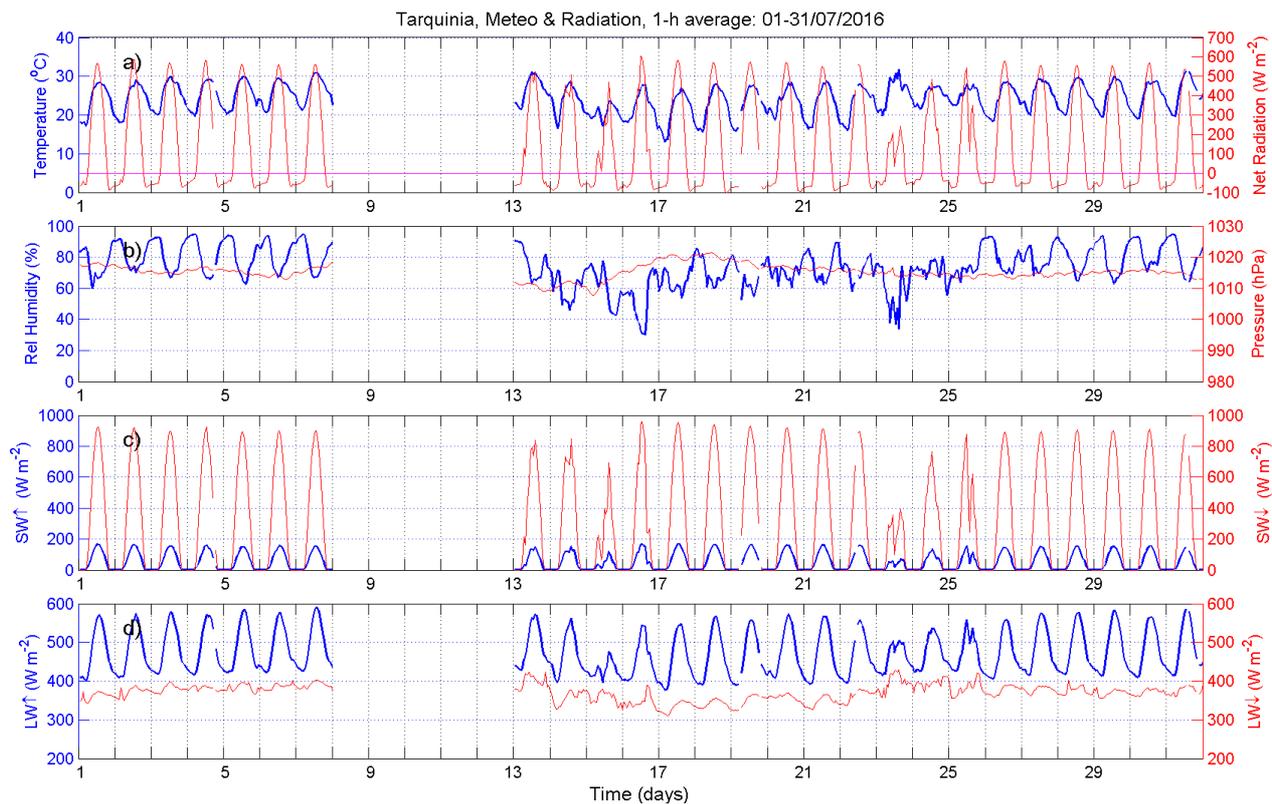


Figura 30. LUGLIO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

LUGLIO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la radiazione netta varia tra -50 e $600 W m^{-2}$. Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 40% - 90%.

La pressione oscilla generalmente tra 1010 - 1020 hPa.

Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra $0-180 W m^{-2}$ mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra $0 - 1000 W m^{-2}$.

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra $300 - 400 W m^{-2}$, la radiazione emessa dal terreno tra $400 - 600 W m^{-2}$.

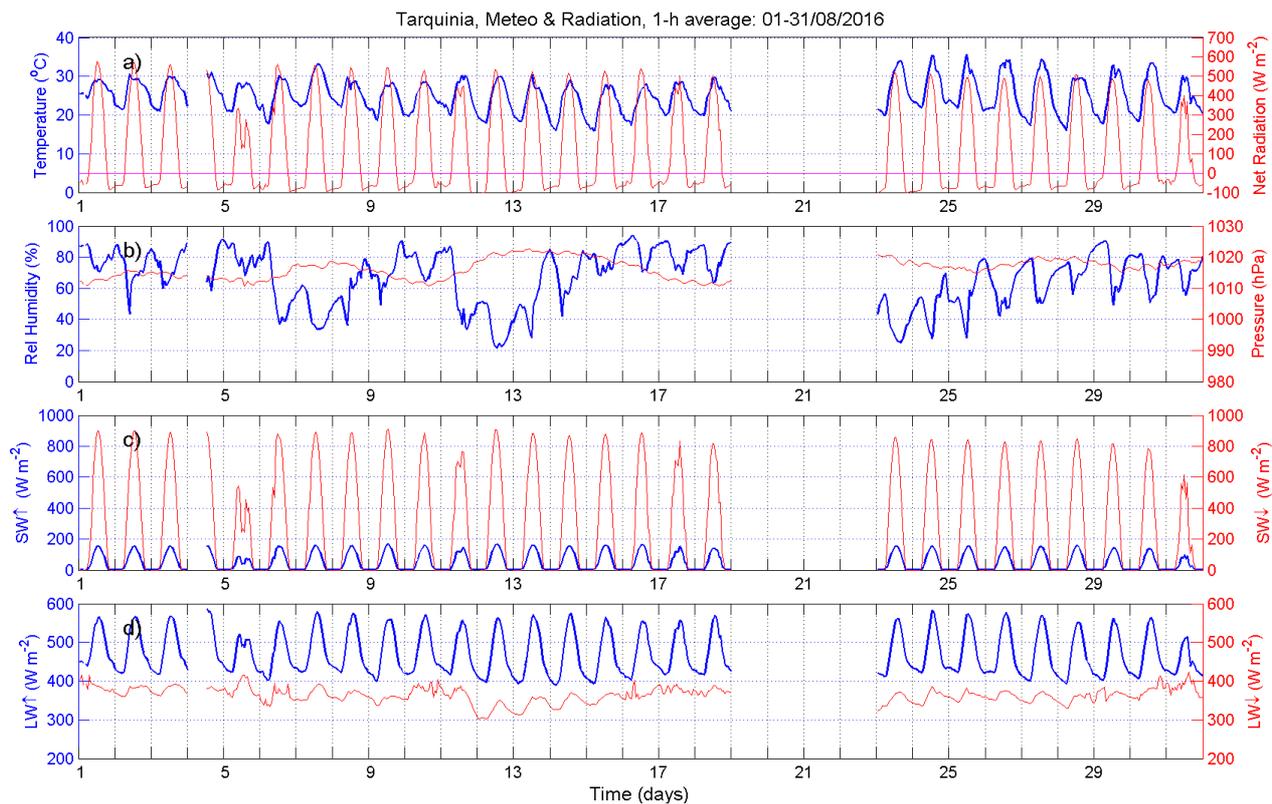


Figura 31. AGOSTO: (a) temperatura (blu) radiazione netta (rosso), (b) umidità relativa (blu) e pressione (rosso), (c) radiazione ad onda corta (VIS) down (blu) e radiazione ad onda corta (VIS) up (rosso), (d) radiazione ad onda lunga (IR) down (blu) e radiazione ad onda lunga (IR) up (rosso).

AGOSTO 2016

Temperatura e radiazione netta (a): la temperatura oscilla tra 20 e 35 °C. La radiazione netta varia tra -50 e 550 W m⁻². Il picco della radiazione si presenta in corrispondenza del valore massimo della temperatura.

Umidità relativa e pressione (b): l'umidità relativa presenta un massimo durante la notte ed un minimo nelle ore più calde del giorno. I valori variano generalmente tra 20% - 90%. La pressione oscilla generalmente tra 1010 - 1020 hPa. Radiazione ad onda corta (up) e (down) (c): la radiazione corta visibile riflessa oscilla tra 0 - 200 W m⁻² mentre la radiazione visibile trasmessa oscilla tra 0 - 900 W m⁻².

Radiazione ad onda lunga (up) e (down) (d): la radiazione ad onda lunga diffusa dall'atmosfera varia tra 400 - 550 W m⁻², la radiazione emessa dal terreno tra 300 - 400 W m⁻².

3.3 MISURE di *remote sensing* : SODAR

Nelle Figure 32-34 è mostrato l'andamento giornaliero della distribuzione dei valori orari della velocità e direzione del vento misurati dall'anemometro sonico (a) e dal SODAR (c, e, h) rispettivamente a 5 m, 80 m, 136 m e 193 m per le stagioni meteorologiche suddivise come segue:

INVERNO: 1 dicembre 2015 - 28 febbraio 2016 (Figura 32)

PRIMAVERA: 1 marzo 2016 - 31 maggio 2016 (Figura 33)

ESTATE: 1 giugno 2016 - 31 agosto 2016 (Figura 34)

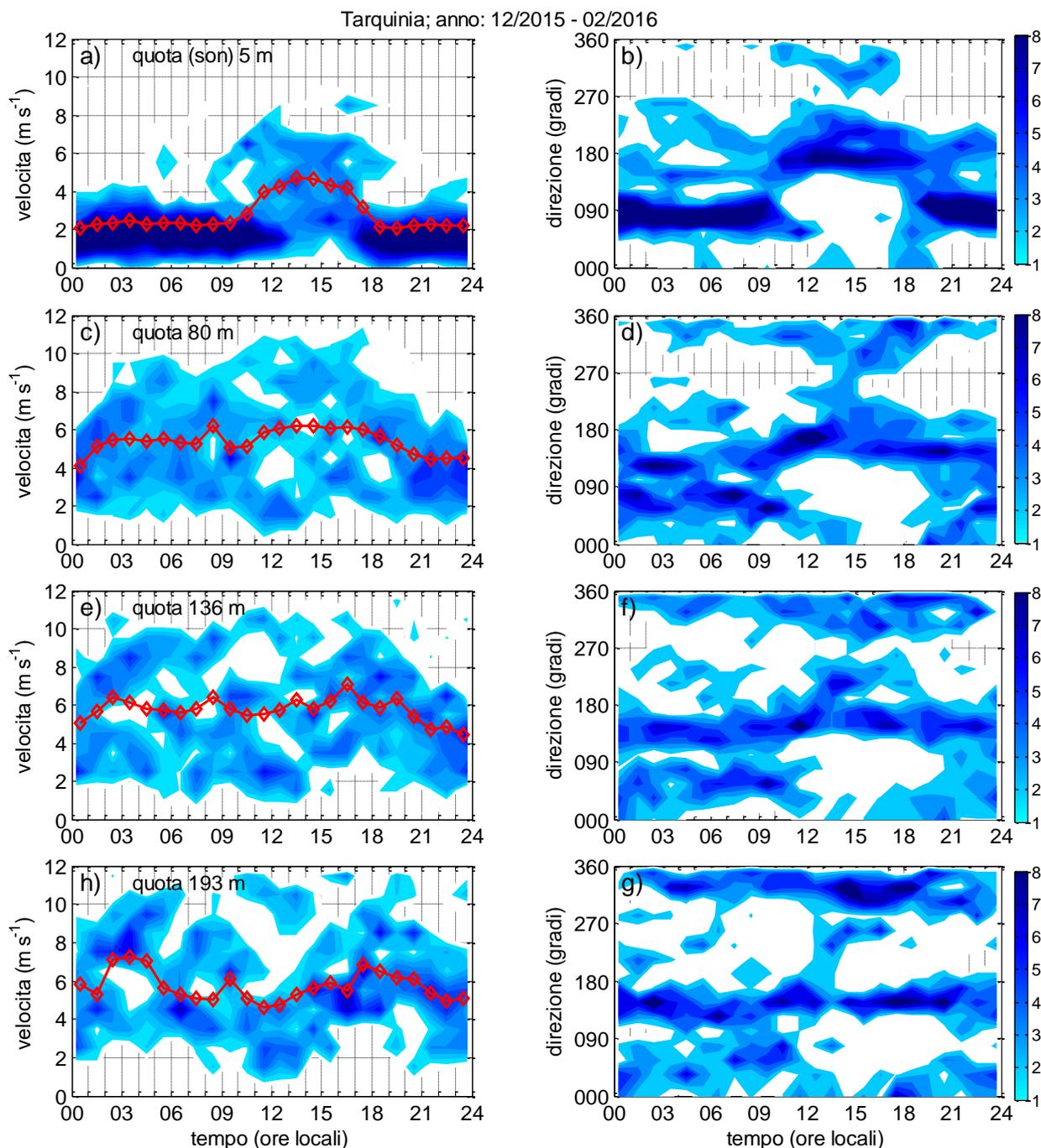


Figura 32. INVERNO: andamento giornaliero della percentuale dei valori misurati dal sonico e dal SODAR della velocità (a, c, e, h) e della direzione del vento (b, d, f, g) rispettivamente a 5 m, 80 m, 136 m e 193 m. La linea rossa indica il valore medio della velocità.

INVERNO

Velocità del vento: la velocità del vento alla quota più bassa (Figura 32 a) generalmente non supera 4 m s^{-1} , i valori massimi (8 m s^{-1}) sono osservati tra le 0900 LST e le 1800 LST in corrispondenza della brezza di mare. La velocità media oscilla tra 2 e 4 m s^{-1} . La velocità del vento aumenta con la quota a tutte le ore (Figure 32 c, e, f) raggiungendo 12 m s^{-1} , e non è presente un chiaro andamento giornaliero. Le circolazioni prevalenti, oltre la brezza di terra (90°), sono le circolazioni alla scala sinottica da sud e da nord responsabili dei venti di maggiore intensità.

Direzione: alla quota di 5 m (Figura 32 b) è evidente il passaggio dalla brezza di terra (venti da E) alla brezza di mare (O - SO). La brezza di mare si stabilizza alle 1000 LST e persiste fino alle 1800 LST. E' in corrispondenza della brezza di mare che si osservano le velocità del vento più elevate (cfr. Figura 32 a). A partire da 80 m (Figure 32 d, f, g) oltre alla

brezza di terra presente nelle ore notturne prevalgono le circolazioni alla scala sinottica da sud e da nord alle quali corrispondono le velocità del vento più elevate.

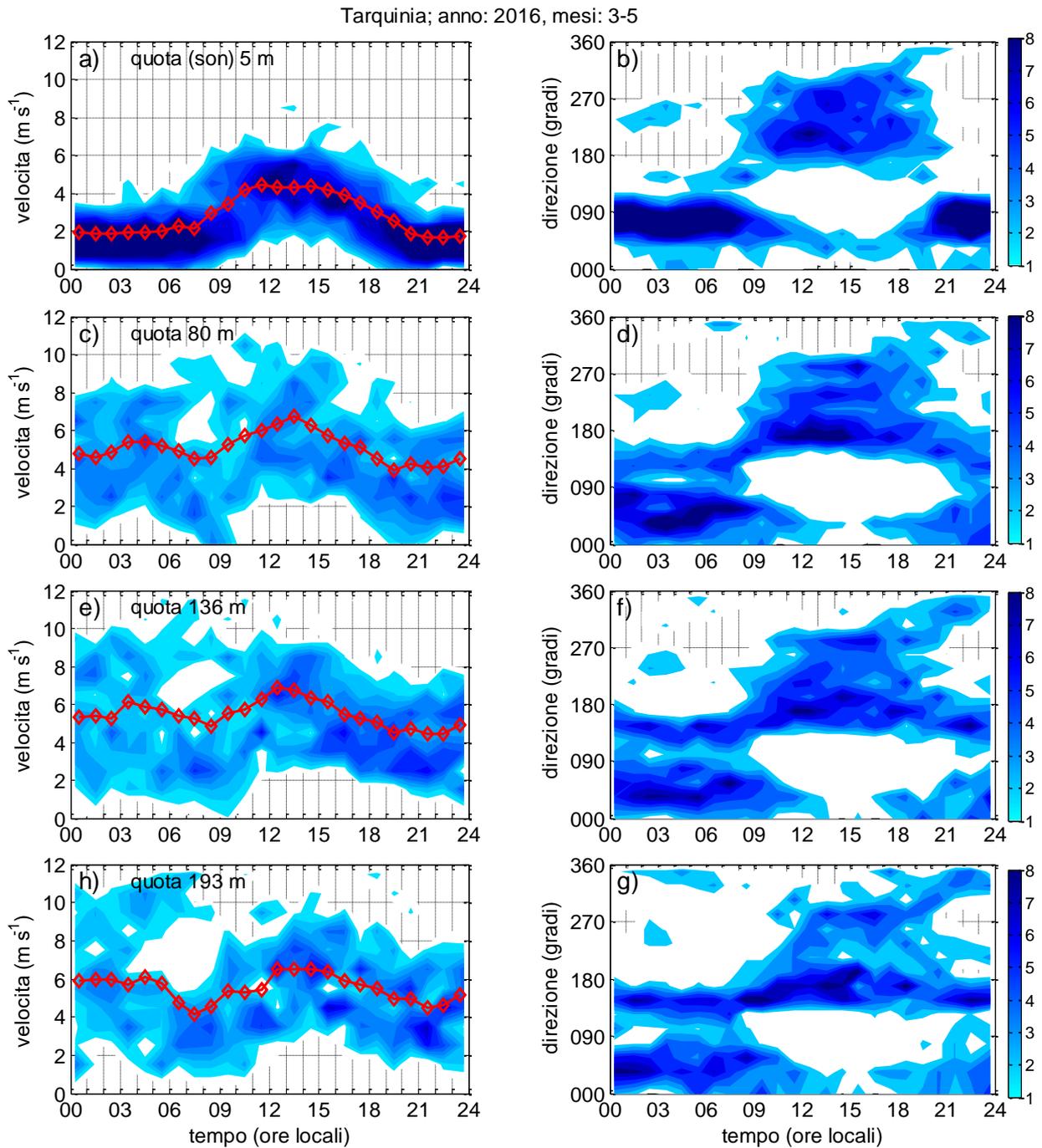


Figura 33. PRIMAVERA: andamento giornaliero della percentuale dei valori misurati dal sonico e dal SODAR della velocità (a, c, e, h) e della direzione del vento (b, d, f, g) rispettivamente a 5 m, 80 m, 136 m e 193 m. La linea rossa indica il valore medio della velocità.

PRIMAVERA

Velocità del vento: la velocità del vento a 5 m (Figura 33 a) dalle 0000 LST alle 0700 LST non supera 4 m s^{-1} . Di giorno i valori massimi (6 m s^{-1}) si osservano tra le 0900 LST e le 1800 LST, in corrispondenza della brezza di mare. La velocità aumenta con la quota (Figure 33c, e, h) assumendo valori che raggiungono, e in alcuni casi superano, 10 m s^{-1} . A quote superiori ad 80 m la distribuzione giornaliera evidenzia un picco secondario intorno alle 0400 LST e la

distribuzione della velocità del vento varia in un intervallo di valori più ampio rispetto alla distribuzione nello strato superficiale (5 m). I venti da sud sono responsabili dei valori più alti della velocità del vento.

Direzione: alla quota di 5 m (Figura 33 b) la direzione del vento di notte indica la presenza della brezza di terra (venti da est più deboli) e della circolazione a scala sinottica da sud (venti più intensi). Durante il giorno prevale la brezza di mare (direzione centrata nel terzo quadrante sud-sudovest- ovest).

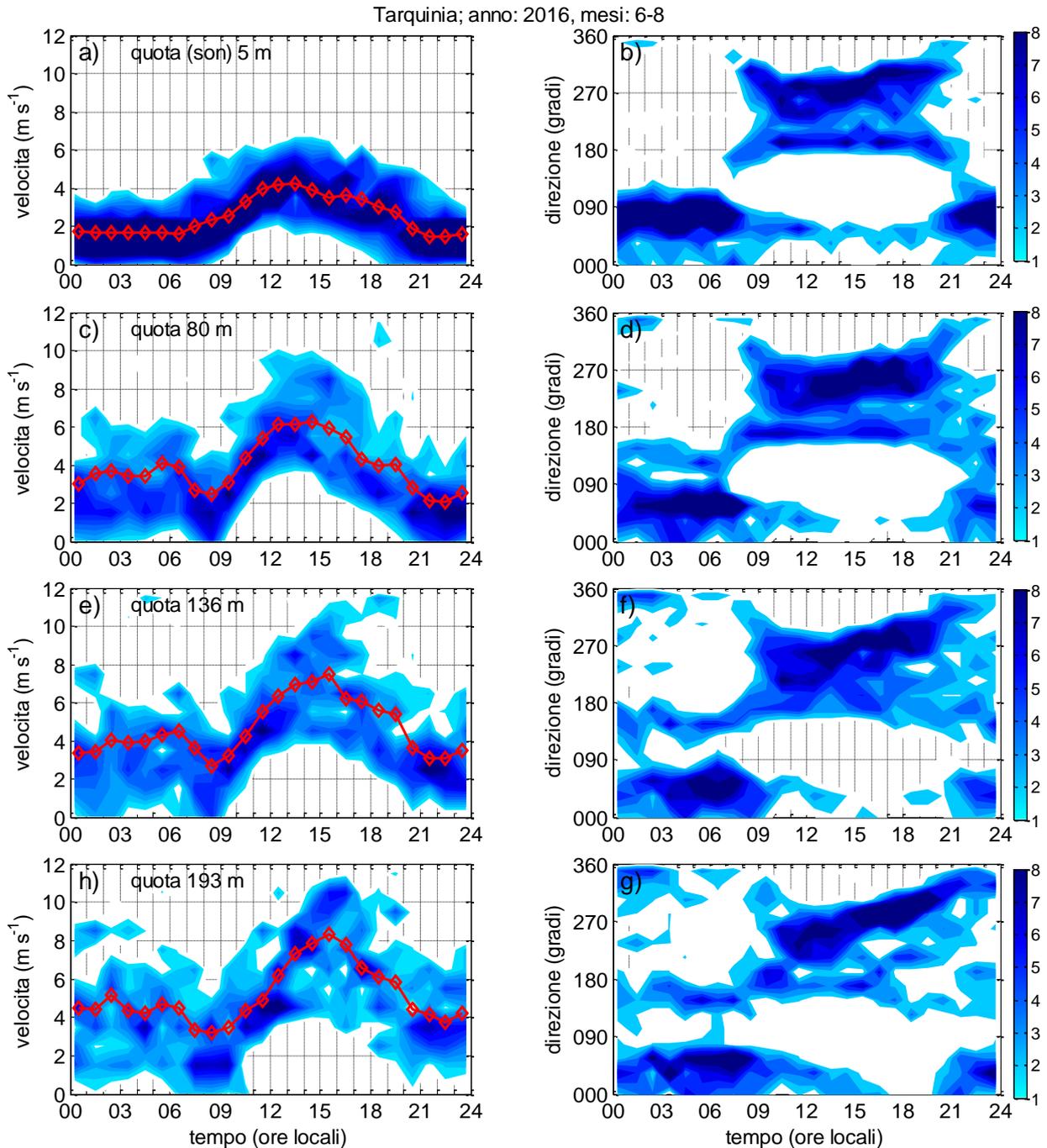


Figura 34. ESTATE: andamento giornaliero della percentuale dei valori misurati dal sonico e dal SODAR della velocità (a, c, e, h) e della direzione del vento (b, d, f, g) rispettivamente a 5 m, 80 m, 136 m e 193 m. La linea rossa indica il valore medio della velocità.

ESTATE

Velocità del vento: la velocità del vento alla quota più bassa (Figura 34 a) generalmente non supera 7 m s^{-1} , i valori più elevati sono osservati tra le 0900 LST e le 1800 LST in presenza della brezza di mare e dei venti alla scala sinottica

da sud. A quote superiori ad 80 m la distribuzione giornaliera mostra un aumento della velocità del vento durante le ore notturne (con valori che possono raggiungere anche 8 m s^{-1}) e durante le ore diurne. Durante le ore diurne le velocità più elevate sono attribuibili ai flussi alla scala sinottica.

Direzione: alle quote più basse (5 ed 80 m) (Figure 34 b, d) la direzione del vento evidenzia la presenza di una circolazione che vede l'alternarsi della brezza di terra (venti da est – nordest) e di mare (ovest - sudovest) che si stabilizza dopo le 0900 LST. La brezza di mare è presente dalle 0900 LST alle 2100 LST circa. E' in corrispondenza della brezza di mare che si osservano le velocità del vento più elevate (Figure 34 a, c, e, h). Le Figure 34 f, g evidenziano due circolazioni secondarie adiacenti, una dovuta alla presenza della brezza di mare e l'altra (quella corrispondente alle direzioni da sud) alla interazione della brezza di mare con la circolazione a scala sinottica.

Nelle Figure 35-37 sono mostrati i diagrammi polari della velocità del vento con la quota per quattro intervalli di velocità (3 m s^{-1} , 6 m s^{-1} , 9 m s^{-1} , 12 m s^{-1}) per l'inverno, l'estate e l'autunno. La prima quota (5 m) è relativa alle misurazioni dell'anemometro sonico, le misure a 80 m, 136 m e 193 m si riferiscono misurazioni del SODAR.

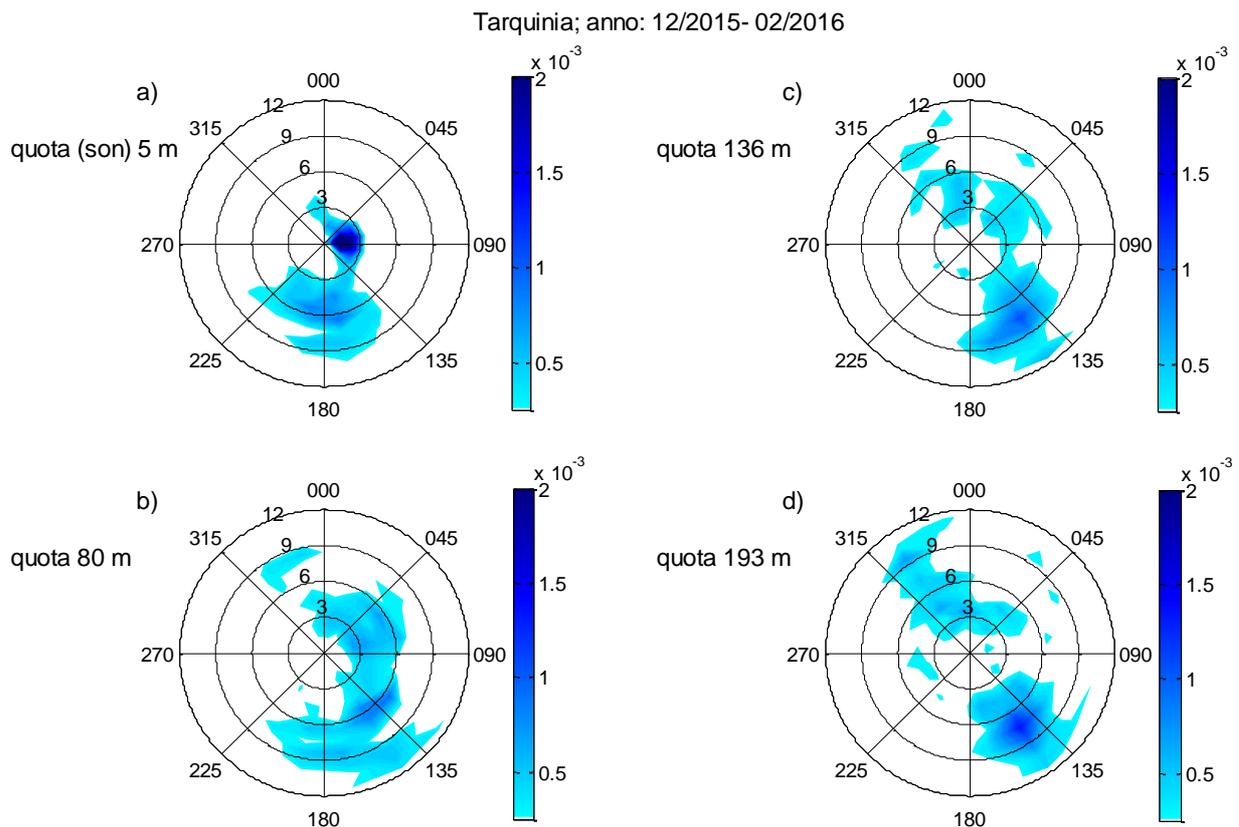


Figura 35. INVERNO: diagramma polare della direzione del vento con la quota per diversi intervalli di velocità. (a) 5 m (anemometro sonico), (b) 80 m (SODAR), (c) 136 m (SODAR), (d) 193 m (SODAR).

INVERNO: al suolo (a) si osservano venti prevalenti dal settore centrato a 90° (E) (brezza di terra) e 180° (S) con una estensione a sudest e sudovest (debole brezza di mare di ridotta estensione lungo la verticale). I venti da est sono quelli caratterizzati da minor intensità del vento. I venti nel settore sud hanno velocità comprese tra $3\text{-}9 \text{ m s}^{-1}$.

Da nord sono osservati pochi casi di bassa intensità. Dalla quota di 80 m (b) non si osserva la brezza di terra in quanto caratterizzata da uno spessore molto ridotto e comunque inferiore ad 80 m.

Al di sopra degli 80 m, la brezza di mare non è più rilevabile ed in conseguenza della interazione dei flussi alla scala sinottica con l'orografia dell'entroterra si ha un aumento della velocità nei settori NE, SE e NW (venti $> 6 \text{ m s}^{-1}$).

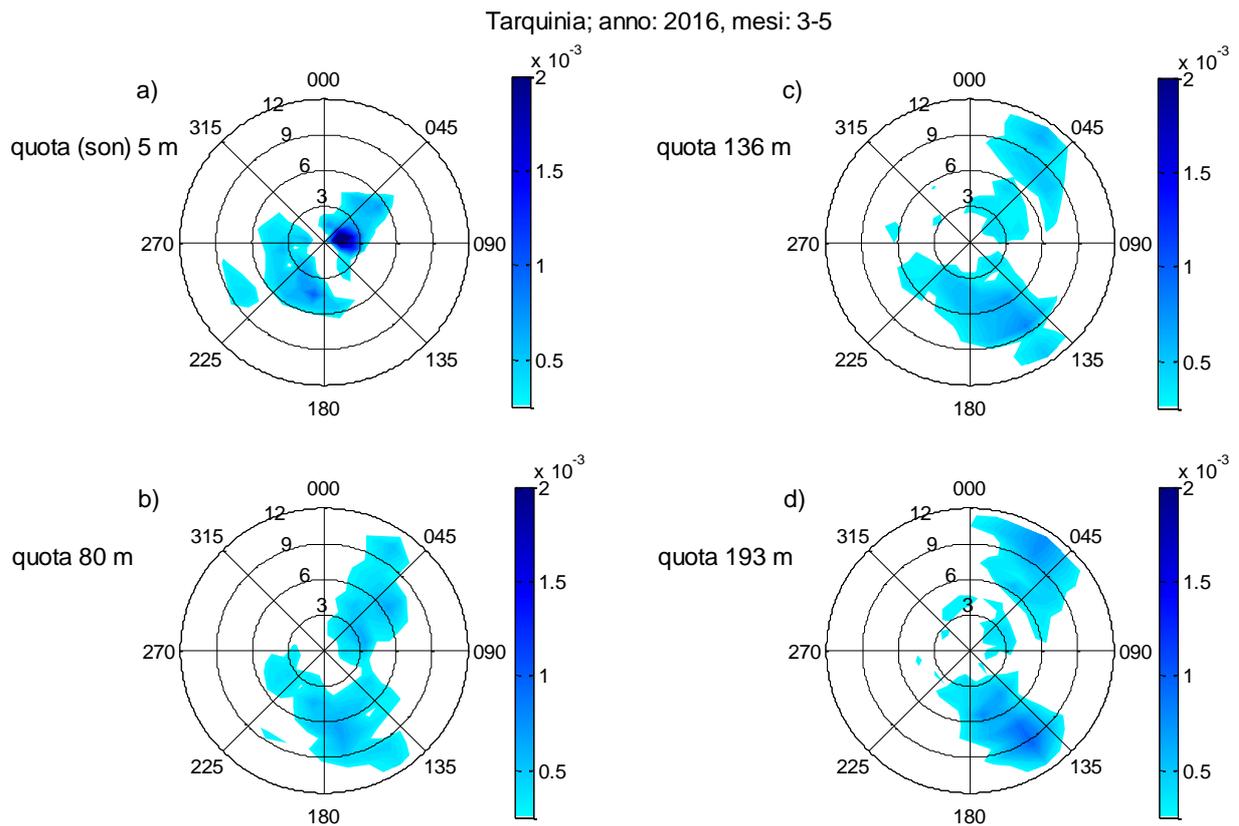


Figura 36. PRIMAVERA: diagramma polare della direzione del vento con la quota per diversi intervalli di velocità. (a) 5 m (anemometro sonico), (b) 80 m (SODAR), (c) 136 m (SODAR), (d) 193 m (SODAR).

PRIMAVERA: al suolo (a) si osservano venti prevalenti dal settore centrato a 90° (est) (brezza di terra) e da ovest - sudovest, (debole brezza di mare di ridotta estensione lungo la verticale e flussi alla scala locale modificati dalla orografia). Questi venti sono poco intensi e caratterizzati da velocità inferiori a 6 ms^{-1} . Soltanto in alcuni casi i venti superano questo valore.

Il fronte della brezza di mare che di terra, in considerazione della vicinanza del sito di misura dal mare e dei rilievi di limitata pendenza immediatamente alle spalle della stazione di misura hanno uno spessore molto ridotto il quale investe uno strato di atmosfera inferiore comunque ad 80 m. Sopra questa quota (Figure 36 c,d) i flussi osservati provengono prevalentemente dal settore orientale. Sono flussi alla scala sinottica modulati, sia in intensità che direzione, dalla orografia locale.

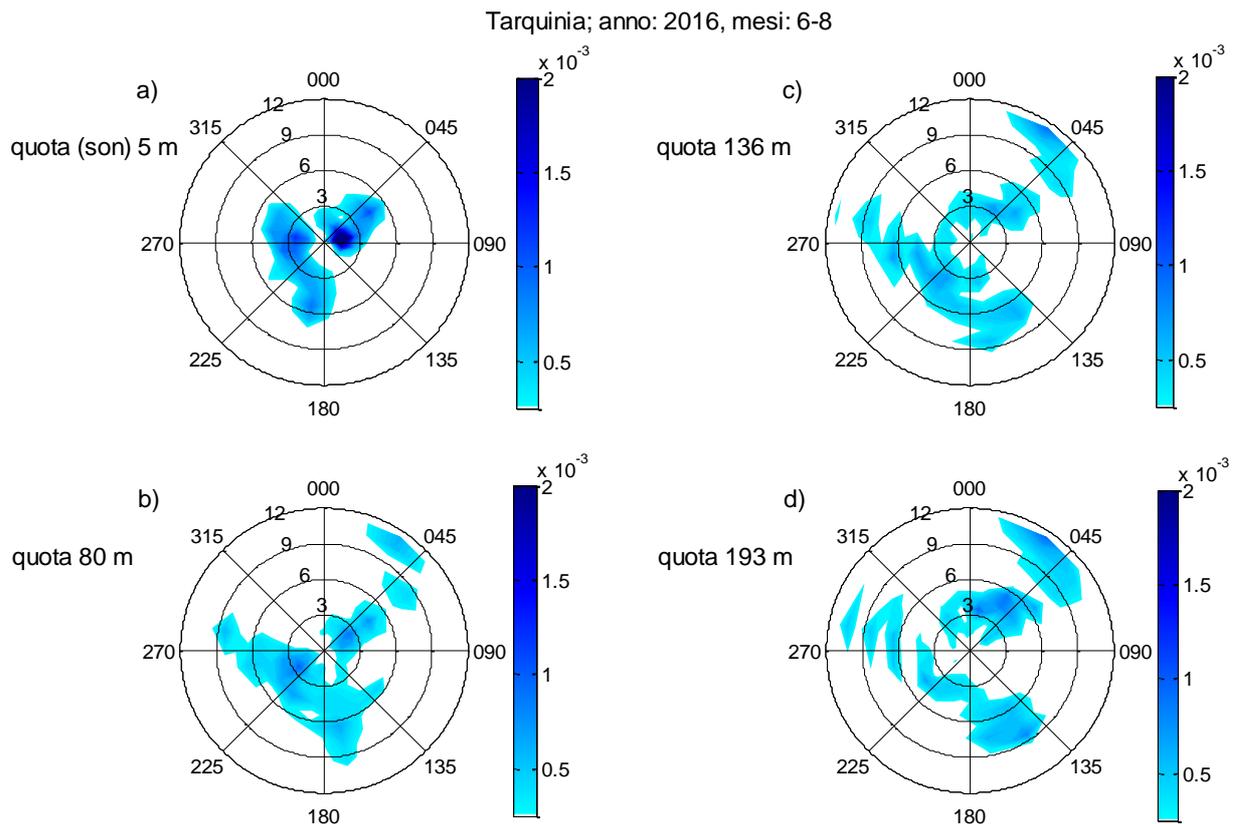


Figura 37. ESTATE: diagramma polare della direzione del vento con la quota per diversi intervalli di velocità. (a) 5 m (anemometro sonico), (b) 80 m (SODAR), (c) 136 m (SODAR), (d) 193 m (SODAR).

ESTATE: al suolo (a) si osservano venti prevalenti dal settore centrato a 90° (E) (brezza di terra) e da O, SO (debole brezza di mare di ridotta estensione lungo la verticale e flussi alla scala locale modificati dalla orografia). Questi venti sono poco intensi e caratterizzati da velocità inferiori a 6 ms^{-1} .

Sia il fronte della brezza di mare che di terra in considerazione della vicinanza del sito di misura dal mare hanno uno spessore molto ridotto il quale investe uno strato di atmosfera inferiore ad 80 m. Sopra questa quota (Figure 37c,d) i flussi osservati sono quelli alla scala sinottica modulati, sia in intensità che direzione dalla orografia locale.

4. STATISTICA STAGIONALE DEI PRINCIPALI PARAMETRI METEOROLOGICI

Utilizzando le misure meteorologiche rilevate dai sensori presenti nella stazione MICROMETEOROLOGICA è stata calcolata la statistica delle principali grandezze meteorologiche su base stagionale. Le Figure 38-40 mostrano l'istogramma della temperatura (a), della velocità del vento (b), della pressione al suolo (c), e dell'umidità relativa per l'inverno (Figura 38), la primavera (Figura 39), l'estate (Figura 40). I valori medi, massimi e minimi per ogni grandezza sono riportati all'interno del riquadro di ogni grafico.

Tarquinia; year: 01/12/2015 - 29/02/2016, hours: 00-24

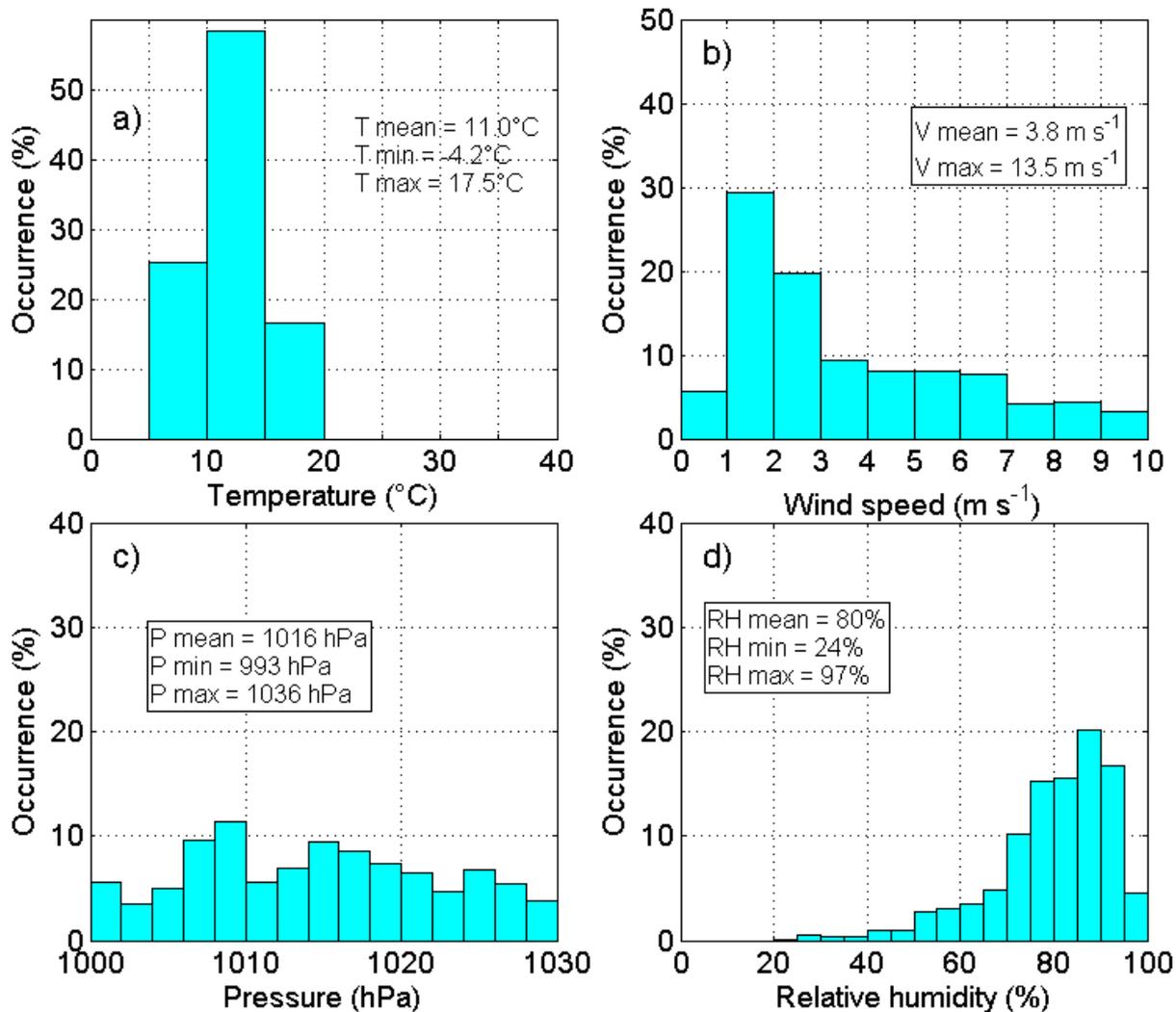


Figura 38. INVERNO: istogrammi della temperatura (a), velocità del vento (b), pressione al suolo (c), umidità relativa (d).

INVERNO

Temperatura: la temperatura (a) mostra come valori più probabili quelli distribuiti nell'intervallo 10° - 15°C (per circa il 60% dei casi).

Velocità e direzione del vento: sono osservati valori della velocità del vento prevalentemente tra 1-3 m s⁻¹ corrispondenti alla brezza di terra. I valori più intensi si hanno in corrispondenza della circolazione a scala sinottica.

Pressione: la pressione (c) varia tra 1000 - 1020 hPa.

Umidità relativa: l'umidità relativa (d) varia tra 60% - 90%.

Tarquinia; year: 2016, days: 01/03-31/05, hours: 00-24

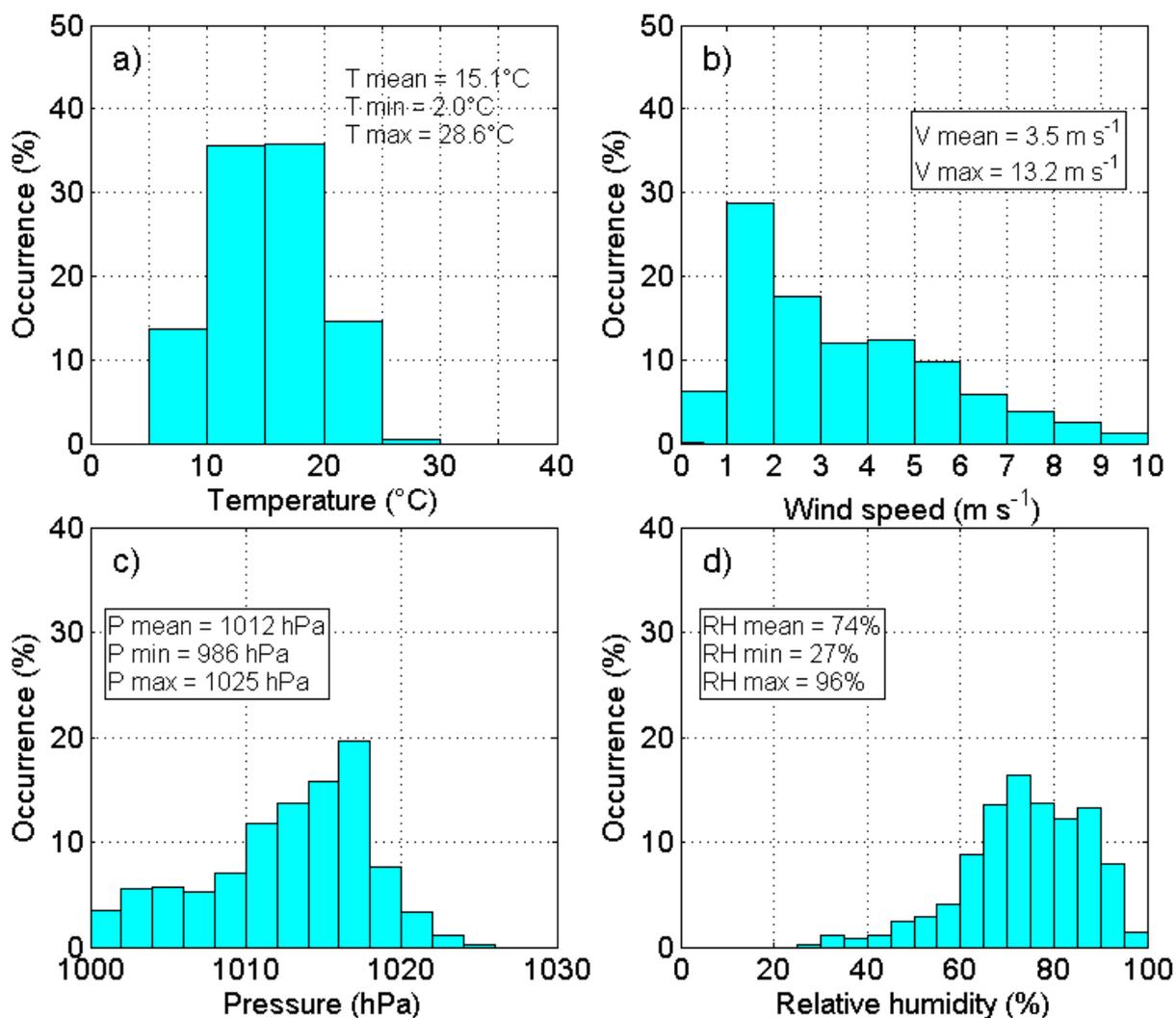


Figura 39. PRIMAVERA: istogrammi della temperatura (a), velocità del vento (b), pressione al suolo (c), umidità relativa (d).

PRIMAVERA

Temperatura: la temperatura (a) mostra come valori più probabili quelli tra 10° e 20°C.

Velocità e direzione del vento: sono osservati valori della velocità del vento prevalentemente tra 1-5 m s⁻¹ corrispondenti alla brezza di terra. I valori più intensi si hanno in corrispondenza della circolazione a scala sinottica e la circolazione di brezza.

Pressione: la pressione (c) varia tra 1000 - 1030 hPa.

Umidità relativa: l'umidità relativa (d) varia tra 60% - 90%.

Tarquinia; year: 2016, days: 01/06-31/08, hours: 00-24

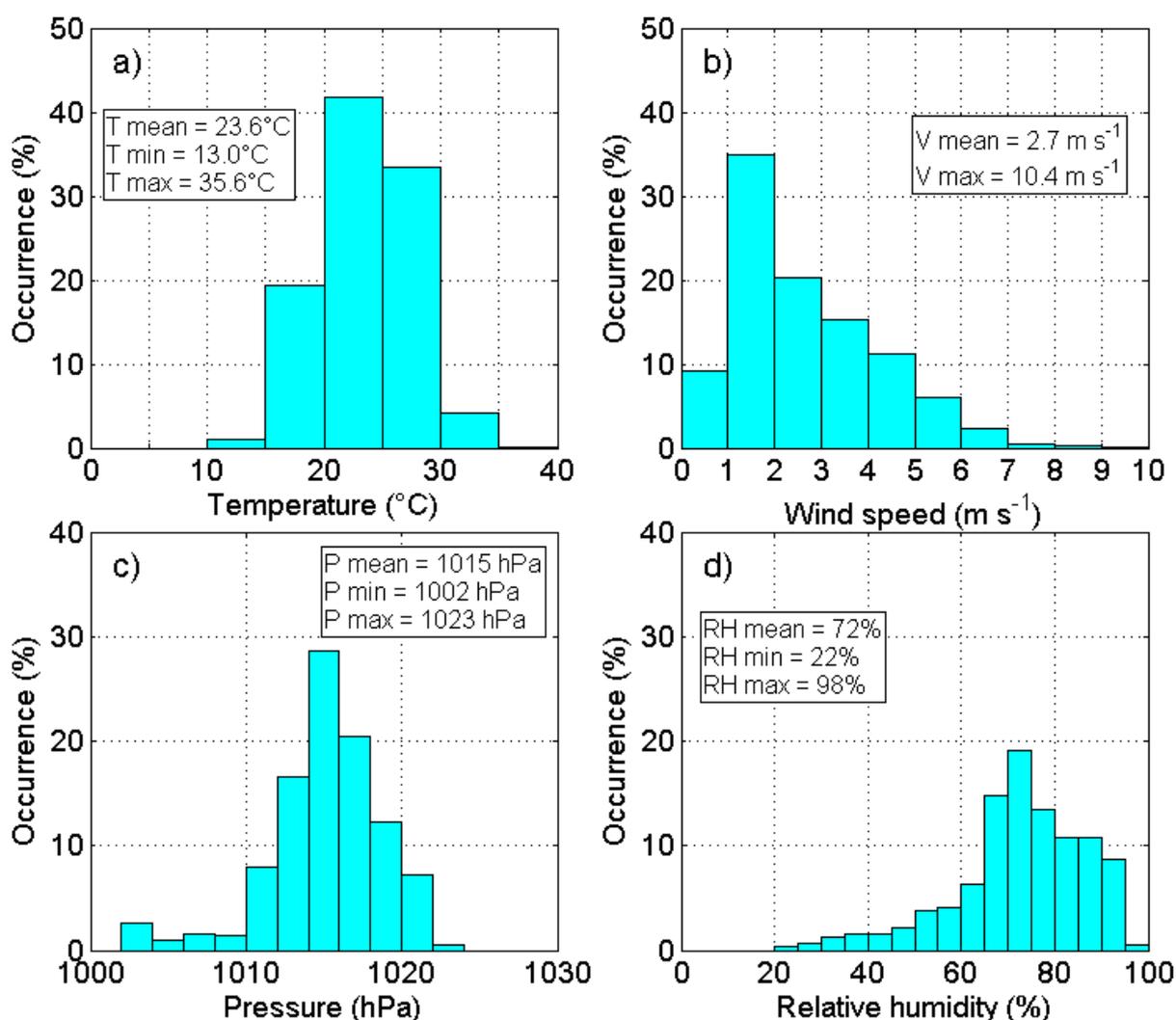


Figura 40. ESTATE: istogrammi della temperatura (a), velocità del vento (b), pressione al suolo (c), umidità relativa (d).

ESTATE

Temperatura: la temperatura (a) mostra come valori più probabili quelli tra 20° - 30°C.

Velocità e direzione del vento: sono osservati valori della velocità del vento (b) prevalentemente tra 1-3 m s⁻¹ corrispondenti alla brezza di terra e valori della velocità del vento di media intensità (2-5 m s⁻¹).

Pressione: la pressione (c) varia tra 1010 - 1020 hPa.

Umidità relativa: l' umidità relativa (d) varia tra 70% - 90%.

5. DESCRIZIONE DELLA STRUTTURA TERMICA DELL' ATMOSFERA ED ALTEZZA DELLO STRATO RIMESCOLATO

Le tracce dell' eco retrodiffuso dal SODAR alle diverse quote, poste in maniera sequenziale sull' asse del tempo, mostrano l' evoluzione della struttura termica dello strato limite atmosferico e quindi le condizioni di stabilità della atmosfera. Per studiare le condizioni di stabilità della atmosfera si utilizza generalmente il profilo della temperatura potenziale. Temperatura potenziale decrescente con la quota (Figure 41a,b) indica condizioni di instabilità termica. L' andamento mostrato nella Figura 41c, identifica un andamento del gradiente della temperatura esattamente uguale a quello del gradiente adiabatico secco (condizione di neutralità termica, ovvero diminuzione

della temperatura di circa $1^\circ/100$ m). Temperatura potenziale crescente con la quota indica condizioni di stabilità termica (Figure 41d,e).

I profili di temperatura potenziale non sono generalmente disponibili con la frequenza temporale necessaria a monitorare in maniera continuativa la struttura termica dell'atmosfera, ma possono essere messi in relazione con la struttura termica dell'atmosfera registrata dal SODAR, che è invece in grado di funzionare in modo automatico e continuo.

Per offrire uno strumento interpretativo dei facsimile registrati dal SODAR (disponibili nella sezione "Documenti e dati" del sito LACOST) mostriamo, a titolo puramente esemplificativo, i profili di temperatura potenziale compatibili con le diverse strutture termiche. Nelle Figure 41 a-e sono riportati i profili della temperatura potenziale e la corrispondente struttura termica dell'atmosfera mostrata dal SODAR nei casi più frequentemente osservati.

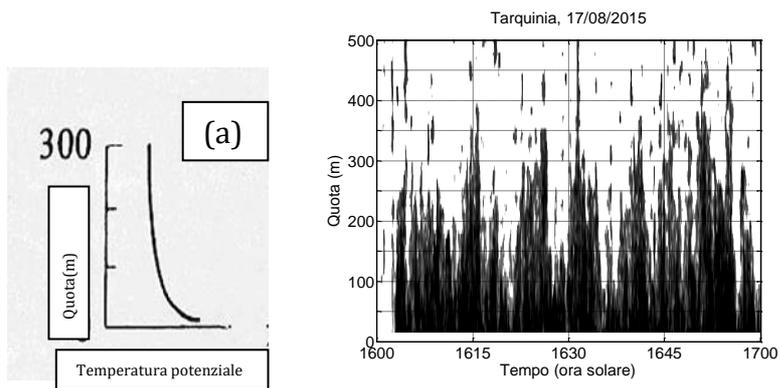


Figura 41 (a) Convezione. Si osserva in condizioni di forte instabilità termica su terra nelle ore più calde del giorno.

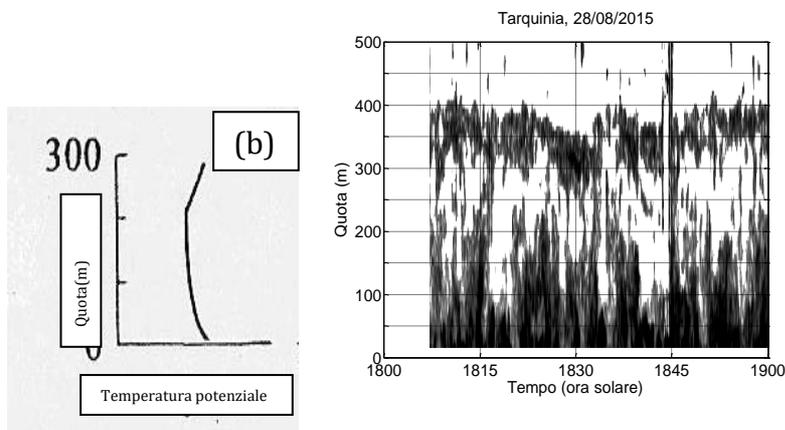


Figura 41 (b) Convezione. Si osserva in condizioni di forte instabilità termica su terra nelle ore più calde del giorno. Le piume convettive sono limitate in alto da una inversione di temperatura tra 300 - 400 m.

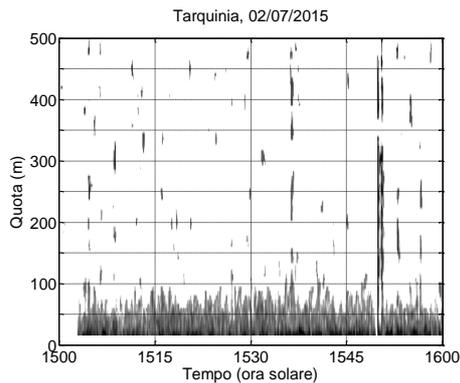
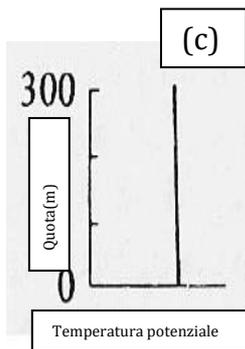


Figura 41 (c) Neutralità termica. Si osserva in condizione di neutralità dell'atmosfera. In condizioni di alta pressione (assenza di copertura nuvolosa), costituisce uno stato di transizione verso la stabilità o viceversa (alba/tramonto). In presenza di copertura nuvolosa si può osservare

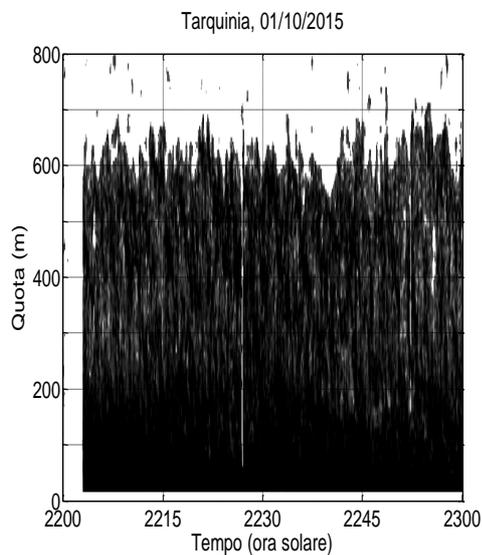
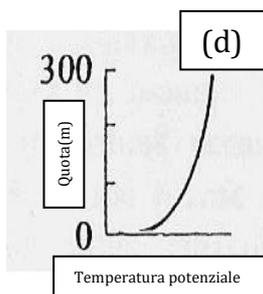


Figura 41 (d) Inversione termica. Tipicamente si osserva di notte in presenza di condizioni anticicloniche. In queste condizioni la dispersione verticale è ridotta praticamente a zero dalla forte stabilità. Negli strati superiori a 300 m sono visibili onde di gravità associabili ad instabilità di Kelvin-Helmholtz.

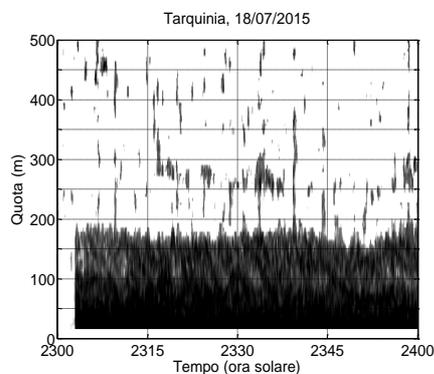
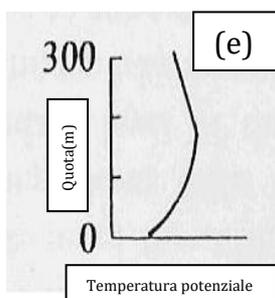


Figura 41 (e) Inversione termica a bassa quota. Si osserva in serata, quando il raffreddamento radiativo del suolo produce l'inversione termica.

L'altezza dello strato rimescolato (MLH) può essere stimata da considerazioni su forma ed intensità del segnale SODAR ricevuto, con l'ausilio dei parametri meteorologici e micrometeorologici a disposizione. E' un tipo di analisi effettuabile al massimo in modo semi-automatico, e richiede comunque l'osservazione profilo per profilo da parte di un operatore esperto.

La Figura 42 mostra, a titolo di esempio, la determinazione della MLH per una giornata tipo, effettuata su medie dei profili di backscattering del SODAR pari a 20 minuti.

L'attività convettiva, associata a vortici turbolenti dell'ordine del centinaio di metri, inizia tra le 9 e le 10 LST e termina attorno alle 22 LST. La circolazione di brezza, che inizia attorno alle 8 LST, e il conseguente trasporto di area marina più fredda ed umida sulla terraferma, impedisce allo strato turbolento di raggiungere le dimensioni stagionali caratteristiche di queste latitudini, che si attestano solitamente attorno ai 1500 m, e lo confina al di sotto dei 500 m di quota. La parte di facsimile precedente alle 9 LST e successiva alle 22 LST evidenzia invece vortici di dimensioni molto più modeste, caratteristici dell'attività turbolenta di tipo esclusivamente meccanico (prodotta cioè dalla sola interazione terra-aria) ed associati a valori di MLH costantemente al di sotto dei 200 m.

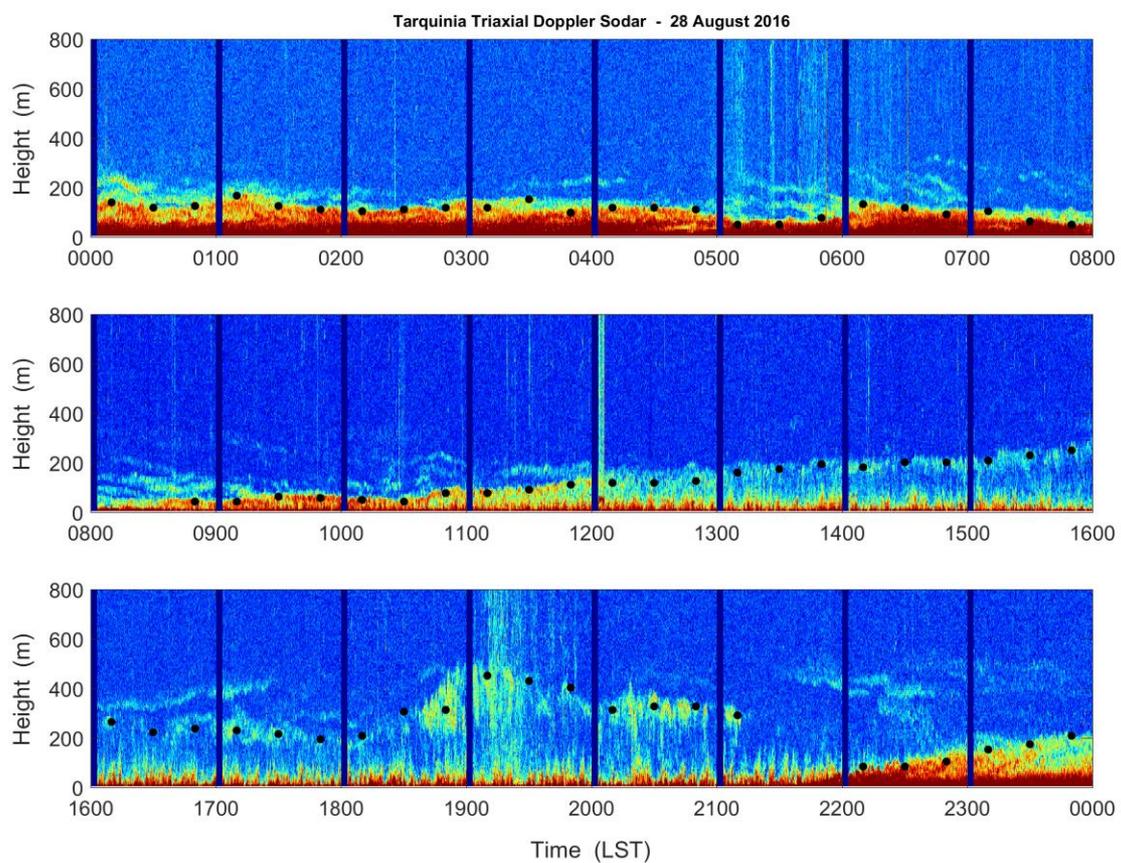


Figura 42. Facsimile SODAR del 28 agosto 2016, con sovrapposizione (punti neri) la MLH. La scala di colori è relativa e va dal blu al rosso in funzione crescente dell'intensità.

La particolare condizione geografica di LACOST fa sì che l'andamento tipo della Figura 42 sia generalmente complicato dalla presenza dell'orografia e dalla vicinanza al mare. Per queste ragioni, i dati illustrati nel seguito si riferiscono a 36 giorni nel corso del 2016, scelti, tra quelli per cui la stima della MLH era affidabile e sicura, in modo da caratterizzare sufficientemente la stagionalità del sito. I casi non riportati sono comunque in linea sia con quelli descritti che con i risultati ottenuti.

Le Figure 43, 44 e 45 riportano, su base stagionale, la MLH calcolata per questi 36 giorni (pannello 1) e l'andamento stagionale dei principali parametri meteorologici e micrometeorologici (pannelli 2-4). Il pannello 5, infine, riporta la MLH determinata nell'arco delle 24 h in tutti i giorni disponibili, in modo da mettere in risalto sia i due diversi tipi di strato (convettivo e stabile) che le relative quote raggiunte.

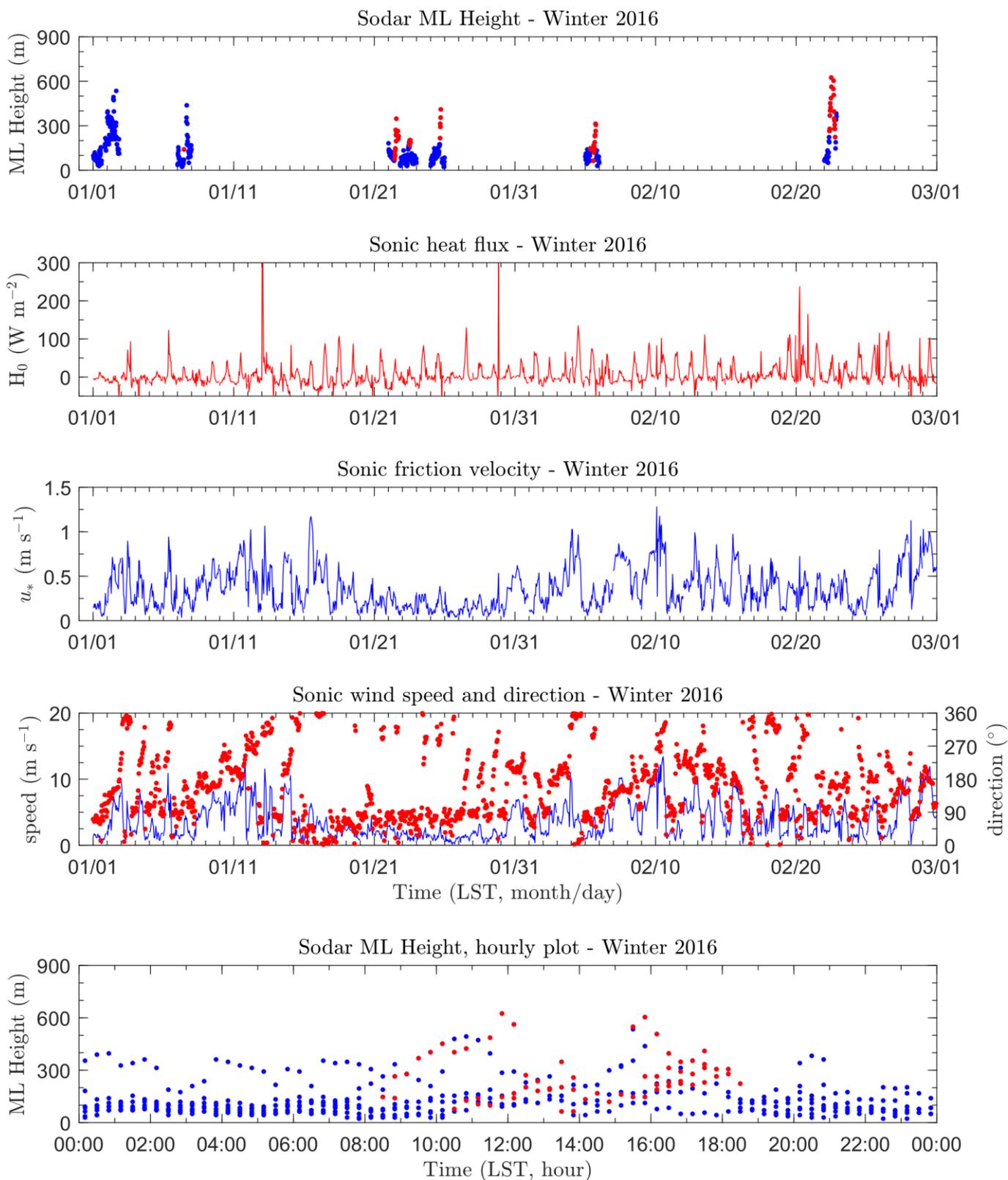


Figura 43. Rappresentazione della MLH calcolata per alcune giornate tipo e dei principali parametri meteo e micrometeorologici relativi alla stagione invernale. Pannello 1: MLH in funzione del tempo (mese/anno); in rosso le determinazioni associate ad uno strato convettivo, in blu quelle relative, invece, a uno stabile. Pannello 2: flusso di calore sensibile in funzione del tempo. Pannello 3: velocità di attrito in funzione del tempo. Pannello 4: velocità (linea continua blu) e direzione (punti rossi) del vento misurata da sonico posto a 5 m dal suolo. Pannello 5: medesimi valori della MLH mostrati nel pannello 1, rappresentati in funzione dell'ora del giorno.

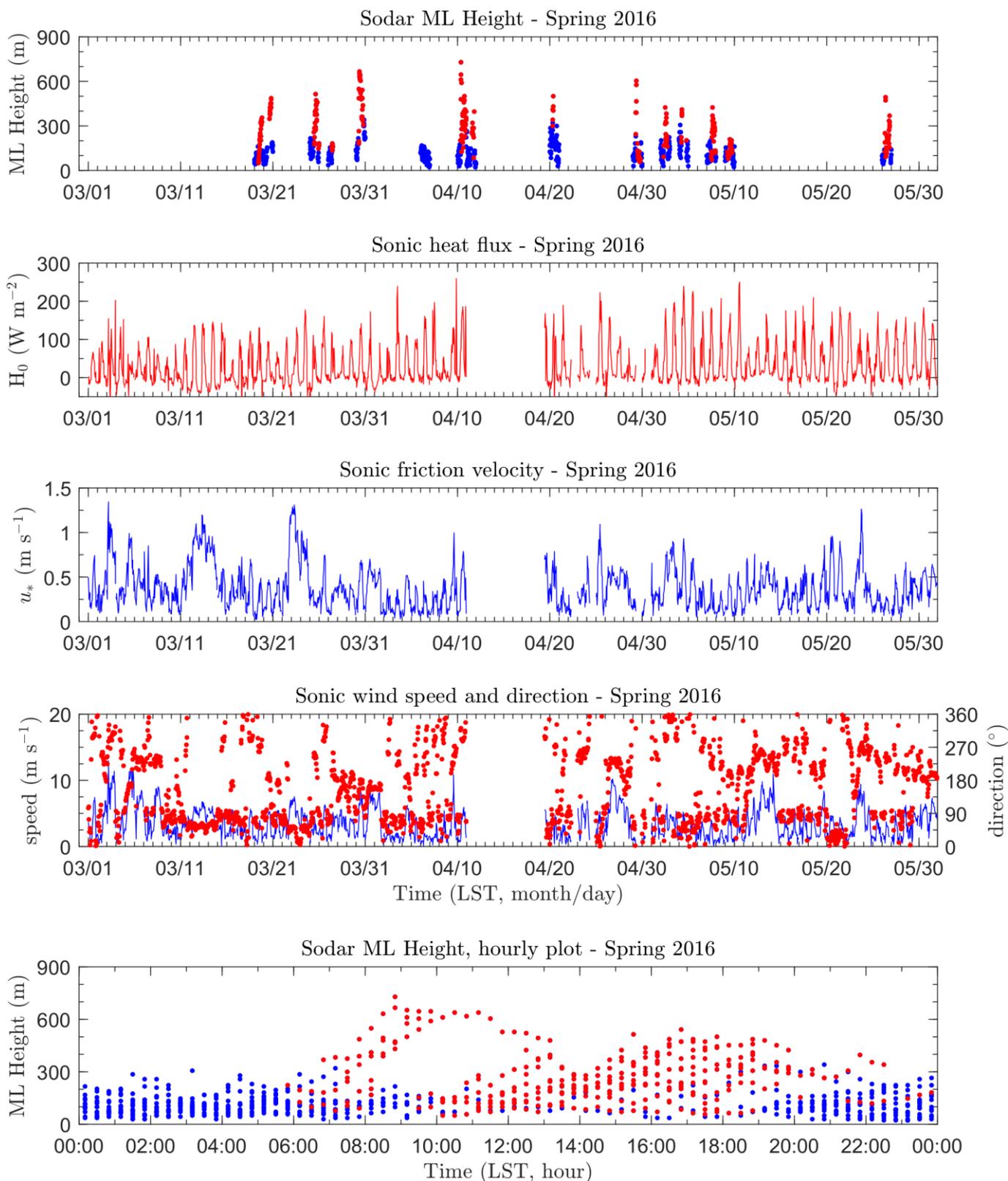


Figura 44. Rappresentazione della MLH calcolata per alcune giornate tipo e dei principali parametri meteo e micrometeorologici relativi alla stagione primaverile. Pannello 1: MLH in funzione del tempo (mese/anno); in rosso le determinazioni associate ad uno strato convettivo, in blu quelle relative, invece, a uno stabile. Pannello 2: flusso di calore sensibile in funzione del tempo. Pannello 3: velocità di attrito in funzione del tempo. Pannello 4: velocità (linea continua blu) e direzione (punti rossi) del vento misurata da sonico posto a 5 m dal suolo. Pannello 5: medesimi valori della MLH mostrati nel pannello 1, rappresentati in funzione dell'ora del giorno.

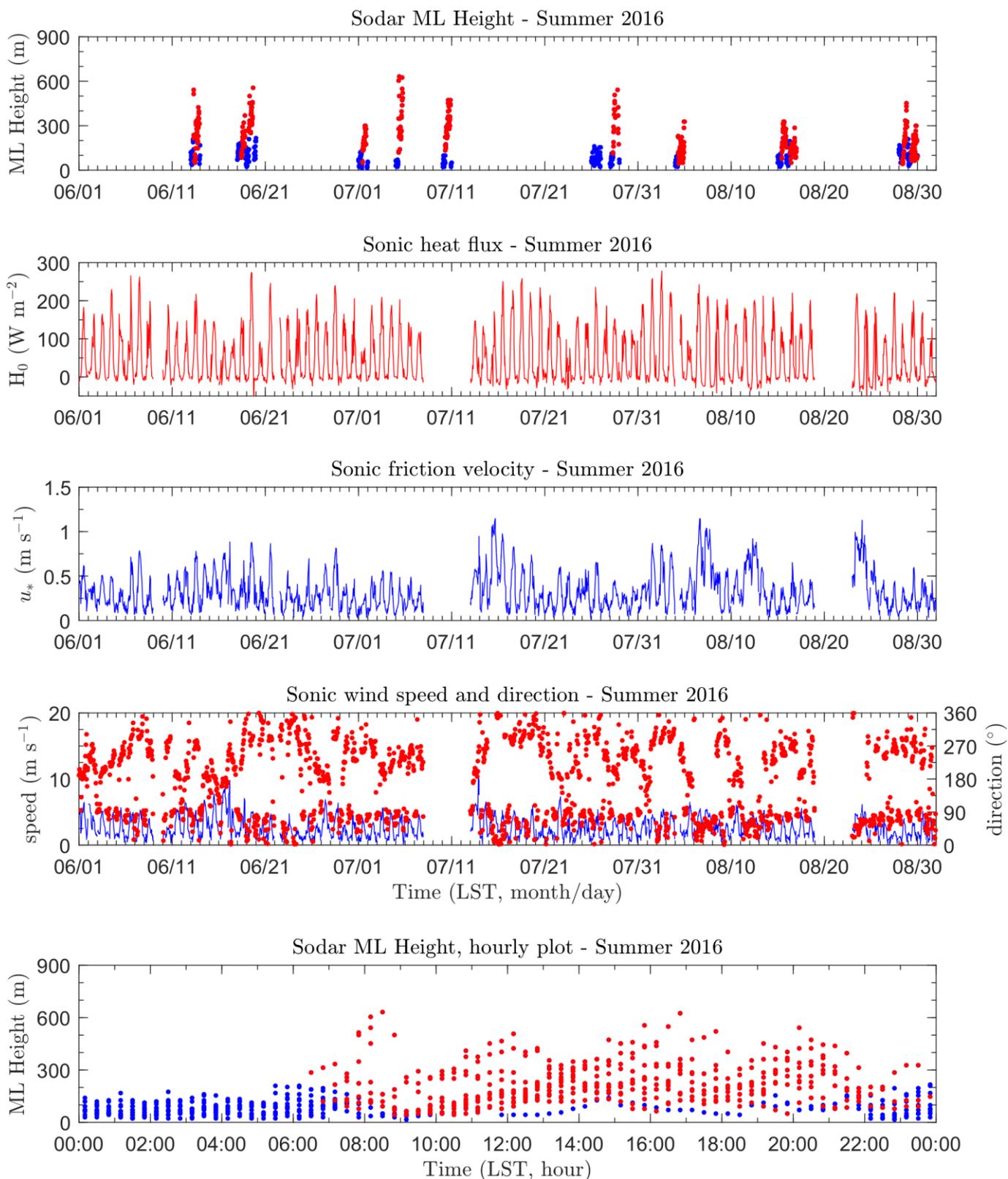


Figura 45. Rappresentazione della MLH calcolata per alcune giornate tipo e dei principali parametri meteo e micrometeorologici relativi alla stagione primaverile. Pannello 1: MLH in funzione del tempo (mese/anno); in rosso le determinazioni associate ad uno strato convettivo, in blu quelle relative, invece, a uno stabile. Pannello 2: flusso di calore sensibile in funzione del tempo. Pannello 3: velocità di attrito in funzione del tempo. Pannello 4: velocità (linea continua blu) e direzione (punti rossi) del vento misurata da sonico posto a 5 m dal suolo. Pannello 5: medesimi valori della MLH mostrati nel pannello 1, rappresentati in funzione dell'ora del giorno.

In linea generale, è possibile notare come l'attività convettiva aumenti nel corso dell'anno (andando verso la stagione estiva e, quindi, temperature medie sempre maggiori) sia in quota massima raggiunta che in frequenza: questa evoluzione rispecchia, d'altronde, quella del flusso di calore, che durante l'estate aumenta a causa della maggiore insolazione, fino a raggiungere valori circa doppi rispetto a quelli invernali. Direzione ed intensità del vento mostrano abbastanza chiaramente un incremento dei fenomeni di brezza durante l'estate, che indeboliscono i flussi di calore limitando, di conseguenza, lo sviluppo dello strato convettivo, che nei casi analizzati non raggiunge quasi mai quote superiori ai 600 m.

Quasi nulla è invece l'evoluzione stagionale della MLH relativa allo strato stabile: in questo caso, infatti, la forzante maggiore è la velocità di attrito, che dipende essenzialmente dalla velocità del vento, caratterizzata da una evoluzione stagionale molto poco marcata.

6. SOMMARIO e CONCLUSIONI

Un laboratorio permanente per il monitoraggio atmosferico è stato realizzato sulla costa tirrenica in prossimità della riserva naturale delle Saline di Tarquinia (VT). Il laboratorio, denominato LACOST (Laboratorio Atmosferico COstiero Saline di Tarquinia), si avvale di strumentazione avanzata di remote sensing da terra (SODAR), strumentazione al suolo per la misura della turbolenza atmosferica (anemometro sonico), radiometri per la misura delle componenti radiative della radiazione visibile ed infrarossa. Particolarità di questo laboratorio "open air" la possibilità di monitorare in maniera continuativa, e senza intervento di un operatore, il campo del vento dallo strato superficiale fino ad una quota di circa 800 m, e registrare la struttura termica dell'atmosfera. Misure complementari delle forzanti "turbolenti" generate alla superficie e del bilancio radiativo vengono effettuate con un anemometro sonico e radiometri.

Dalla analisi delle misure emerge chiaramente che velocità e direzione del vento subiscono una variazione significativa con la quota. Pertanto è utile, e necessario, disporre dell'intero profilo verticale di queste variabili, al fine di meglio comprendere e monitorare l'evoluzione della situazione meteorologica e micrometeorologica locale. Più in dettaglio, la velocità del vento aumenta sensibilmente con la quota, e in soli cento metri è possibile trovare anche valori 4 volte superiori a quelli misurati a terra (Figura 9 0000 - 0800 LST), accompagnati da una significativa variazione della direzione.

Durante il giorno osserviamo l'alternarsi della brezza di mare e di terra in tutte le stagioni. Questo andamento è sempre presente alla superficie. La brezza è a regime tra le 0930 LST e le 1800 LST circa, e con intensità di picco intorno alle 1500 LST (velocità massima del vento 6 ms^{-1} , velocità media di 4 ms^{-1}) e direzione prevalente nell'intervallo 240° - 300° . Durante l'inverno il fronte di brezza ha uno spessore modesto, inferiore ad 80 m. Alle quote sovrastanti prevale la circolazione sinottica, parzialmente modificata dall'orografia, in un settore adiacente a quello della brezza di mare (direzione 180°). Questa circolazione da S, responsabile dei venti di maggiore intensità, diventa prevalente soprattutto nel periodo invernale. Durante la primavera lo spessore del fronte di brezza aumenta fino a raggiungere e superare, in estate, i 190 m. La circolazione sinottica da 180° , particolarmente evidente in quota durante il periodo invernale, è meno intensa durante l'estate, quando la circolazione locale di brezza è più intensa.

La brezza di terra (centrata nel settore di provenienza 90°) è confinata in uno strato di spessore più modesto: osservabile soltanto in prossimità del terreno durante l'inverno e la primavera, arriva ad essere rilevabile in quota solo nel periodo estivo.

Durante l'inverno, in quota, sono spesso presenti venti da N per tutta la giornata, caratterizzati da intensità relativamente elevate. Durante il giorno, soprattutto d'estate, prevale una circolazione locale di brezza (direzione 240° - 300°) modulata spesso da forzanti sinottiche (estensione fino al settore 180°).

La brezza di mare trasporta le caratteristiche dello strato limite atmosferico marino stabile sulla terra. In considerazione della prossimità della stazione al mare, anche nelle ore più calde dei mesi di luglio ed agosto la convezione osservata è di entità due o tre volte inferiore a quella che potremo avere su un terreno con le stesse caratteristiche, ma privo dell'influenza dalla brezza. Durante l'estate la MLH non supera i 500-600 m, i valori massimi della MLH sono osservati tra le 0800 LST e le 2100 LST. La MLH osservata nello strato stabile in genere non supera 200-300 m. L'evoluzione stagionale della MLH relativa allo strato stabile è molto debole in quanto la forzante maggiore è la velocità di attrito, che dipende essenzialmente dalla velocità del vento, caratterizzata da una evoluzione stagionale molto poco marcata.

Ringraziamenti

Ringraziamo i volontari della Protezione Civile di Tarquinia per aver fornito supporto logistico nella realizzazione del LACOST. Ringraziamo il Comune di Tarquinia per l'ospitalità presso le strutture del Comune. Un ringraziamento particolare va inoltre al personale del Consorzio per la Gestione dell'Osservatorio Ambientale per aver reso possibile LACOST ed averci supportato validamente in tutte le fasi di questo progetto.