

Confronto stime-misure

L'approccio modellistico adottato per la stima del campo di vento ha previsto, nella fase di configurazione del modello CALMET utilizzato per il downscaling, una verifica delle stime di vento prodotte, attraverso il confronto con i corrispondenti dati di vento misurati; la verifica è stata poi estesa all'intero periodo di simulazione, il quadriennio 2004-2007.

Nonostante la presenza di numerose stazioni meteorologiche sul territorio regionale, da un attento esame dei dati di vento misurati nel periodo di interesse, sono state scelte soltanto sette stazioni, sulla base delle caratteristiche dell'anemometro e dei tempi di misura: in effetti molte stazioni sono state scartate a causa dell'altezza dell'anemometro (ad es. 3 m s.l.s.) o della modalità di misura (ad es. misura mediata su alcuni minuti, ma registrata su base trioraria o esaoraria). La verifica è stata condotta sulla velocità del vento stimata su base oraria al primo livello, 10 m s.l.s., in quanto non erano disponibili misure in quota nel periodo di interesse.

Tab. 1 – Caratteristiche delle stazioni prese in esame.

NOME	PROV.	PERIODO	LATITUDINE	LONGITUDINE
SESTO FIORENTINO	FI	04/06/2003 - 31/12/2007	11.202	43.819
XIMENIANO	FI	16/07/2004 - 03/12/2007	11.256	43.778
LIVORNO	LI	25/11/2003 - 31/12/2007	10.305	43.547
GROSSETO	GR	04/11/2004 - 31/12/2007	11.100	42.792
PIOMBINO	LI	10/12/2004 - 31/12/2007	10.583	42.925
FOLLONICA	GR	11/11/2005 - 31/12/2007	10.767	42.935
CARRARA	MS	06/04/2005 - 31/12/2007	10.048	44.037

Nella tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche delle stazioni meteo selezionate; per ciascuno dei sette siti sono state prese in esame le serie storiche della velocità del vento stimata dal modello CALMET (2 Km) e dal modello WRF (10 Km), in modo da evidenziare i miglioramenti apportati dal processo di downscaling.

In prima battuta, per ciascuno dei sette siti selezionati, sono state confrontate la serie storica dei dati di velocità del vento misurati (in seguito indicata come *VV_ST*), la serie storica delle stime ottenute da WRF (indicata come *VV_WRF*) ed infine la serie storica delle stime ottenute da CALMET (indicata come *VV_CAL*). Le

serie storiche di stime e misure su base oraria sono state poi elaborate per ottenere valori mediati su base giornaliera e su base mensile, in modo da poter effettuare un confronto anche con serie storiche di dati accorpati.

Sono stati inoltre elaborati alcuni indicatori statistici, quali coefficiente di correlazione (indicato con ρ), *BIAS* e *RMSE*, di cui sono riportate le formule.

$$\rho(Y, O) = \frac{1}{\sigma_y \sigma_o} \text{COV}(Y, O)$$

$$\text{COV}(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - \mu_y)(o_m - \mu_o)$$

$$\text{BIAS}(Y, O) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (y_m - o_m)^2}$$

dove:

- Y : valori stimati;
- O : valori misurati;
- M : numero di valori utilizzati.

Il coefficiente di correlazione ρ può variare tra -1 e 1; per valori prossimi ad 1 si ha un ottimo accordo tra i valori stimati e misurati, per valori vicini a 0 le stime sono in totale disaccordo con le misure, per valori prossimi a -1 stime e misure sono anticorrelate. Il *BIAS* rappresenta l'errore medio e fornisce indicazioni relative a sovrastime o sottostime del modello. Valori di *BIAS* positivi indicano una sovrastima del modello rispetto ai parametri previsti, mentre valori negativi indicano una sottostima. Valori prossimi a zero indicano che non vi è né sovrastima né sottostima mediamente, ma questo potrebbe essere il risultato del reciproco annullamento di errori in eccesso o in difetto (anche grandi in valore assoluto). In questo senso è utile ricorrere al calcolo del *RMSE*, che invece evidenzia l'ampiezza media dell'errore in valore assoluto.

In ultimo, la base dati oraria è stata elaborata in modo da raffrontare stime e misure di velocità del vento in termini di classi di frequenza, che, in ultima analisi, risulta la verifica più significativa ai fini della stima della producibilità eolica. Per motivi di sintesi verranno commentati i grafici delle serie storiche di due soli siti, Sesto Fiorentino e Piombino, in quanto considerazioni del tutto analoghe possono essere fatte per gli altri siti, mentre gli indici statistici e i grafici delle classi di frequenza verranno riportati per tutti i siti.

1. Analisi delle serie storiche

Sesto Fiorentino - Da una prima analisi delle serie storiche orarie, confrontate in Fig. 1 (per motivi di sintesi è riportato unicamente il bimestre giugno – luglio 2007) si nota come la velocità del vento stimata da WRF (in rosa), pur riproducendo in modo discreto l'andamento temporale della serie relativa ai dati misurati (in blu), è decisamente maggiore, raggiungendo picchi dell'ordine di 8 m/s, rispetto a valori massimi misurati dell'ordine di 4 m/s; le stime prodotte da CALMET (in giallo) sono in maggior accordo con i dati misurati ed evidenziano i miglioramenti apportati dal processo di downscaling.

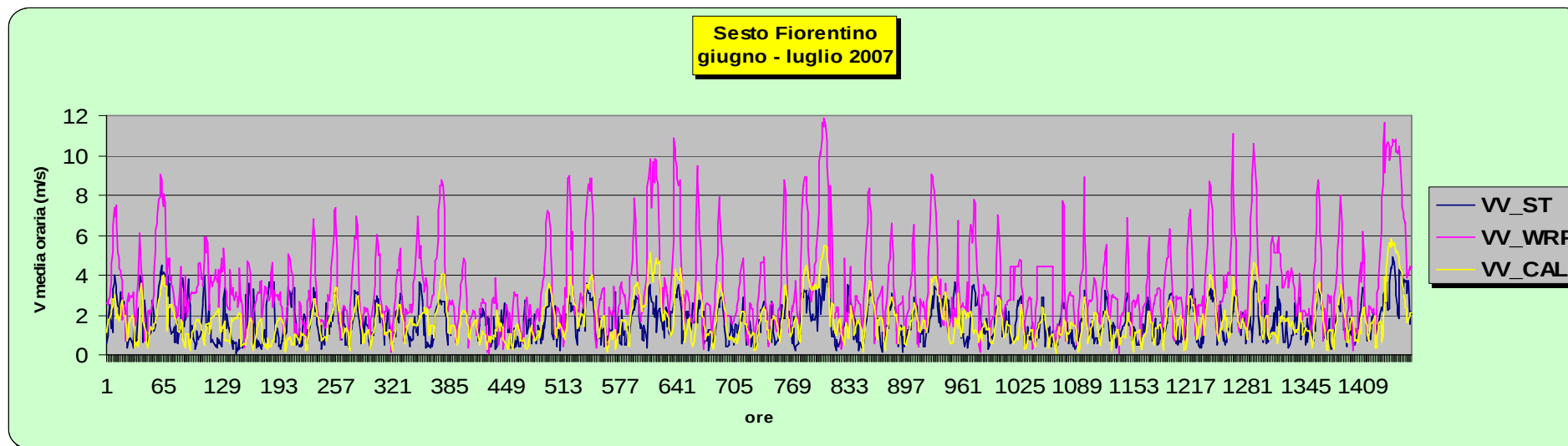


Fig. 1 – Serie storica su base oraria delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Sesto Fiorentino.

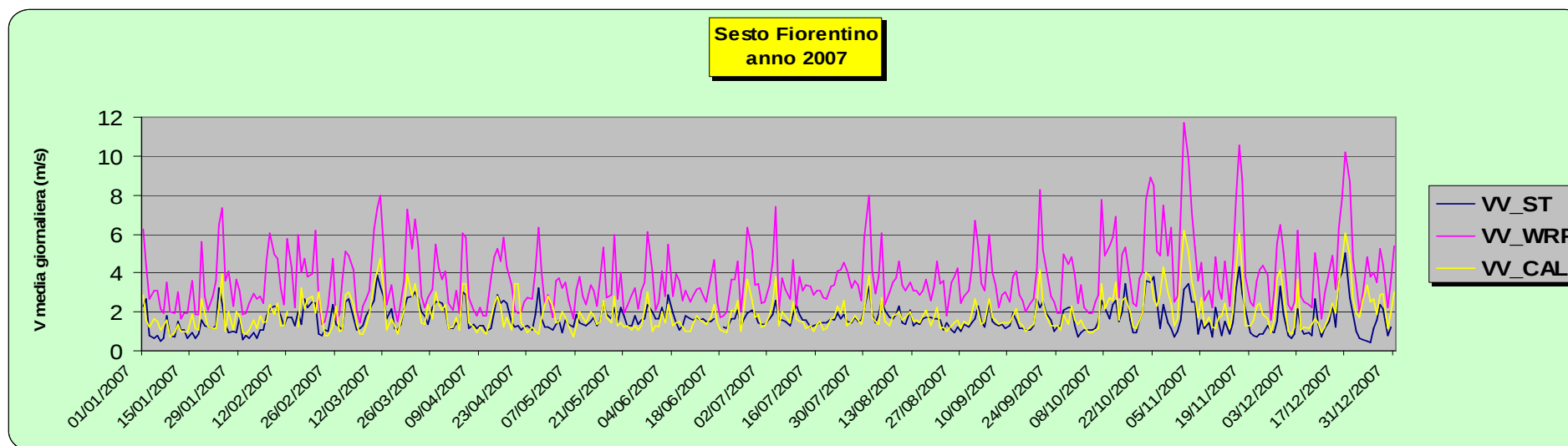


Fig. 2 – Serie storica su base giornaliera delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Sesto Fiorentino.

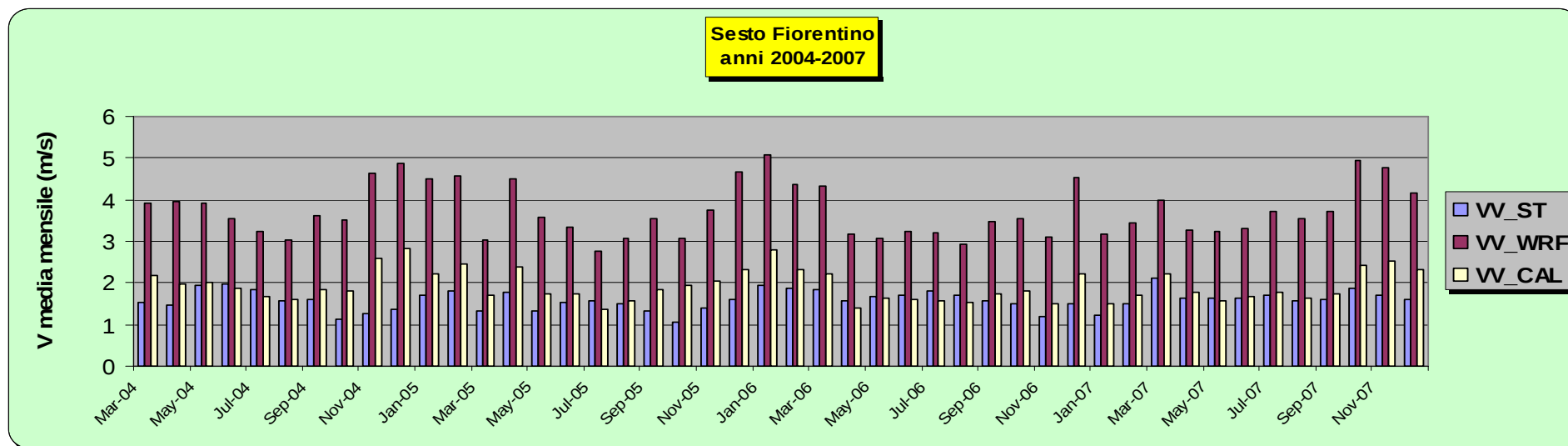


Fig. 3 – Serie storica su base mensile delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Sesto Fiorentino.

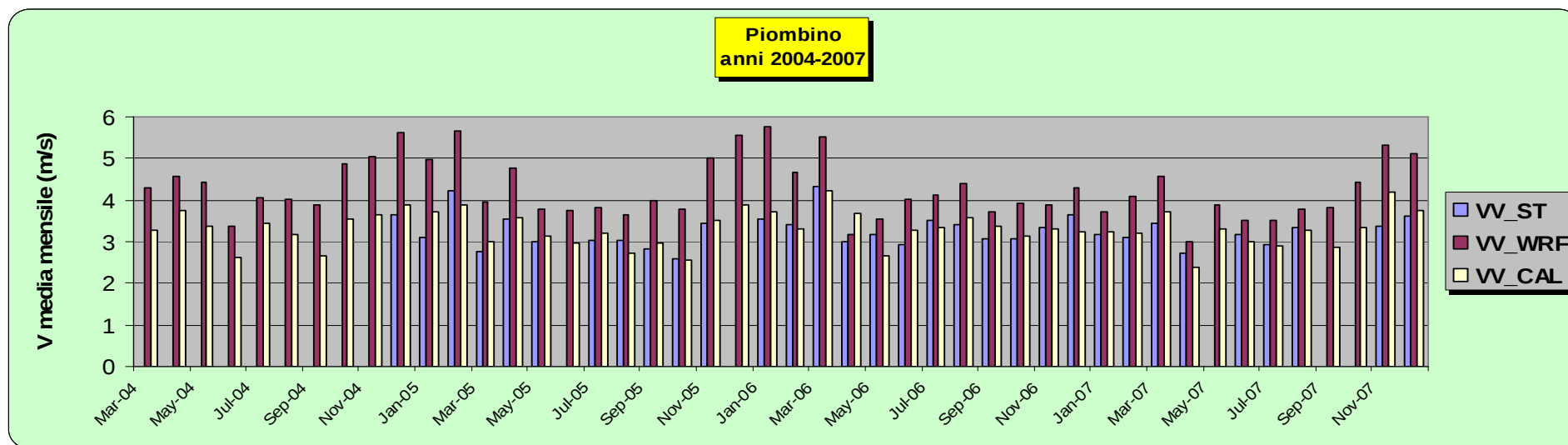


Fig. 4 – Serie storica su base mensile delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Piombino.

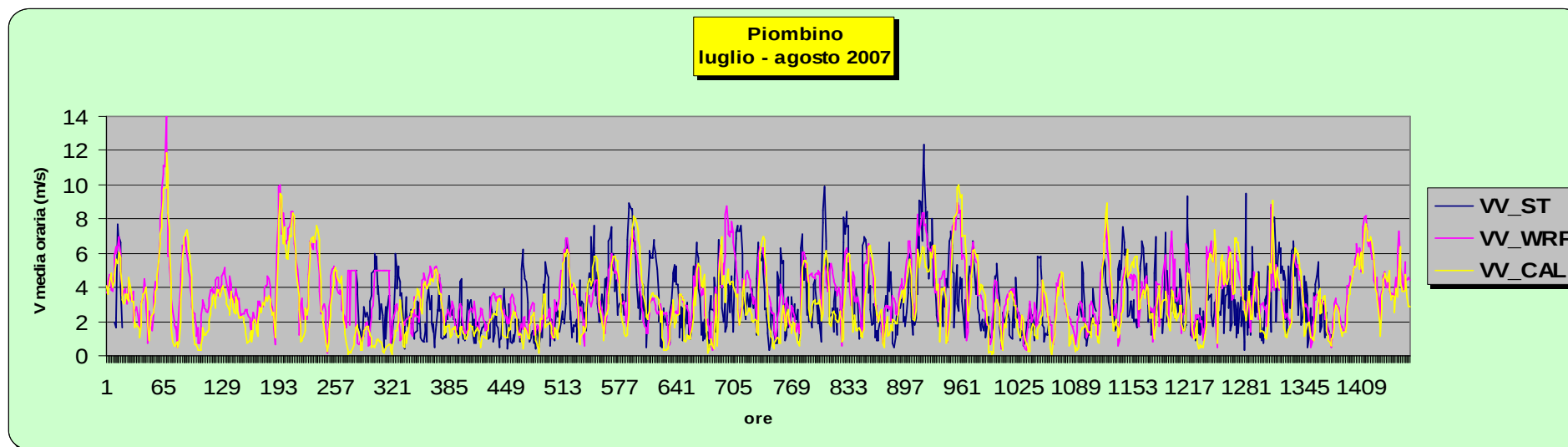


Fig. 5 – Serie storica su base oraria delle misure di velocità del vento(VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Piombino.

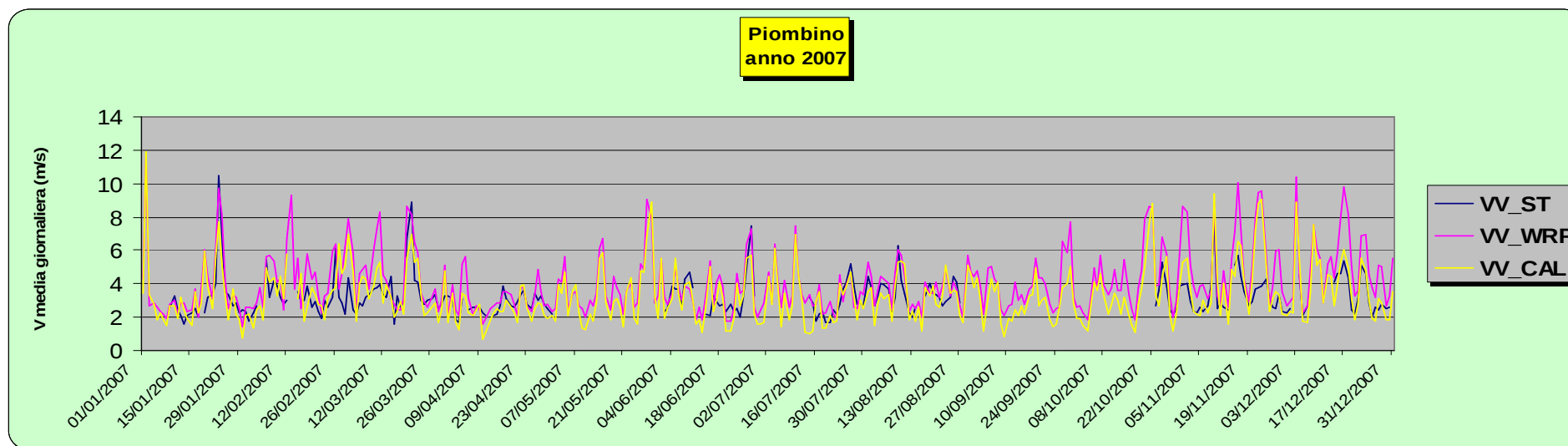


Fig. 6 – Serie storica su base giornaliera delle misure di velocità del vento(VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Piombino.

L'accordo tra stime ottenute da CALMET e misure migliora ulteriormente considerando le serie ottenute dai dati accorpati, in termini di medie giornaliere (Fig. 2, in cui è riportato il grafico dell'intero anno 2007) e di medie mensili (Fig. 3, relativa all'intero periodo esaminato, il quadriennio 2004 – 2007). In particolare, si può notare come la stima della velocità media mensile ottenuta da CALMET sia in generale in accordo con i dati misurati, evidenziando una limitata sovrastima nei mesi invernali e un ottimo accordo nella restante parte dell'anno; viceversa, le stime ottenute da WRF sono sempre decisamente maggiori rispetto ai dati misurati.

Considerazioni del tutto analoghe possono essere fatte per l'altro sito collocato nell'entroterra, Firenze-Ximeniano.

Piombino – In generale, nei siti costieri l'effetto dovuto al downscaling è minore, come si può notare confrontando le stime di velocità del vento prodotte da WRF e da CALMET nel sito di Piombino (Figg. 4-6). In termini di velocità media mensile (Fig. 4), WRF sovrastima, soprattutto nei mesi invernali, mentre CALMET riproduce discretamente i valori misurati. Le serie storiche della velocità media giornaliera e oraria evidenziano comunque un buon accordo tra le stime dei due modelli, mentre si nota una minore correlazione, soprattutto a livello orario, con i dati misurati. In linea di massima, nei siti costieri presi in esame, le stime di WRF riproducono discretamente l'andamento dei valori misurati, mentre il contributo del modello CALMET risulta limitato ad una generale diminuzione del modulo della velocità, diminuzione meno marcata di quanto accade nei siti dell'entroterra.

Per completare l'analisi delle serie storiche, nella seguente tabella vengono riportati i valori di velocità media, correlazione ρ , *BIAS*, *RMSE*, numero di dati utilizzati per elaborare gli indici statistici, relativi a tutti i siti presi in esame; gli indici statistici sono stati elaborati per confrontare le stime orarie dei modelli e i dati misurati e sono indicati con *ST-WRF* nel caso che si considerino le stime di WRF, con *ST-CAL* per le stime ottenute da CALMET.

In generale si nota una significativa sovrastima da parte del modello WRF rispetto ai dati misurati, sia guardando il valor medio che gli indici *BIAS* (sempre positivo) e *RMSE*; sempre dagli stessi indici si nota un miglior accordo tra le stime di CALMET e le misure, sebbene il miglioramento sia più marcato nei due siti dell'entroterra rispetto a quelli costieri (riduzione di *BIAS* e di *RMSE*). Il coefficiente di correlazione evidenzia l'accordo tra gli andamenti temporali delle serie storiche e non è influenzato da sovrastime o sottostime sistematiche. Considerando che si tratta di valori orari,

questo indicatore è in generale discreto per i primi cinque siti, scarso per Follonica e Carrara; da notare che si registrano valori più alti, e quindi migliori, per le stime di WRF rispetto a quelli ottenuti per le stime di CALMET.

Tab. 2 – Valori di velocità media, correlazione ρ , BIAS, RMSE per ciascun sito considerato.

INDICATORE	Sesto	Ximen.	Piomb.	Liv.	Gross.	Foll.	Carr.
n° dati	33427	27048	21064	31642	26096	13593	21928
V media WRF	3.72	3.91	4.27	4.17	4.76	4.26	3.22
V media CAL	1.92	2.00	3.31	3.20	2.79	2.96	2.97
V media ST	1.59	2.17	3.30	3.28	1.63	2.21	2.15
ρ ST-WRF	0.59	0.51	0.49	0.60	0.46	0.54	0.24
RMSE ST-WRF	2.82	2.60	2.53	2.30	4.08	2.99	2.30
BIAS ST-WRF	2.12	1.67	0.98	0.91	3.15	2.18	0.93
ρ ST-CAL	0.48	0.49	0.41	0.52	0.53	0.31	0.15
RMSE ST-CAL	1.38	1.22	2.33	2.11	1.99	2.00	2.50
BIAS ST-CAL	0.33	-0.22	0.07	-0.06	1.20	0.74	0.80

2. Analisi delle distribuzioni di frequenza

Infine, le serie storiche su base oraria sono state elaborate in modo da raffrontare stime e misure di velocità del vento in termini di classi di frequenza, che, come già evidenziato, risulta la verifica più significativa ai fini della stima della producibilità eolica.

Di seguito, per ciascun sito sono riportati i grafici che contrappongono la distribuzione di frequenza per i dati misurati (in blu), le stime ottenute da WRF (in rosso) e da CALMET (in giallo), per il quadriennio 2004 -2007.

Osservando i grafici, si nota un marcato miglioramento apportato da CALMET per i siti di Sesto Fiorentino, di Ximeniano e, in misura minore, di Livorno, in quanto la distribuzione di frequenza della velocità del vento stimata dal modello ad alta risoluzione è molto simile a quella dei dati misurati, mentre con le stime di WRF si ottiene una distribuzione centrata su velocità maggiori e più estesa verso valori alti.

Per il sito di Piombino questo miglioramento è meno marcato, mentre per Grosseto, Follonica e soprattutto Carrara la distribuzione ottenuta dalle stime di CALMET non differisce di molto da quella ottenuta con le stime di WRF.

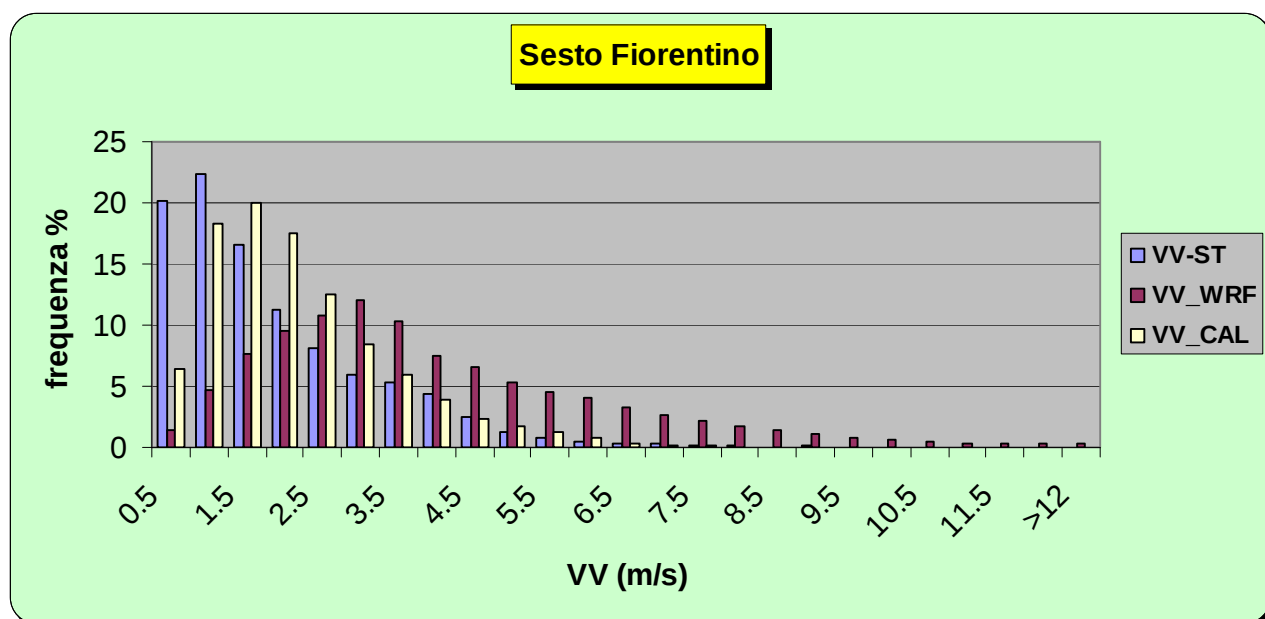


Fig. 7 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Sesto Fiorentino.

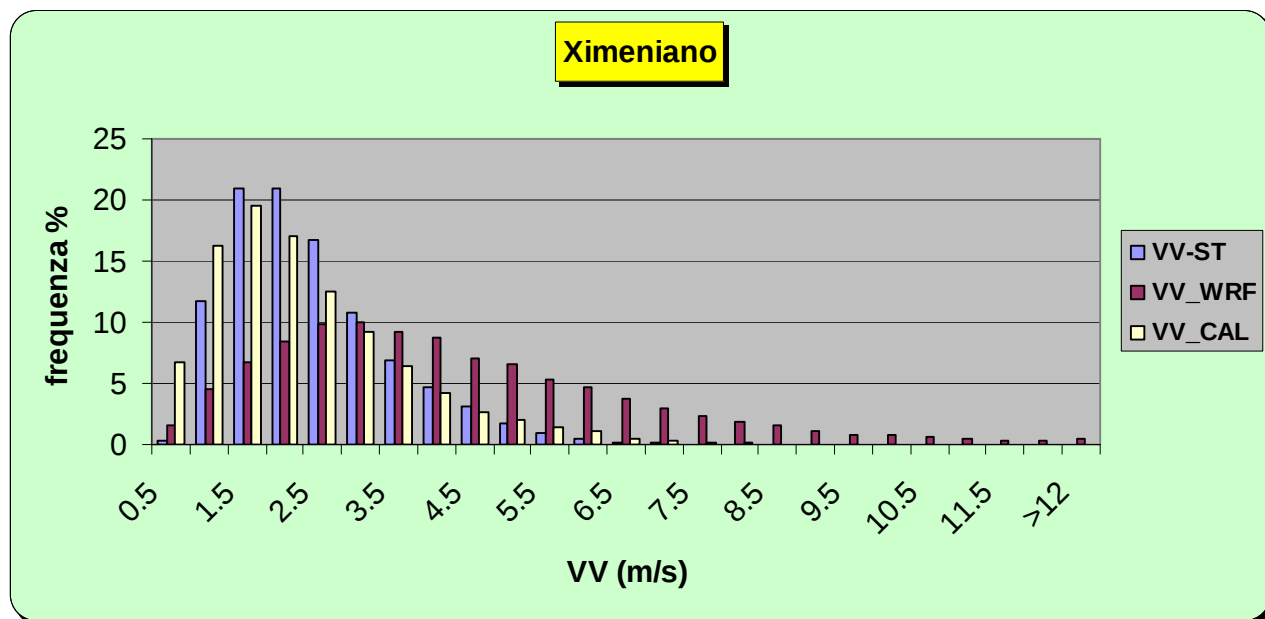


Fig. 8 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Ximeniano.

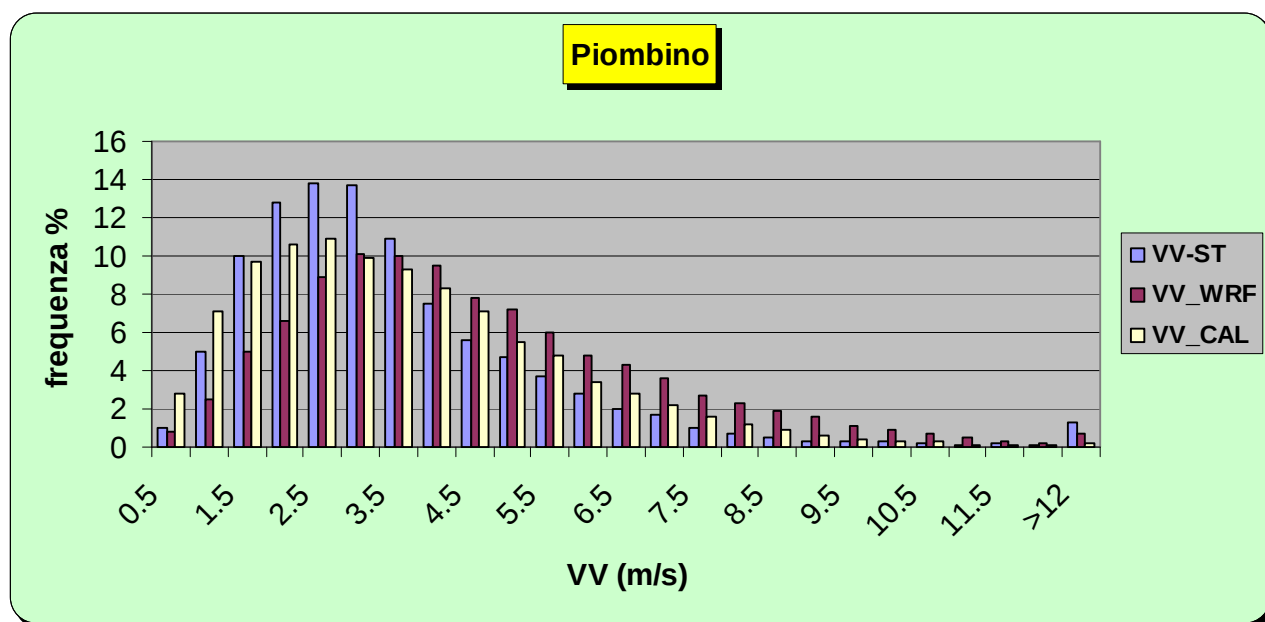


Fig. 9 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Piombino.

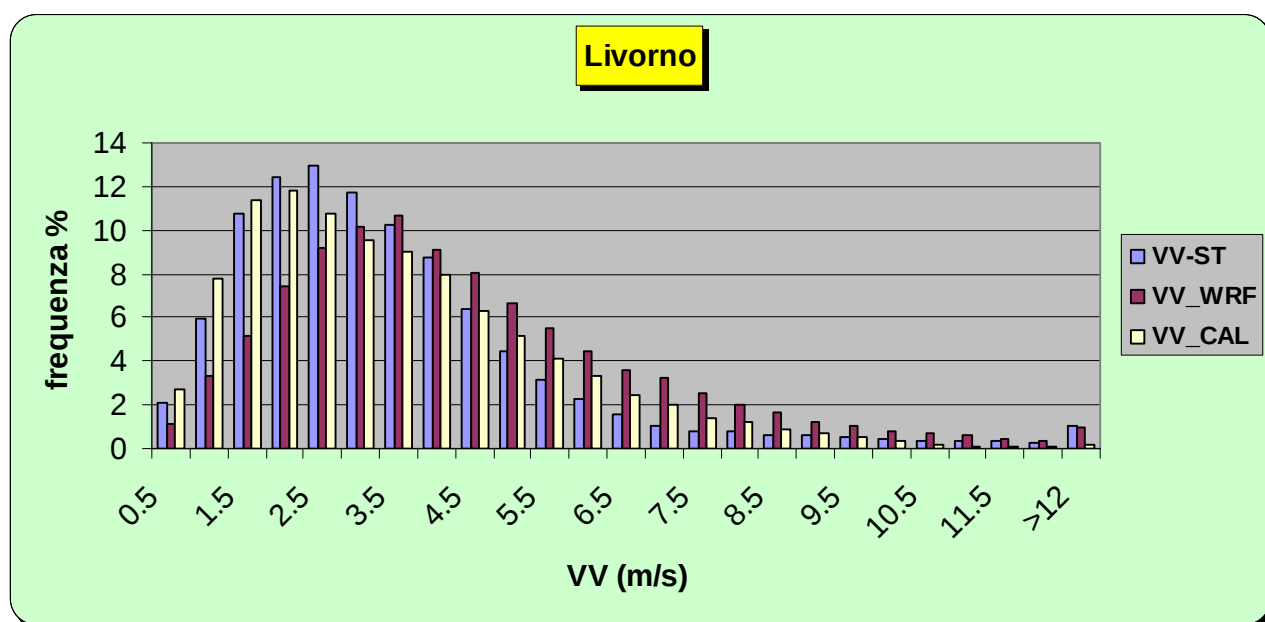


Fig. 10 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Livorno.

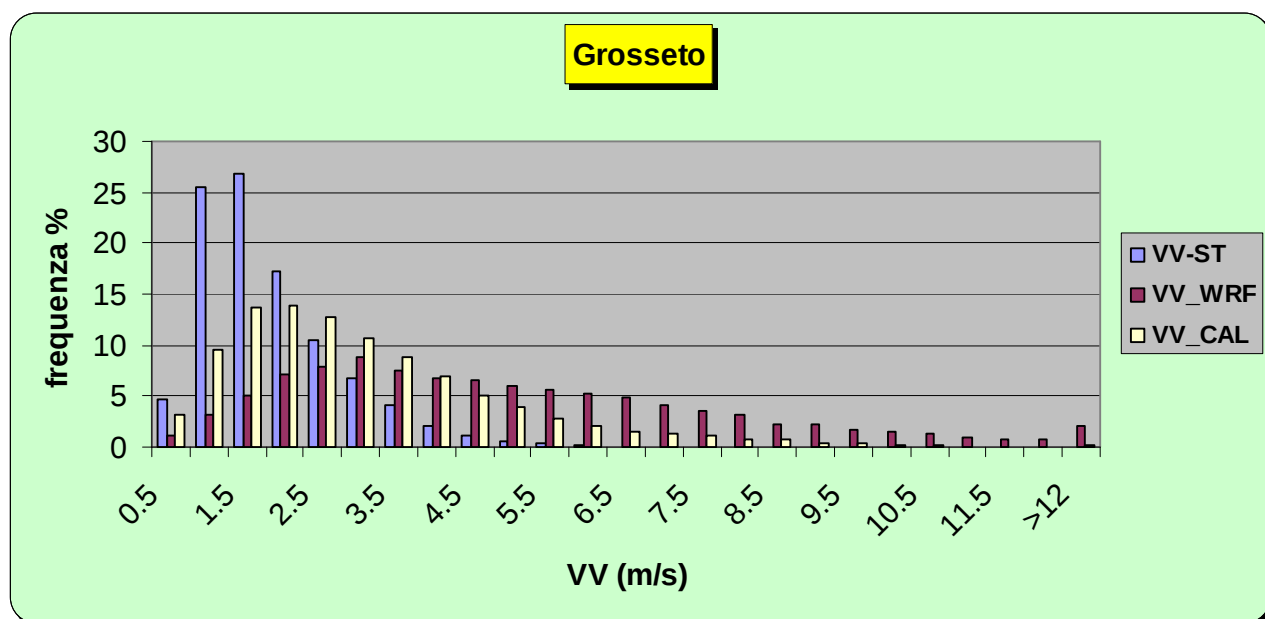


Fig. 11 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento(VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Grosseto.

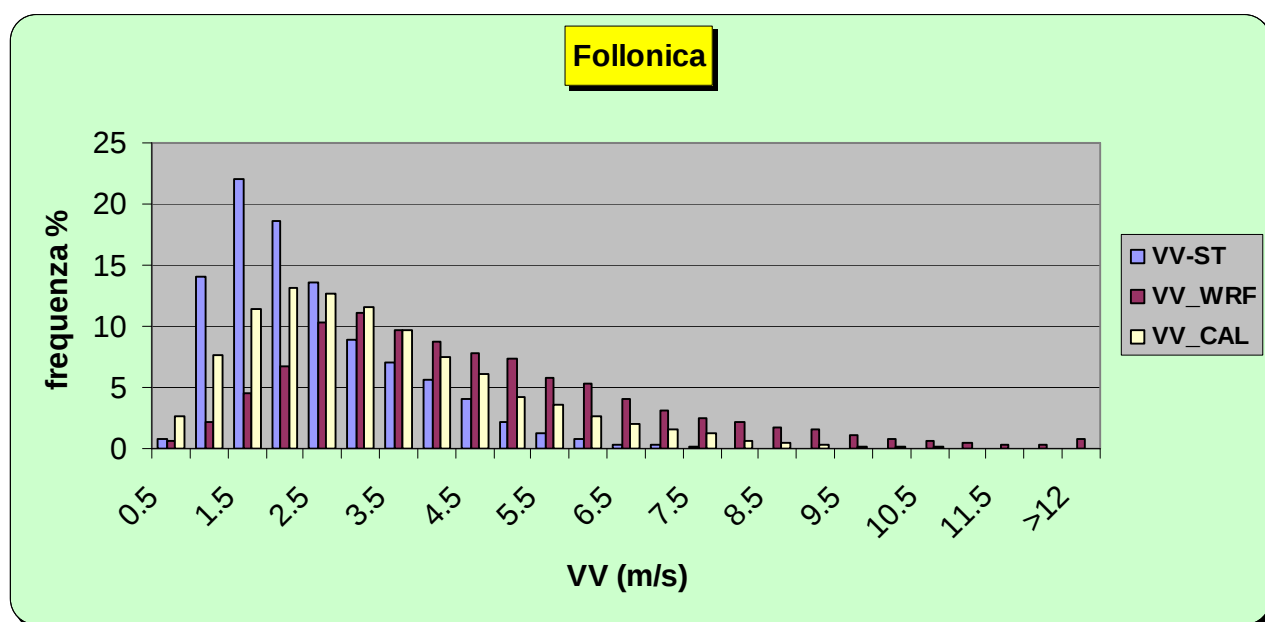


Fig. 12 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento(VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Follonica.

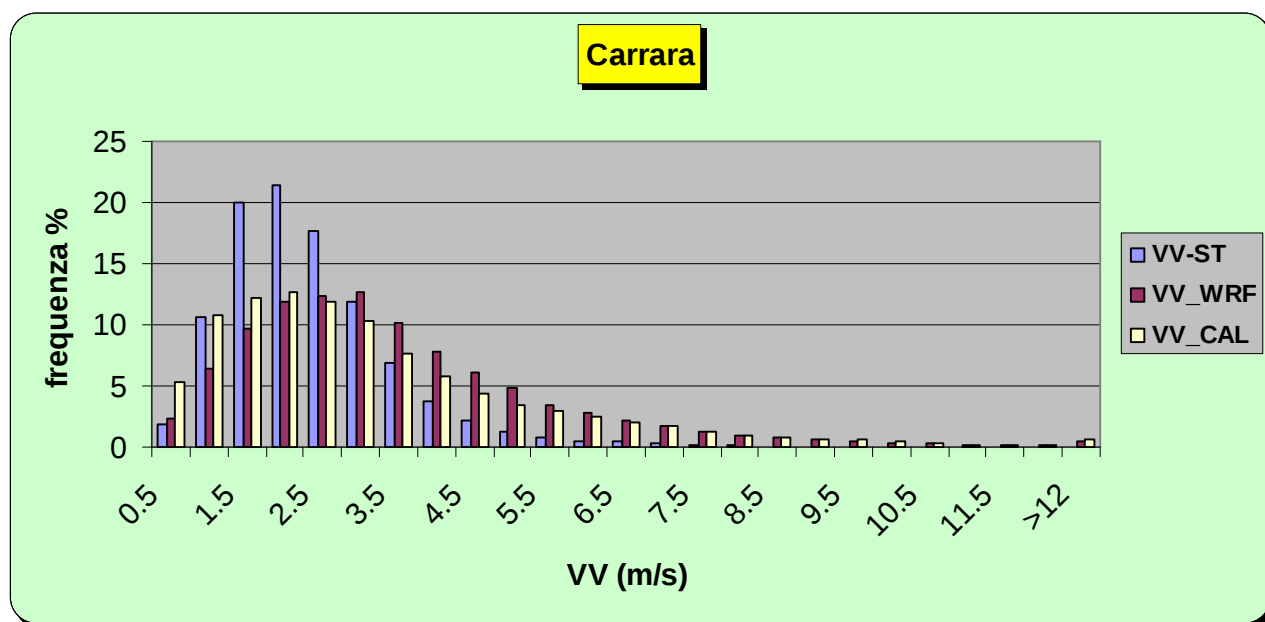


Fig. 13 – Distribuzione di frequenza, su base oraria, delle misure di velocità del vento (VV_ST), delle stime di WRF (VV_WRF), delle stime di CALMET (VV_CAL) nel sito Carrara.