

REGIONE SICILIA
Provincia di Trapani
COMUNI DI SALEMI E CASTELVETRANO

PROGETTO

POTENZIAMENTO PARCO EOLICO SALEMI - CASTELVETRANO



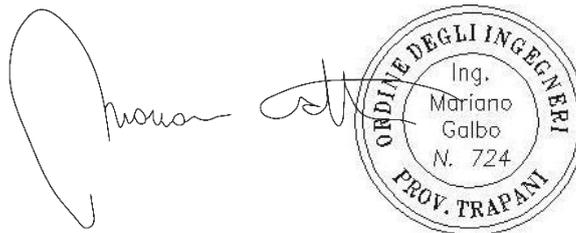
PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



PROGETTISTA:

HE **Hydro Engineering s.s.**
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



OGGETTO DELL'ELABORATO:

VALUTAZIONE RISORSA EOLICA E ANALISI DI PRODUCIBILITA'

CODICE PROGETTISTA	DATA	SCALA	FOGLIO	FORMATO	CODICE DOCUMENTO				
					IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.
	20/07/2018		1 di 40	A4	SAL	ENG	REL	0026	00

NOME FILE: SAL-ENG-REL-0026_00.doc

ERG Wind Sicilia 6 S.r.l. si riserva tutti i diritti su questo documento che non può essere riprodotto neppure parzialmente senza la sua autorizzazione scritta.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	2 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Storia delle revisioni del documento

REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	20/07/2018	Prima emissione	MG	GL	DG

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	3 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

SALEMI-CASTELVETRANO (TP)

Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità

2	17/07/2018	Configurazione finale di layout	DI MAIO	CORBO	DEPERU
1	11/07/2018	Layout pro istanza	DI MAIO	CORBO	DEPERU
0	07/06/2018	Bozza	DI MAIO	CORBO	DEPERU
REV.	DATA	ATTIVITÀ	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

CODICE DOCUMENTO					NOME FILE	PAGINA
PRG	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV	SAL-ENG-REL-0026-02	3 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	4 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

INDICE

1	INTRODUZIONE	5
2	RAPPRESENTAZIONE DEL SITO	6
2.1	Descrizione del sito	6
2.2	Layout	9
2.3	Aerogeneratori adottati	10
2.4	Allacciamento alla rete elettrica	12
3	CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA	13
3.1	Strumenti utilizzati	13
3.2	Raccolta dei dati e validazione	16
3.3	Analisi anemologica e statistica dei dati	17
4	CURVA DI POTENZA	25
5	APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD	28
5.1	Il modello digitale del terreno	28
5.2	La rugosità	33
5.3	La risorsa eolica	34
5.4	Risultati del modello	37
6	ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE	38

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	5 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

1 INTRODUZIONE

La Stima della Producibilità Energetica rappresenta la previsione della produzione annuale di un progetto di impianto eolico, che potrebbe essere costruito una volta ottenute tutte le autorizzazioni del caso e verificata la remuneratività del progetto stesso.

Si tratta di uno studio volto a studiare la producibilità di un impianto esistente che viene ripotenziato grazie all'installazione di macchine innovative con potenza unitaria maggiori rispetto alle macchine attualmente installate.

La Stima della Producibilità Energetica è il frutto dell'integrazione fra la metodologia che ERG ha sviluppato riguardo al processo di analisi dei dati provenienti dalle torri anemometriche di riferimento e/o di micrositing, e una procedura di stima basata sulla modellazione del flusso di vento tramite fluidodinamica computazionale (CFD). In merito alla simulazione del flusso di vento, ci si è avvalso del software di modellazione del vento denominato WindSim (il software), mediante in quale vengono implementate le seguenti fasi:

- Calcolo del flusso di vento
- Estrapolazione della V media a quota mozzo
- Calcolo dell'energia annua producibile
- Stima delle perdite per scia

Mentre per le fasi seguenti ci si è avvalsi della procedura di calcolo messa a punto internamente:

- Trattamento e validazione dei dati anemometrici
- Storicizzazione del dato
- Valutazione delle restanti perdite
- Analisi dell'incertezza a cui è sottoposta la stima

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	6 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

2 RAPPRESENTAZIONE DEL SITO

2.1 Descrizione del sito

L'impianto esistente è situato nella provincia di Trapani e comprende due comuni: Salemi e Castelvetro. L'impianto attualmente è costituito da 30 macchine Vestas V52 di potenza complessiva di 25,5 MW.

Il nuovo layout ripotenziato si sviluppa nell'area del parco già esistente e prevede un numero totale di 18 aereogeneratori multi-megawatt.

L'unità produttiva si sviluppa in tre aree ben distinte: il versante Ovest, il crinale di Salemi occidentale, il versante Est, il crinale di Salemi orientale e a Sud l'area di impianto che si trova a Castelvetro. La distanza minima tra le aree di impianto (Salemi occidentale – Salemi orientale) è di 7 km, mentre la distanza massima (Salemi occidentale-Castelvetro) è di 12.5 km.

L'area occidentale di Salemi si sviluppa su un crinale a nord della località di Posillesi per un'estensione di 1 km. La vallata degrada fino ad arrivare a Salemi per poi risalire su un altro crinale, a sud di Vita, dove sono erette gli aereogeneratori di Salemi orientale. La parte orientale dell'impianto si trova a 6 km a Nord di Castelvetro: l'impianto si sviluppa su due file, quella più a nord è situata su un crinale più accentuato mentre la seconda su un'area dall'orografia meno complessa.

Alcune parti dell'area d'impianto sono caratterizzate dalla presenza di alberi ad alto fusto piuttosto fitti, che in alcuni casi superano i 10 m d'altezza.

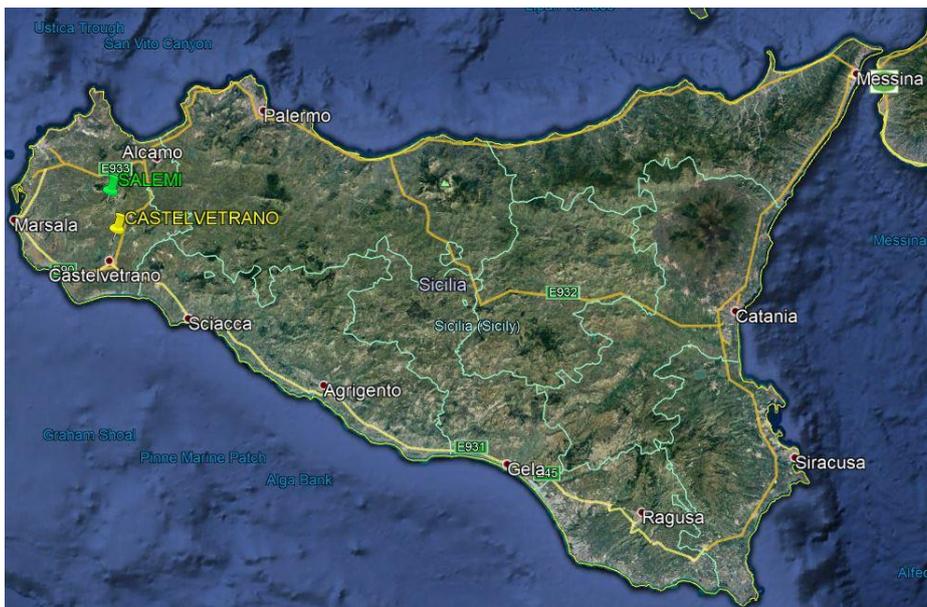


Fig. 1: Inquadramento del sito

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	7 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

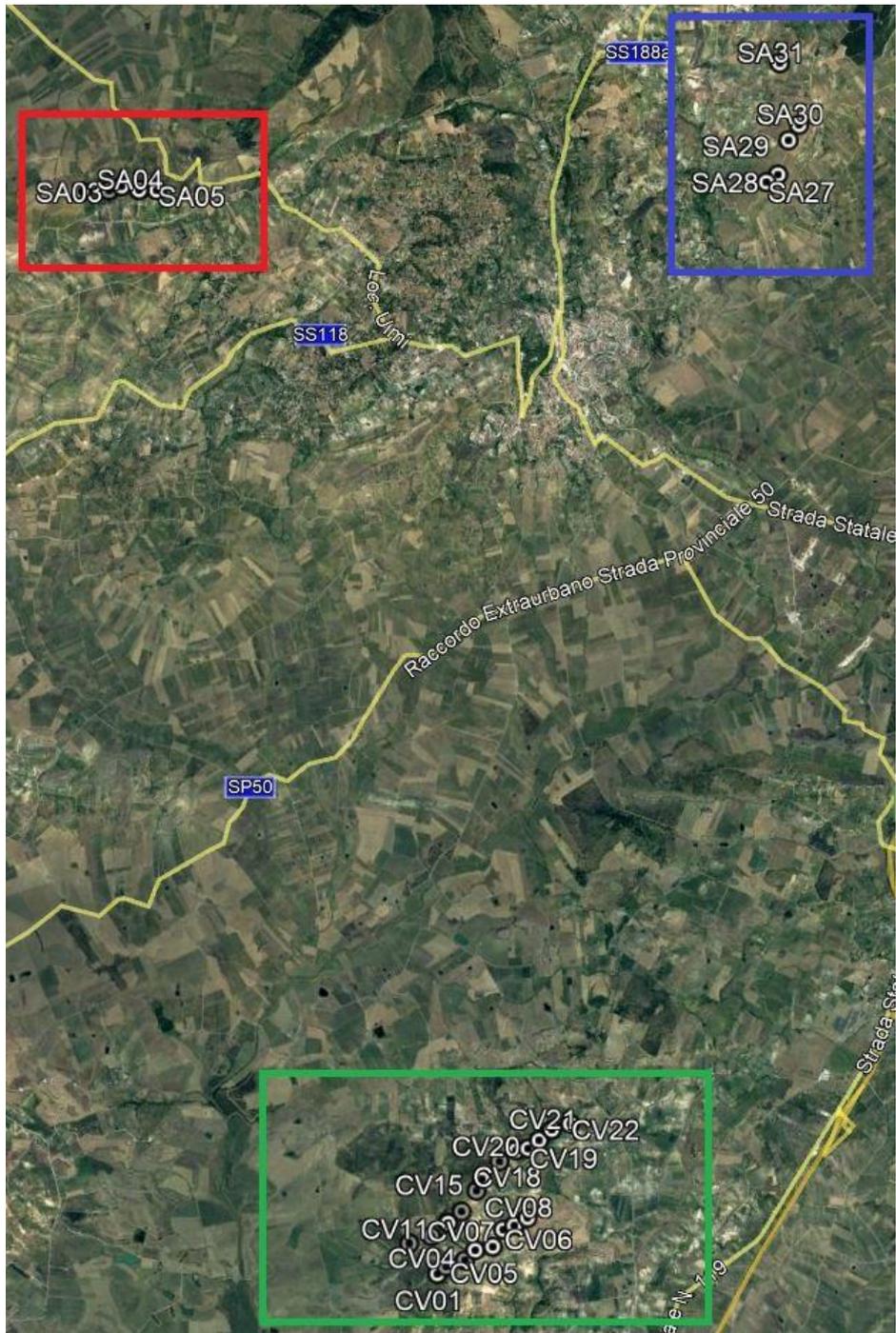


Fig. 1a: Inquadramento del sito: suddivisione delle tre aree (Salemi occidentale-in rosso; Salemi orientale- in blu; Castelvetro in verde)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	8 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		



Fig. 1b: Inquadramento del sito: Salemi occidentale (vista da Sud)



Fig. 1c: Inquadramento del sito: Salemi orientale (vista da Ovest)



Fig. 1d: Inquadramento del sito: Castelvetrano (vista da Sud)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	9 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

2.2 Layout

Il nuovo layout di impianto è composto da N. 18 aerogeneratori, dislocati all'interno di territori comunali di Salemi e Castelvetro.

Gli aerogeneratori (esistenti e anche quelli futuri) sono disposti in 3 aree separate come mostrate nelle Fig. 1(a-b-c-d).

Le coordinate e le quote relative sono:

Sigla	Coordinate UTM WGS84 F33		Quota (m)
	Est	Nord	
WTG	E	N	
R-SA01	301018	4190912	353,1
R-SA02	301446	4190978	414,3
R-SA03	301880	4190906	390,0
R-SA04	302307	4190814	479,9
R-SA05	309256	4191833	467,4
R-SA06	309465	4192182	495,0
R-CV01	304998	4177033	249,9
R-CV02	305400	4177267	257
R-CV03	305878	4177769	232,2
R-CV04	305971	4178217	272,9
R-CV05	306751	4178250	233,3
R-CV06	304699	4177978	224,6
R-CV07	305156	4178189	231,8
R-CV08	305533	4178553	240,9
R-CV09	305768	4178989	274,4
R-CV10	306200	4179094	273,9
R-CV11	306570	4179351	276,6
R-CV12	307089	4178952	240,3

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	10 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

2.3 Aerogeneratori adottati

Per la stima di producibilità energetica di Salemi-Castelvetrano vengono prese in esame due diverse tipologie di aerogeneratori, in particolare si è creato un layout misto a causa dell'orografia variegata del sito; N131 3.9 MW HH114 (Salemi) - N149 4.5 MW HH105 (Castelvetrano) di cui si riportano di seguito le relative caratteristiche e curve di potenza garantite dal costruttore a densità media di sito ($\rho=1.150 \text{ kg/m}^3$ per Salemi e $\rho=1.175 \text{ kg/m}^3$ per Castelvetrano).

Di seguito la curva di potenza del primo modello analizzato fornita dal costruttore alla densità media di sito:

Modello	N131 3.9
Produttore	Nordex
Potenza (MW)	3.9
Diametro (m)	131
Altezza del mozzo (m)	114

Velocità del vento (m/s)	N131 [$\rho=1.150 \text{ m}^3/\text{kg}$] (kW)
3	16
4	170
5	418
6	764
7	1233
8	1847
9	2591
10	3333
11	3758
12	3896
13	3900
14	3900
15	3900
16	3900
17	3900
18	3900
19	3900
20	3900
21	3771
22	3327
23	2906
24	2855
25	2820

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	11 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Il secondo aerogeneratore preso in esame è Nordex N149 la cui curva di potenza fornita dal costruttore alla densità media di sito ($\rho=1.175 \text{ kg/m}^3$) per l'aerogeneratore è la seguente:

Modello	N149
Produttore	Nordex
Potenza (MW)	4,5
Diametro (m)	149
Altezza del mozzo (m)	105

Velocità del vento (m/s)	N149 [$\rho=1.175 \text{ m}^3/\text{kg}$] (kW)
3	28
4	235
5	558
6	1009
7	1621
8	2424
9	3401
10	4116
11	4453
12	4500
13	4500
14	4500
15	4500
16	4500
17	4500
18	4500
19	4500
20	4500

Per un ulteriore approfondimento delle curve utilizzate nel software con cui è stata effettuata l'analisi fluidodinamica si rimanda al capitolo 6.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	12 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

2.4 Allacciamento alla rete elettrica

L'impianto attuale è connesso alla adiacente stazione elettrica di proprietà Enel, situata nel Comune di Salemi provincia di Trapani.

L'ipotesi di progetto prevede il collegamento alla linea AT nel punto dell'attuale SSE, che sarà oggetto di opportuni interventi di ampliamento.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	13 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

3 CARATTERIZZAZIONE ANEMOLOGICA

Data la vastità del sito, per esigenze tecniche relative alla costruzione del modello fluidodinamico il sito è stato diviso in tre parti: Salemi occidentale, Salemi orientale e Castelvetroano come mostrato in Fig1a.

3.1 Strumenti utilizzati

La campagna anemometrica è stata condotta in sito con 3 torri anemometriche. Ogni sotto-area è stata costruita in modo tale che ogni cluster abbia una torre di misura

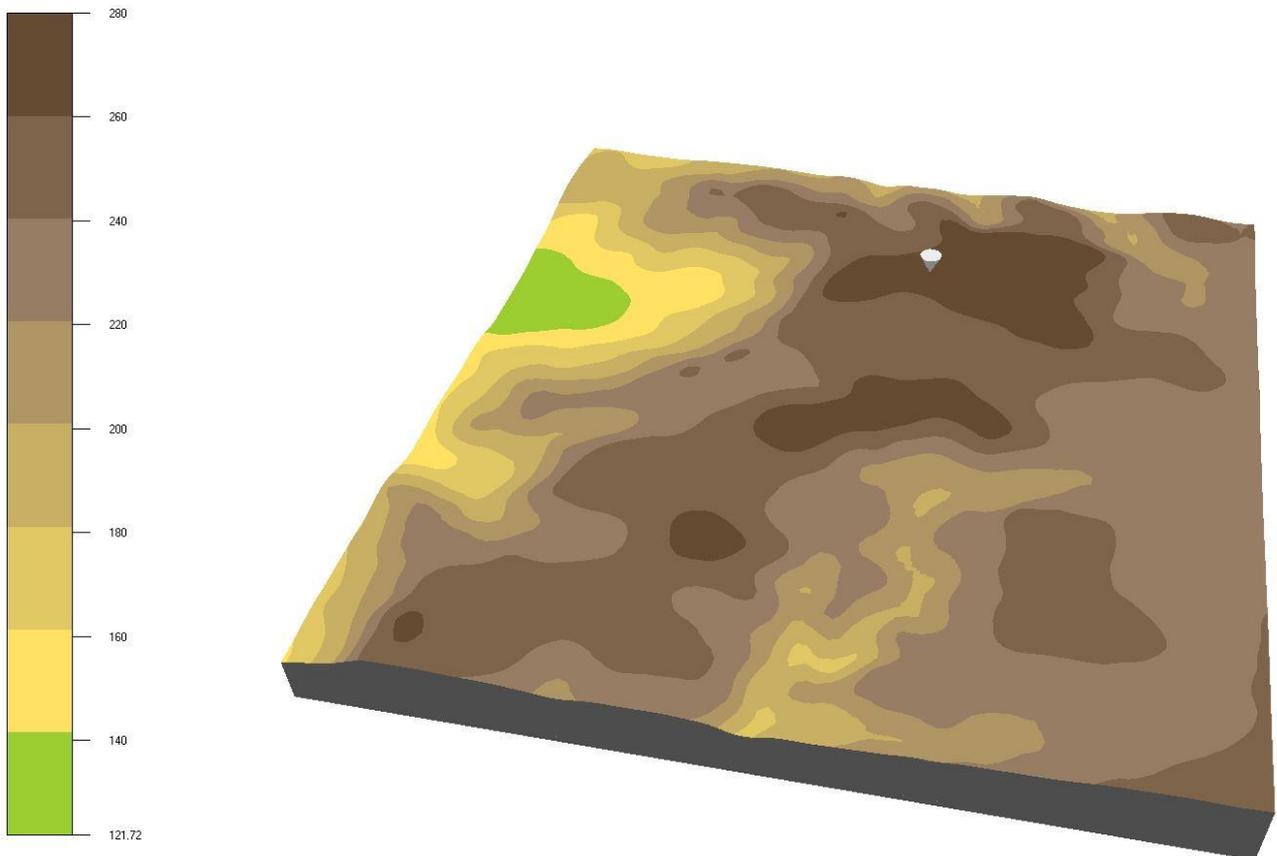


Fig. 3: Stazioni di misura in sito: CAS05 (Castelvetroano)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	14 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

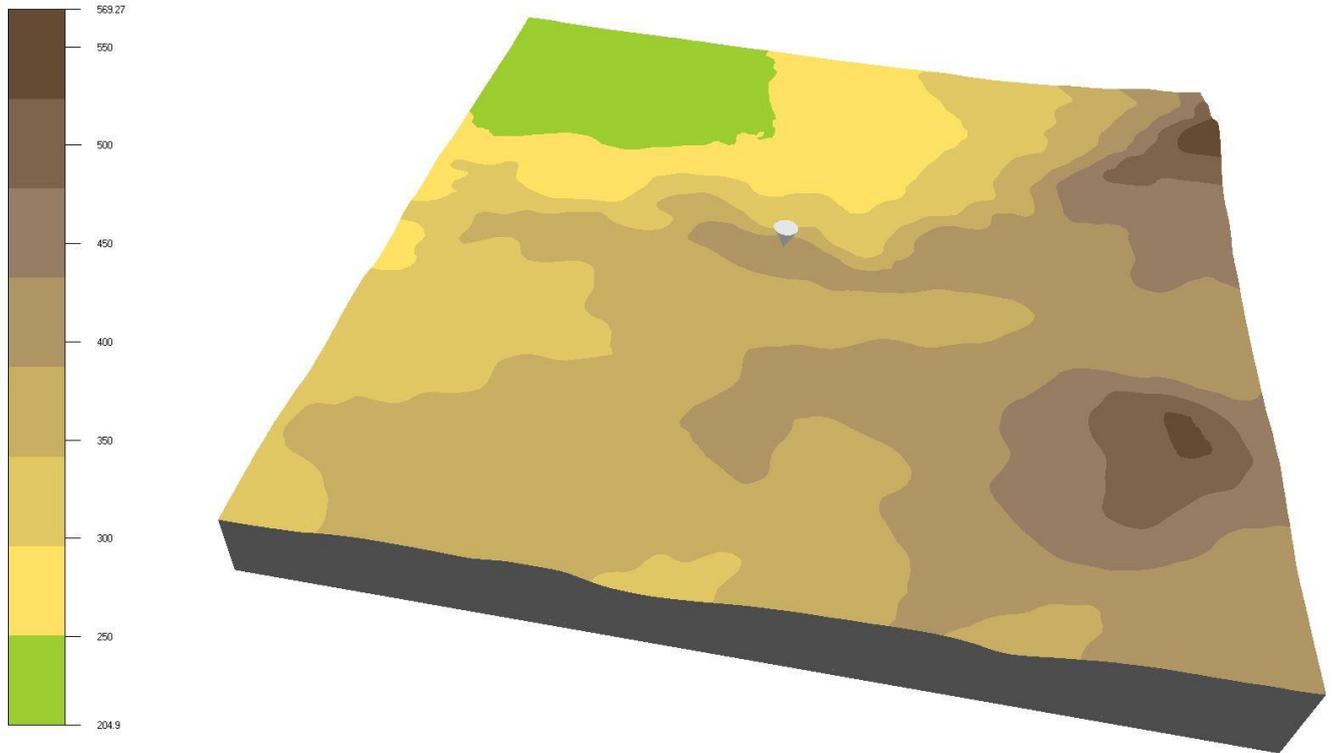


Fig. 4: Stazioni di misura in sito: SAL04(Salemi occidentale)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	15 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

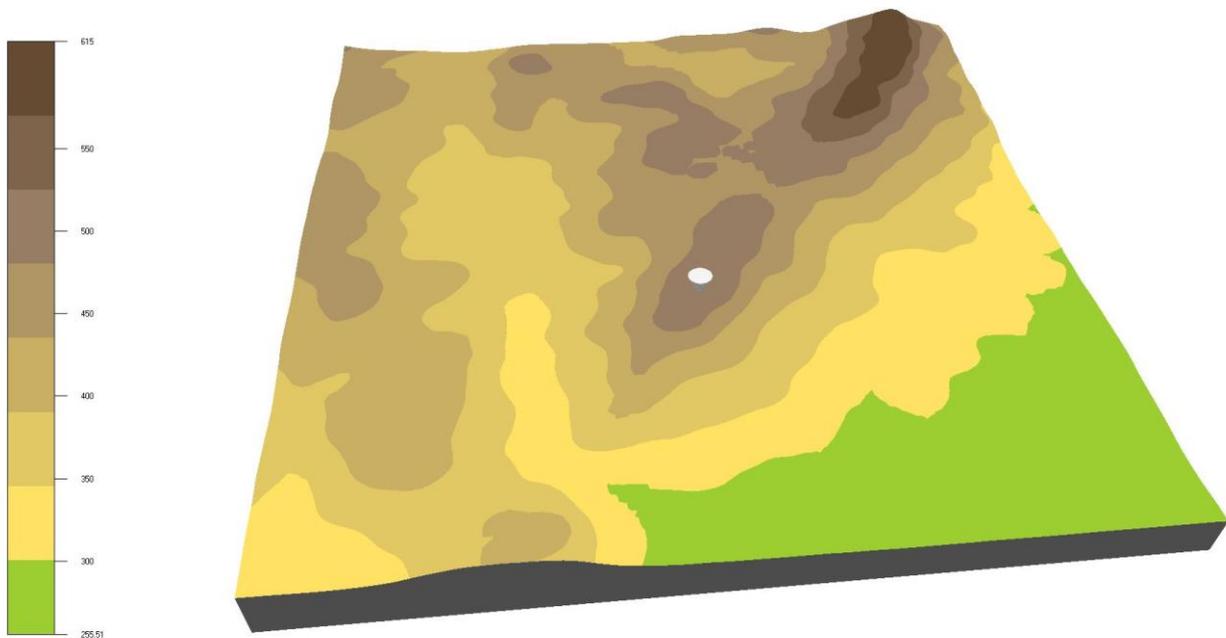


Fig. 5: Stazioni di misura in sito: SAL06(Salemi orientale)

Stazione anemometrica	Coord est	Coord nord	Quota (m)	Altezza (m)	dal	al
CAS05	306099	4179116	279	10	21-07-2006	04-09-2015
SAL04	301862	4190922	408	10	07-11-2003	31-12-2015
SAL06	309426	4190847	523	10	07-11-2003	31-12-2015

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	16 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

3.2 Raccolta dei dati e validazione

Il processo di validazione prevede un controllo manuale per via grafica dei dati grezzi di velocità, direzione e rispettive deviazioni standard tramite software dedicato. Si riporta, uno tra tutti, la validazione fatta per una torre.

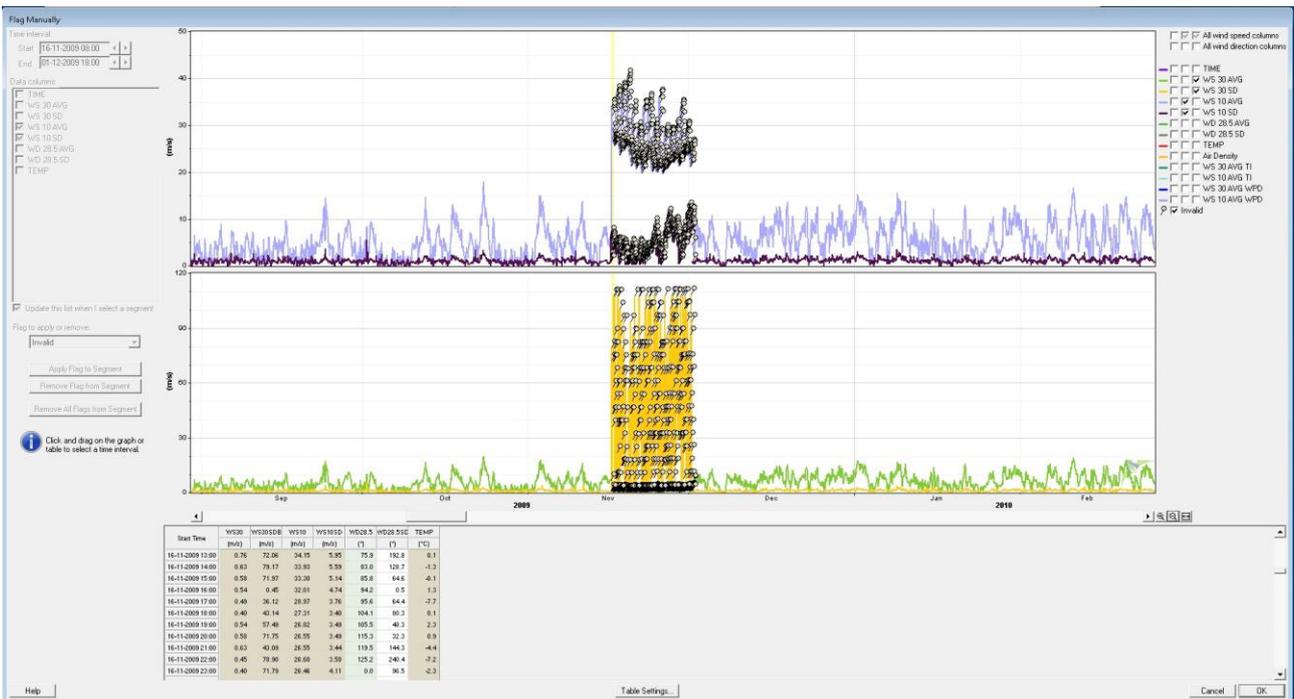


Fig. 6: Validazione anemometro

I dati validati vengono raccolti in database protetti, necessari per l'inserimento dei parametri anemometrici nel codice di calcolo CFD e per eventuali altre considerazioni avanzate.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	17 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

3.3 Analisi anemologica e statistica dei dati

A seguito della validazione dei dati si possono stilare le statistiche sulle velocità medie di sito. Di seguito si riportano a titolo d'esempio i profili statistici relativi ad una delle tre torri di misura (SAL04)

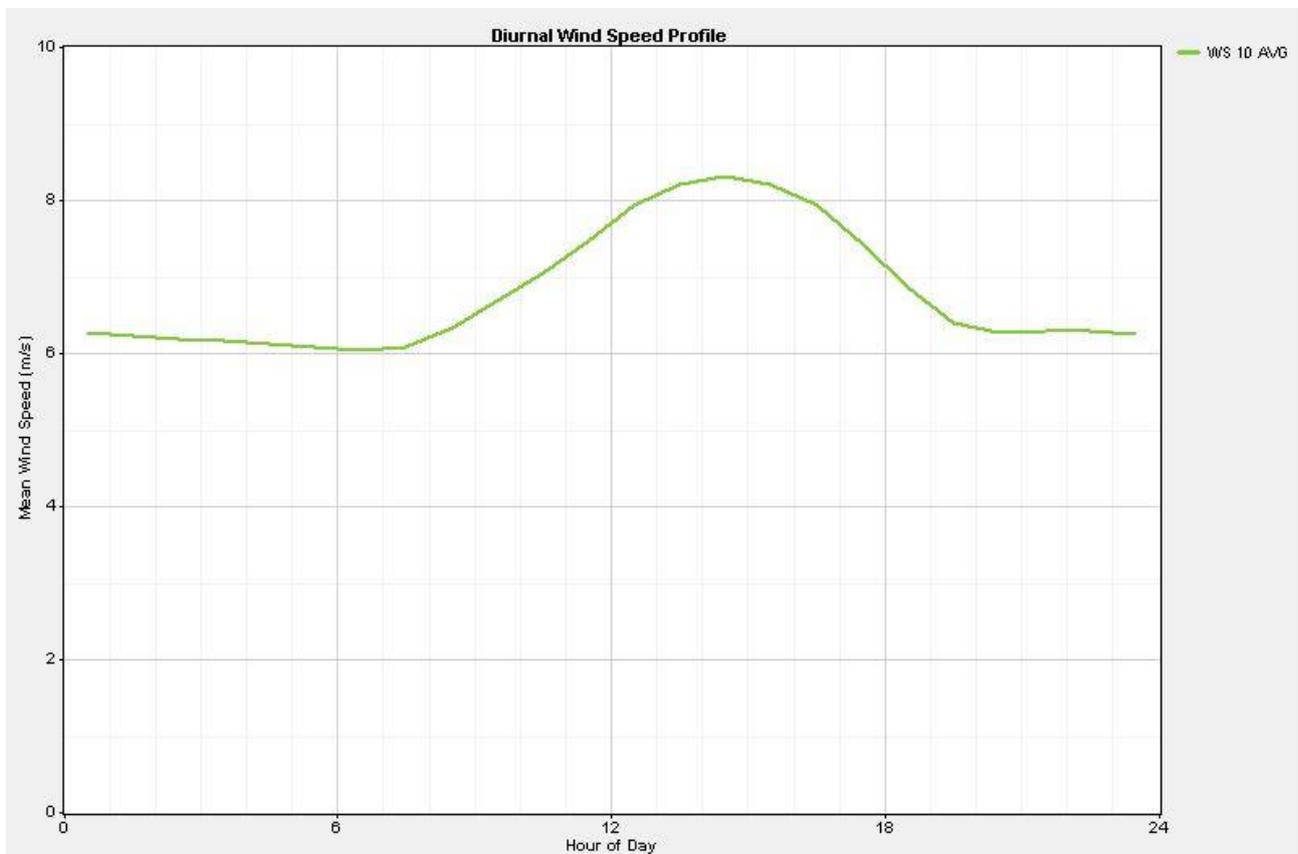


Fig. 7: Profilo giornaliero di velocità – SAL04

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	18 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

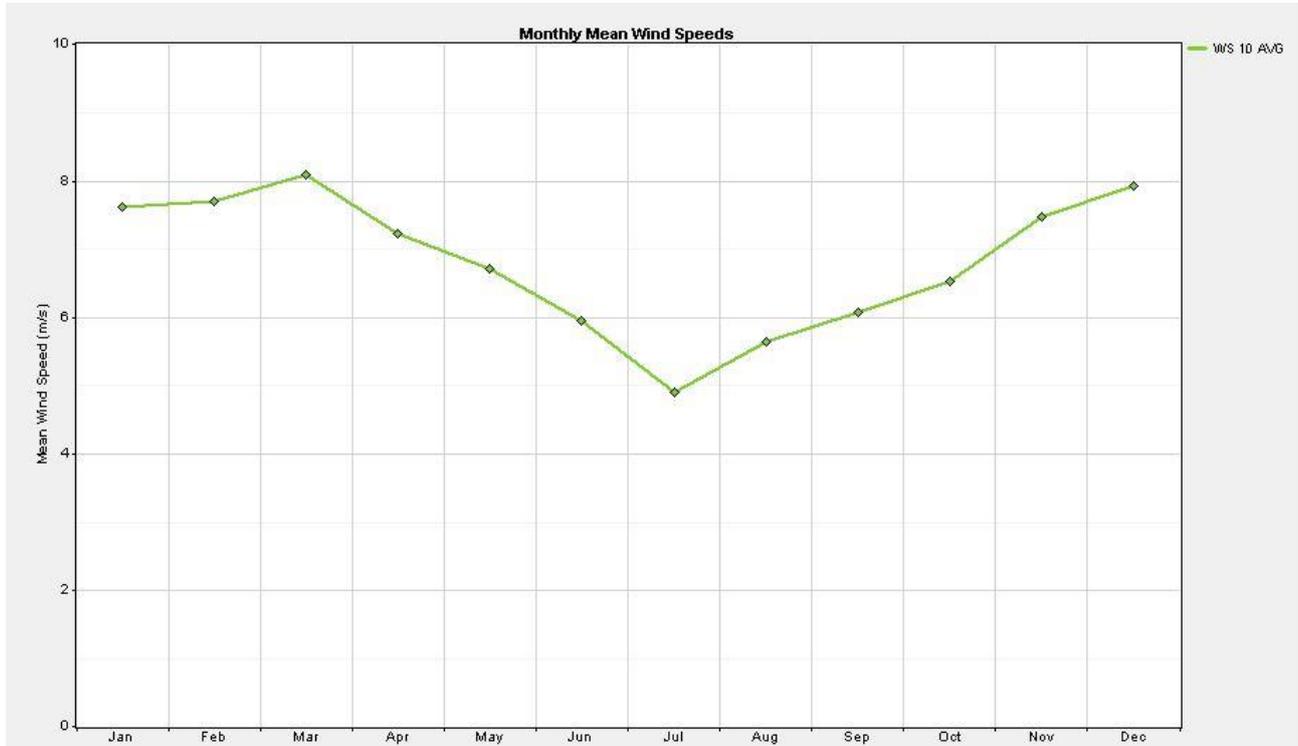


Fig. 8: Profilo mensile di velocità – SAL04

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	19 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Inoltre, partendo dalle velocità misurate, si procede all'estrapolazione del profilo verticale di velocità.

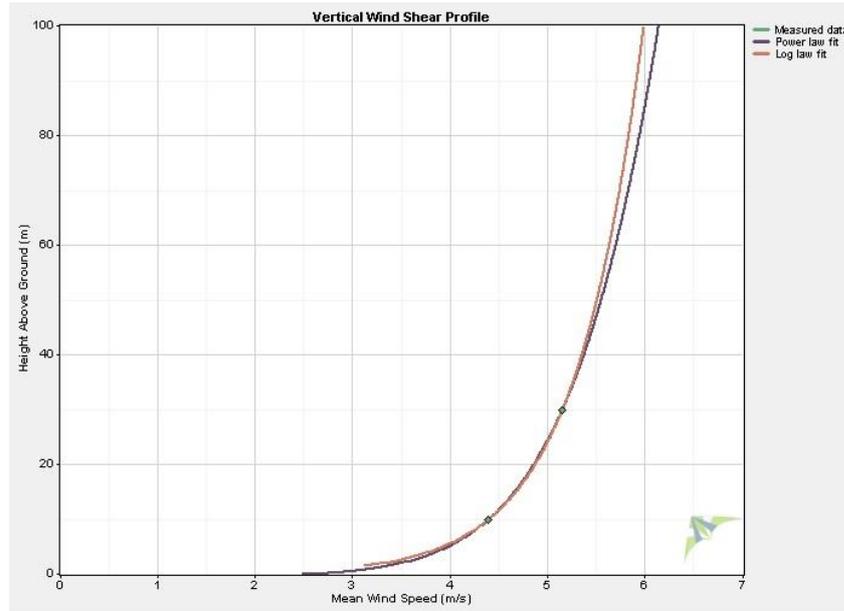


Fig. 9: Profilo verticale di velocità (wind shear)

da cui si può agevolmente ottenere il gradiente al suolo della velocità (α : “wind shear exponent”) utilizzando le velocità medie misurate ai diversi sensori.

$$\alpha = \frac{\ln \frac{v_{30m}}{v_{10m}}}{\ln \frac{30}{10}}$$

Il parametro alfa (α) consente poi di estrapolare la velocità del vento in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti (HH50):

$$v_{50m} = v_{30m} \left(\frac{50}{30} \right)^\alpha$$

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	20 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Le formule sono indicate a titolo esemplificativo e devono essere adattate alle specificità della misura disponibile.

Nel caso specifico di Salemi-Castelvetro, non essendo disponibili sensori di velocità a 30m (doppia misura sulla verticale della torre anemometrica), la prima ipotesi di velocità a 50m è stata ottenuta stimando il valore del parametro α (coefficiente di wind shear) in base all'orografia del sito in corrispondenza del punto di installazione della torre di misura.

Al fine di ridurre le incertezze di calcolo legate al processo di estrapolazione verticale della misura da quota anemometro ad altezza hub, è stato preso in considerazione anche il dato di energia da SCADA di impianto esistente.

A partire dal dato SCADA di energia estrapolato ai morsetti del generatore di turbina ad un'altezza di riferimento pari all'altezza mozzo delle V52, ovvero a 50m s.l.s., si è proceduto a determinare, sulla base dei dati storici di operation e quindi di tutti i tipi di downtime occorsi nel periodo oggetto di misura, la producibilità storica d'impianto, su base annuale.

In particolare la serie storica di dati SCADA su base energia è stata rielaborata con la serie di dati di downtime (periodo: 2008-2016) per calcolare anno per anno la producibilità mensile e quindi definire il dato di producibilità annua storica.

Ci si è avvalsi di tale input in ambiente di modellazione CFD, approcciando in modo critico la precedente estrapolazione verticale della velocità, da quota misura fino all'altezza mozzo desiderata, disponendo questa volta di un riferimento noto in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti (HH50).

A valle dell'applicazione di tale procedura di calcolo, è possibile determinare le tabelle di frequenza per bin di direzione e di velocità in corrispondenza dell'altezza mozzo degli aerogeneratori esistenti (50m) e del punto di installazione di ogni torre anemometrica.

Si ottengono le seguenti statistiche di ventosità (climatologie):

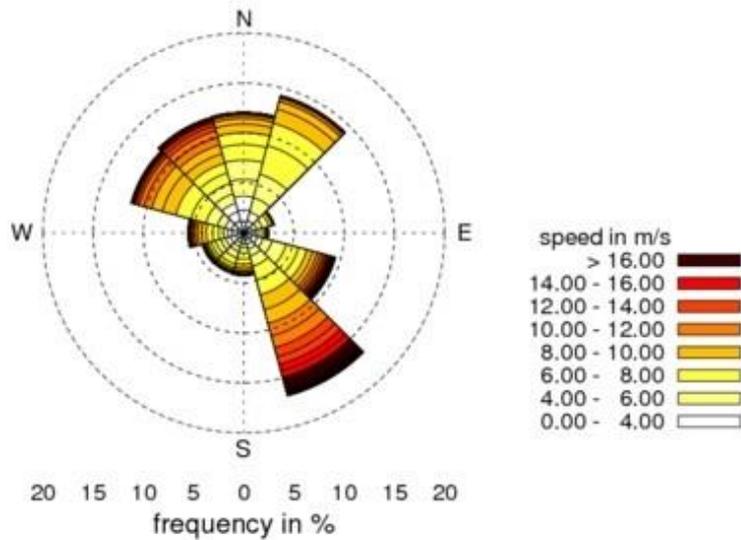
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	21 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

site name	CAS05-50		
filename	6285-CAS05-50		
measurement period	21.07.06 - 04.09.15	# records = 402986	
position	x = 306098.0	y = 4179112.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.60	A = 6.67	average = 5.91

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull (k, A) and average wind speed (m/s) of all sectors.

Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.97	2.86	2.12	1.58	1.31	1.96	2.00	1.96	1.56	1.87	2.30	1.83
A	5.24	6.09	4.02	4.12	6.42	10.03	6.26	5.18	4.57	6.65	7.30	7.16
freq	12.1	14.2	3.1	2.4	9.4	16.9	4.3	4.2	4.3	5.5	11.6	12.0
mean	4.50	5.28	3.34	3.48	6.22	8.89	5.28	4.34	3.91	5.61	6.27	6.12

Fig. 10: Tabella di frequenze CAS05-50m

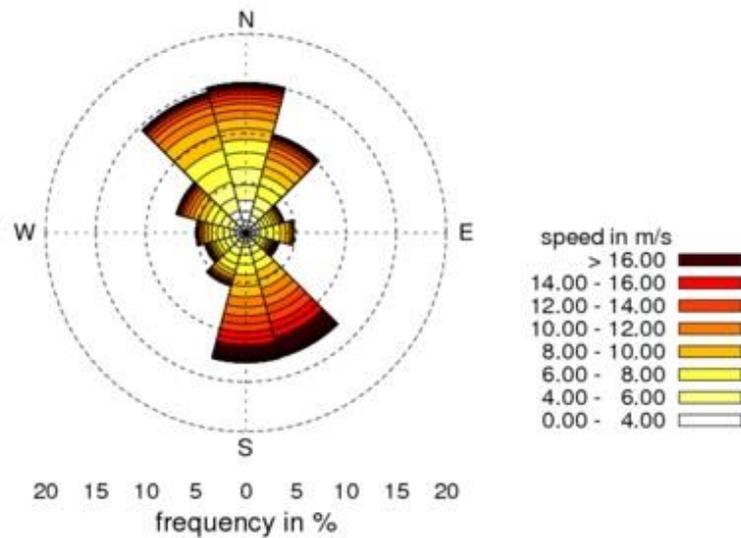
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	22 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

site name	SAL04-50		
filename	6278-SAL04-50		
measurement period	07.11.03 - 31.12.15	# records =	624421
position	x = 301863.0	y = 4190920.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.71	A = 7.97	average = 7.10

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull (k,A) and average wind speed (m/s) of all sectors.

Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	1.60	1.88	1.76	2.39	1.40	2.34	2.17	1.88	1.63	1.85	1.92	1.93
A	7.12	7.53	6.16	6.40	6.87	11.43	10.76	6.49	6.02	6.52	7.50	7.40
freq	15.1	10.3	3.9	4.8	3.4	13.0	13.0	5.5	4.2	5.0	7.2	14.6
mean	6.35	6.54	5.30	5.46	6.41	9.95	9.52	5.75	5.40	5.74	6.55	6.48

Fig. 11: Tabella di frequenze SAL04 -50m

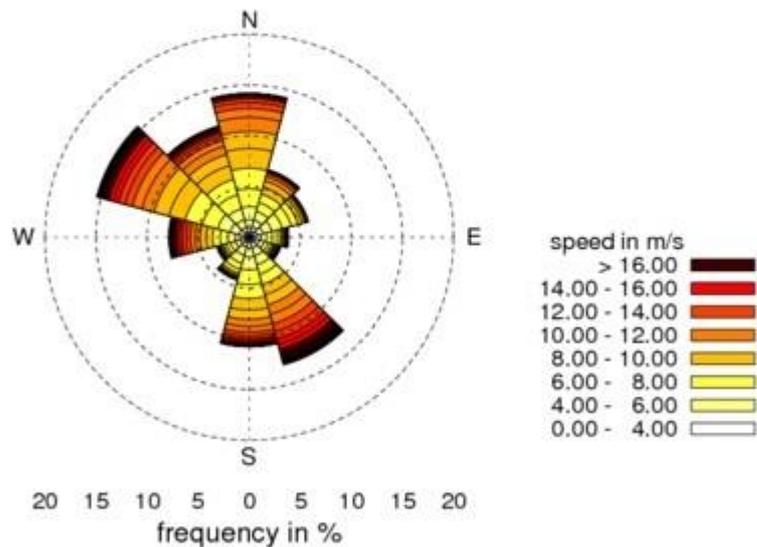
CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	23 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

site name	SAL06-50		
filename	6279-SAL06_50		
measurement period	07.11.03 - 31.12.15	# records = 621576	
position	x = 309426.0	y = 4190848.0	z (agl) = 50.0
Weibull param., average speed	k = 1.79	A = 7.97	average = 7.17

Table 1. Climatology characteristics, including Weibull (k,A) and average wind speed (m/s) of all sectors.

Frequency distribution

◀ ▶ Sector: all Sectors



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
k	2.57	2.22	2.02	1.43	1.26	2.03	1.89	1.79	1.59	1.84	1.94	2.07
A	8.23	6.93	5.55	5.44	5.32	10.35	7.78	5.29	5.43	9.26	9.22	8.07
freq	14.2	6.9	6.0	3.8	3.2	13.0	10.8	4.3	3.3	7.9	15.4	11.3
mean	7.30	6.06	4.83	5.02	5.13	9.12	7.08	4.77	4.96	8.29	8.37	7.24

Fig. 12: Tabella di frequenze SAL06-50m

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	24 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Si procede quindi a rimodulare il calcolo del gradiente al suolo tenendo conto degli input sopra descritti, pervenendo alla stima delle climatologie in corrispondenza delle nuove altezze mozzo degli aerogeneratori oggetto di repowering (HH=105m e HH=114m).

$$v_{HH} = V_{50\text{corretto}} * \left(\frac{HH}{50}\right)^\alpha$$

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	25 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

4 CURVA DI POTENZA

La curva di potenza garantita fornita dal costruttore è valida per una densità dell'aria standard pari a $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$; risulta dunque necessario apportare una correzione in base alla densità prevista nelle zone dell'impianto, stimabili in funzione della quota media (c.a. 263 s.l.m. dell'area d'impianto di Castelvetro e c.a. 434 s.l.m. dell'area di Salemi). Si ipotizza quindi un valore di densità dell'aria media rispettivamente pari a $\rho = 1,175 \text{ kg/m}^3$ e a $\rho = 1,150 \text{ kg/m}^3$.

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	26 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

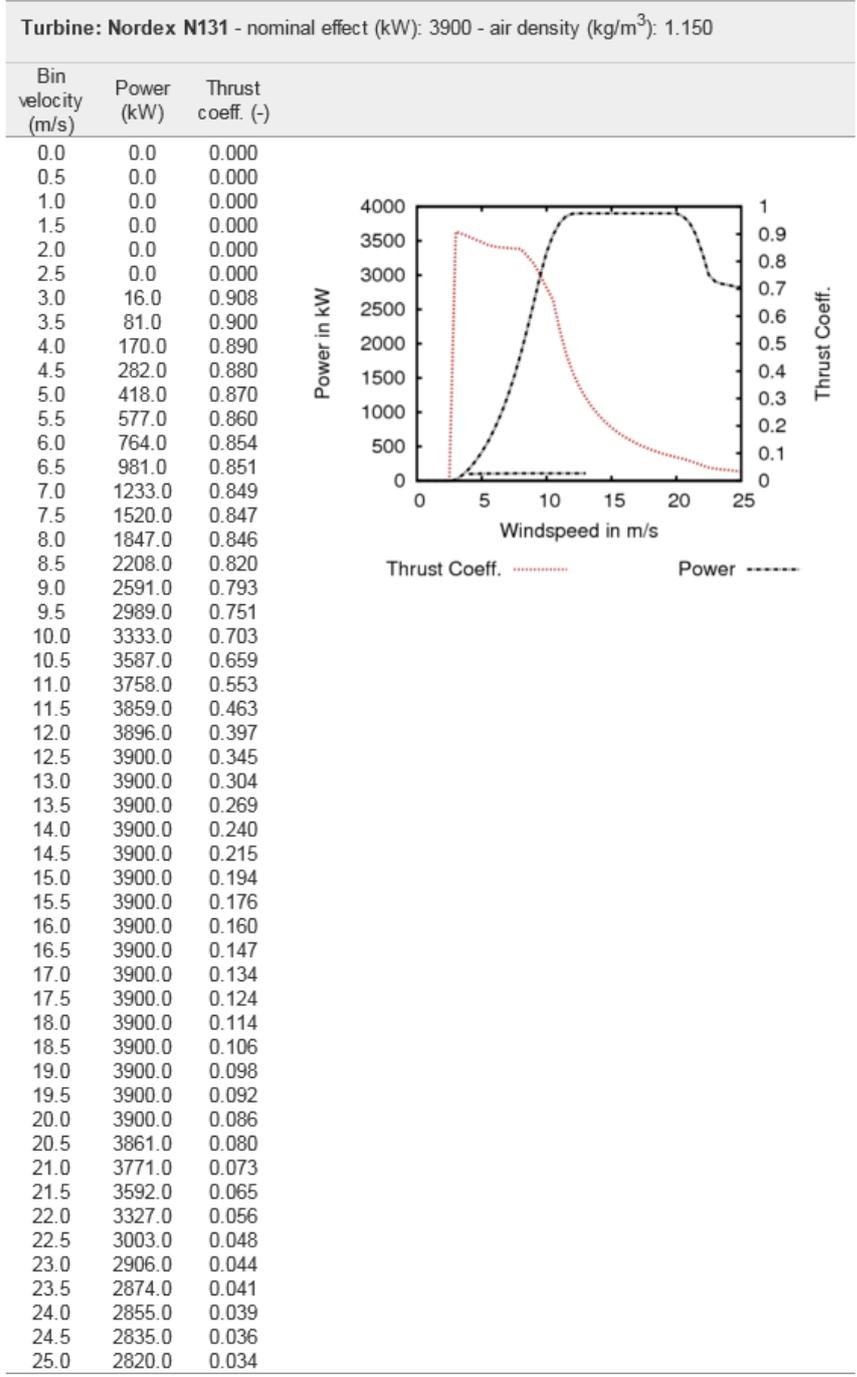


Fig. 13: Aerogeneratore Nordex N131 3.9 MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	27 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

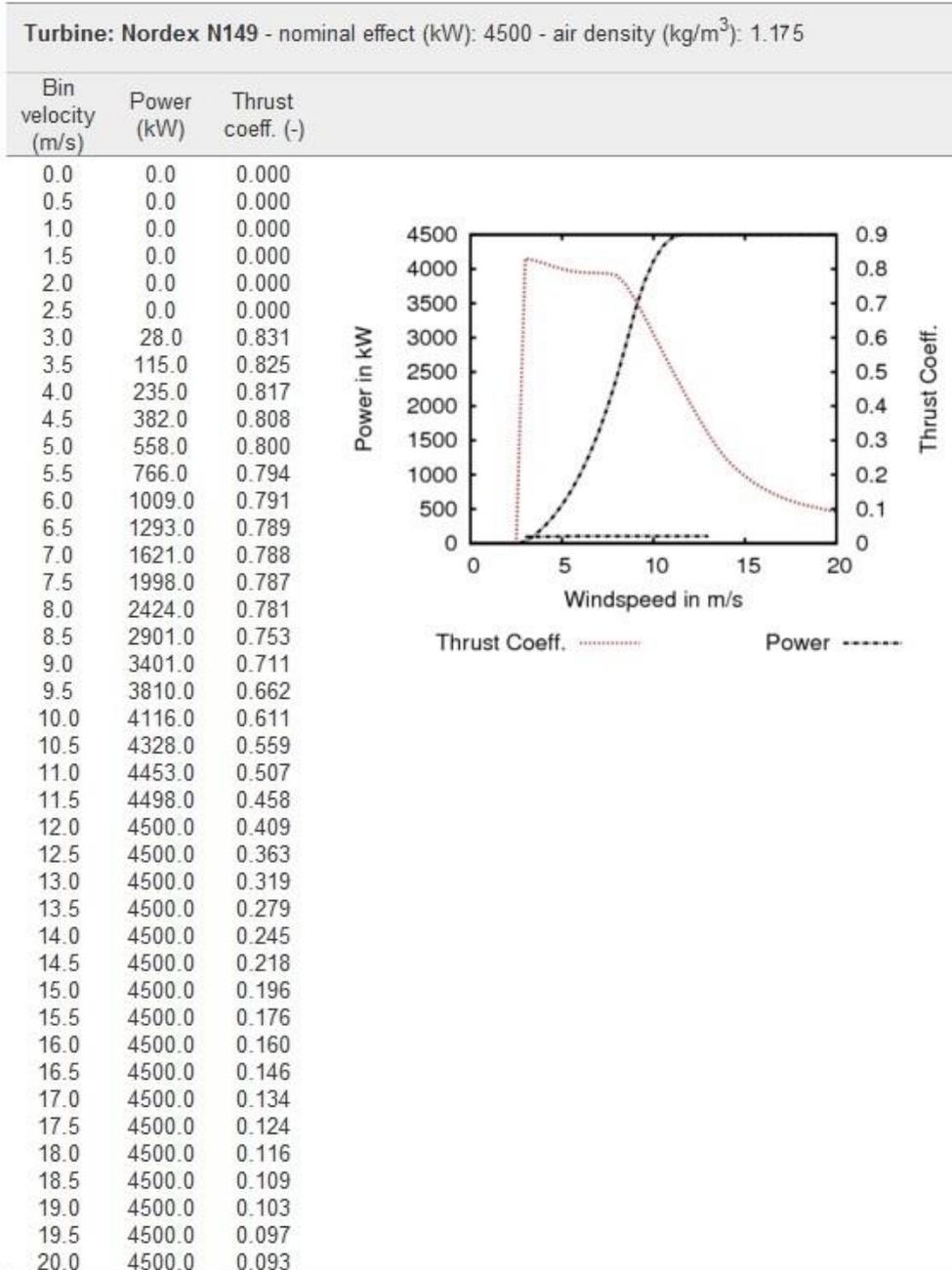


Fig. 14: Aerogeneratore Nordex N149 4.5 MW

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	28 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

5 APPLICAZIONE DEL MODELLO CFD

5.1 Il modello digitale del terreno

Lo studio delle caratteristiche eoliche del sito è stato affrontato con un modello CFD che, a fronte di un dominio di calcolo impostato utilizzando i dati di orografia relativi ad un DTM (Digital Terrain Model) con passo di 20 m, fornisce informazioni sul comportamento del vento nei vari settori di provenienza, nonché i profili verticali della velocità orizzontale nei punti più significativi, quali anemometri e/o aerogeneratori. Di seguito è riportato il dominio di calcolo.

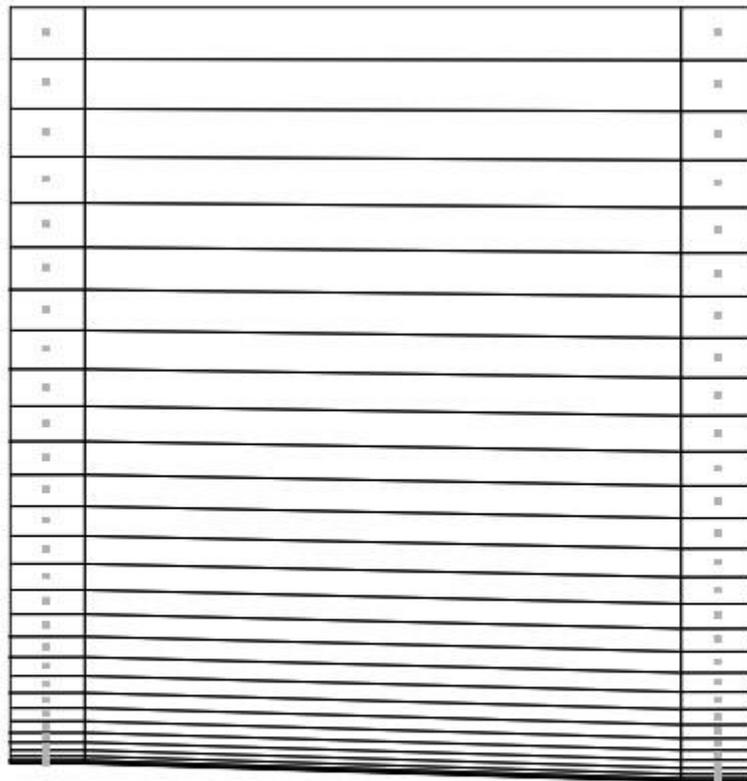
Il DTM riportato di seguito è riferito al sito di Salemi Ovest:



Fig. 15: Mesh orizzontale del dominio di calcolo (area Nord)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	29 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Di seguito invece la discretizzazione verticale del dominio di calcolo e relativa distanza dal terreno dei primi dieci nodi (a titolo di esempio di inserisce il modello di Salemi):



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z-dist. max (m)	5.0	15.1	43.4	108.0	208.7	345.6	518.7	728.0	973.4	1255.1
z-dist. min (m)	5.0	15.2	44.3	110.3	213.4	353.6	530.9	745.2	996.5	1285.0

Fig. 16: Discretizzazione verticale del dominio di calcolo

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	30 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

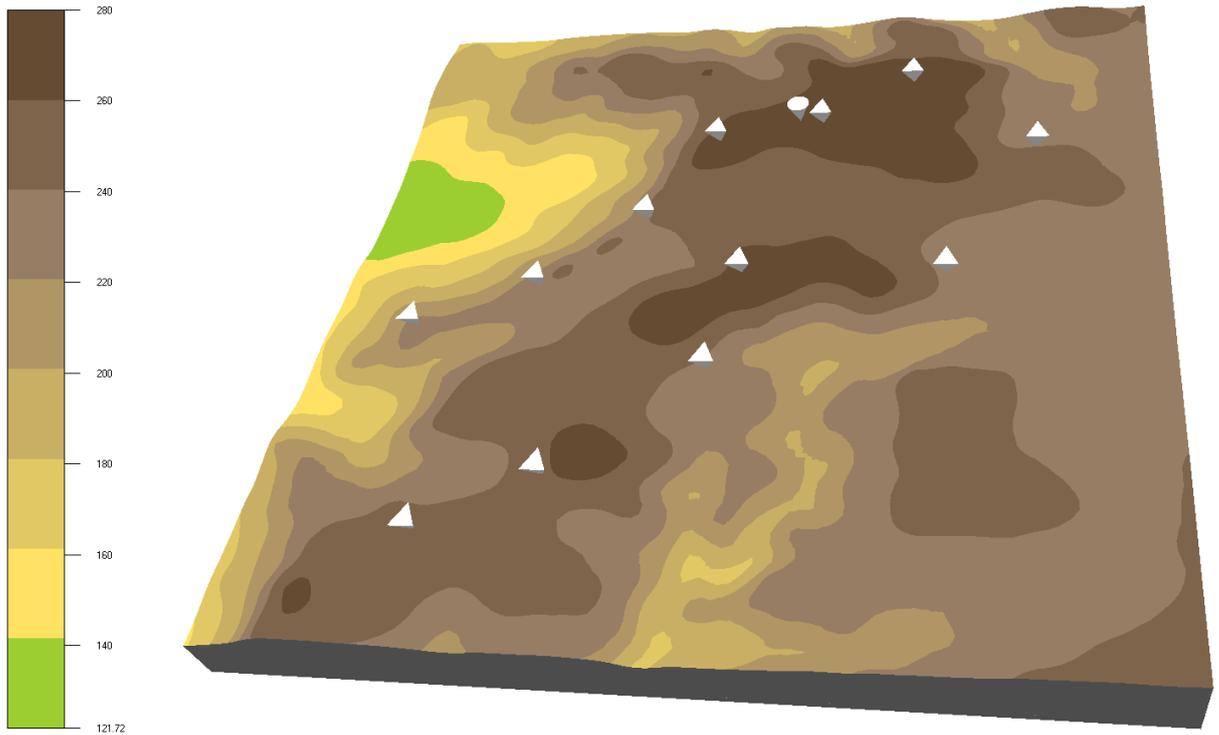


Fig. 17: Mappa 3D area di sito Castelvetrano

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	31 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

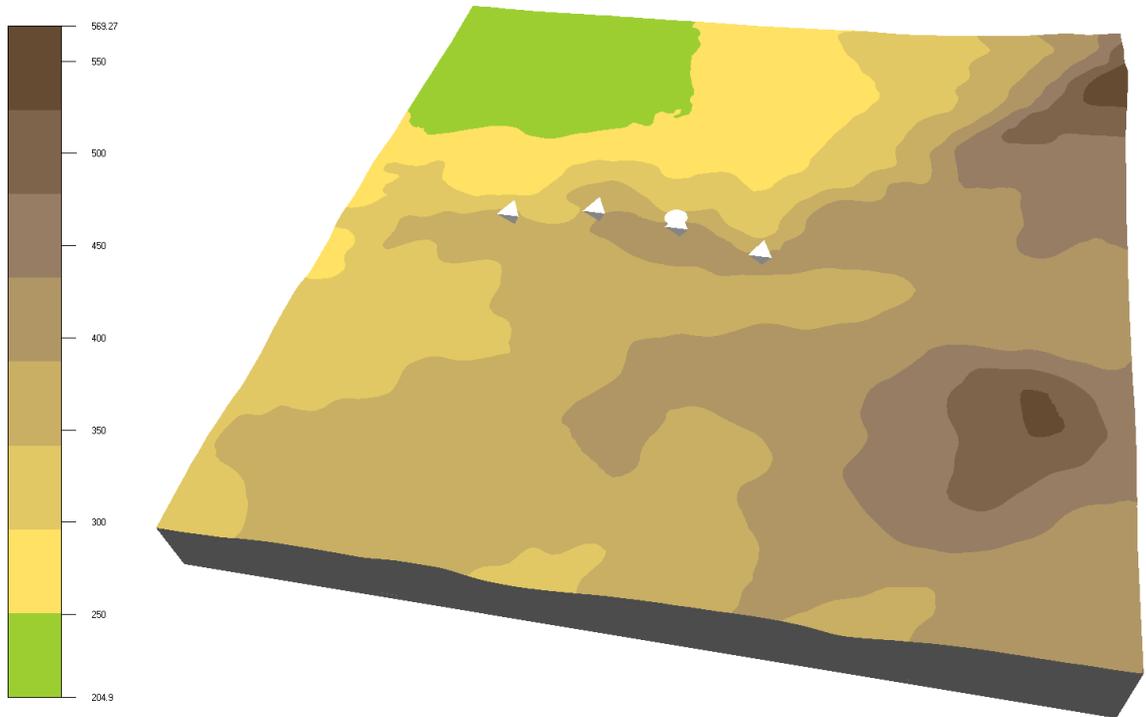


Fig. 18: Mappa 3D area di sito Salemi Ovest

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	32 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

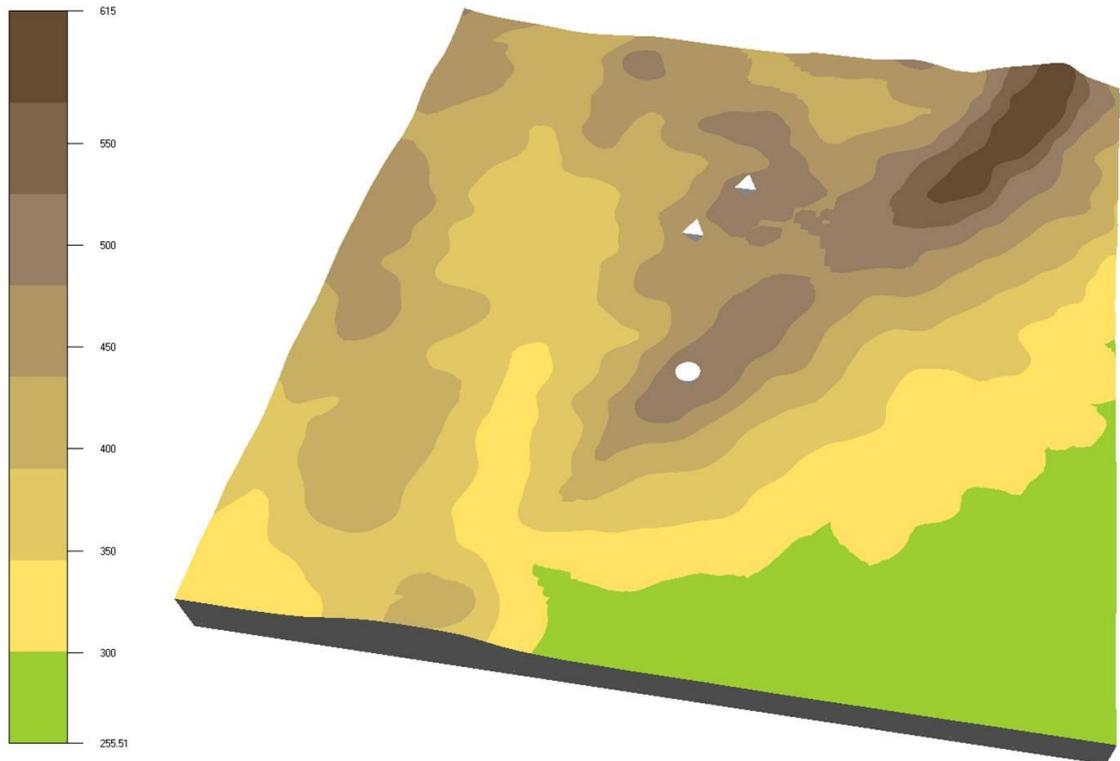


Fig. 19: Mappa 3D area di sito Salemi Est

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	33 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

5.2 La rugosità

La lunghezza di rugosità (z_0) è il parametro che caratterizza la superficie su cui spira il vento, maggiore è il suo valore maggiori saranno le asperità del terreno ed i disturbi creati dal suolo al flusso ventoso.

Fisicamente z_0 può essere immaginata come la dimensione del vortice turbolento che viene creato dall'interazione del vento con il suolo, per cui si tratta di una grandezza in grado di intervenire nella modifica della distribuzione verticale della velocità del vento.

Il valore di z_0 è stato standardizzato in base alle tipologie di terreno (categorie di riferimento) che si possono presentare nella realtà ed è riportato in diverse tipologie di classificazioni.

In questo caso, in particolare, si dispone di mappe di rugosità estrapolate da CLC (Corine Land Cover), che si sovrappongono ai DTM indicati in precedenza, in modo da coprire tutto il dominio.

A titolo di esempio è rappresentata la mappa di rugosità del sito di Salemi Ovest:

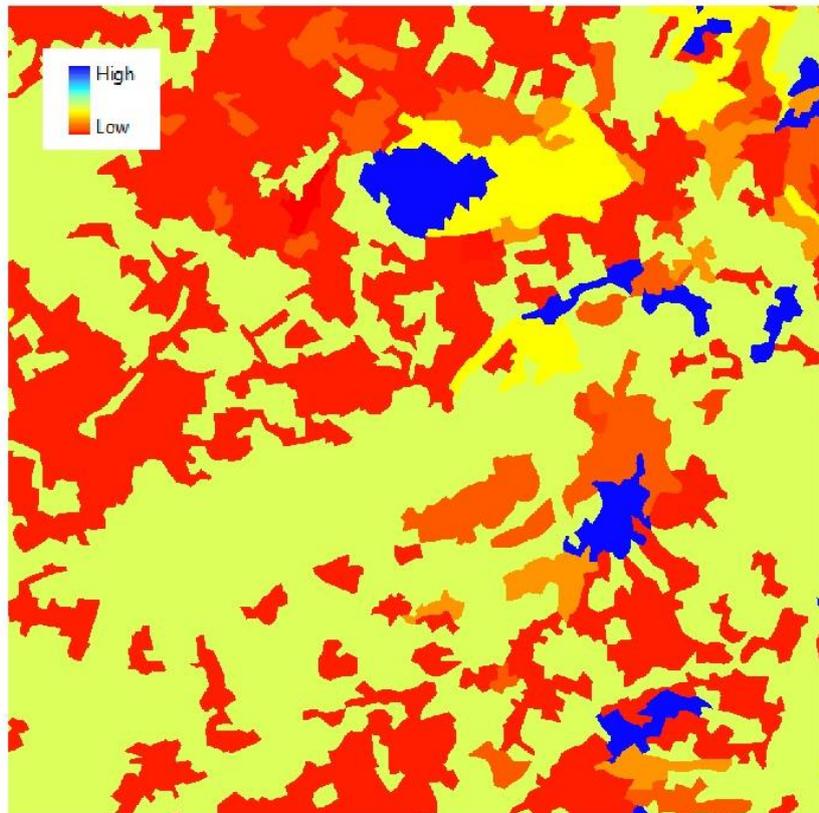


Fig. 20: Mappa di rugosità di Salemi Ovest

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	34 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

5.3 La risorsa eolica

Il calcolo CFD è stato effettuato sui 12 settori di direzione impostando una velocità di 10 m/s come vento geostrofico al di sopra dello strato limite; le rilevazioni anemometriche sono state poi utilizzate per scalare il campo di moto del vento e conseguentemente calcolare la mappa della ventosità media e la produzione attesa dalle singole turbine eoliche.

Di seguito si riportano le mappe di ventosità relative alle tre aree d'impianto, estrapolate in corrispondenza dell'altezza mozzo di turbina:

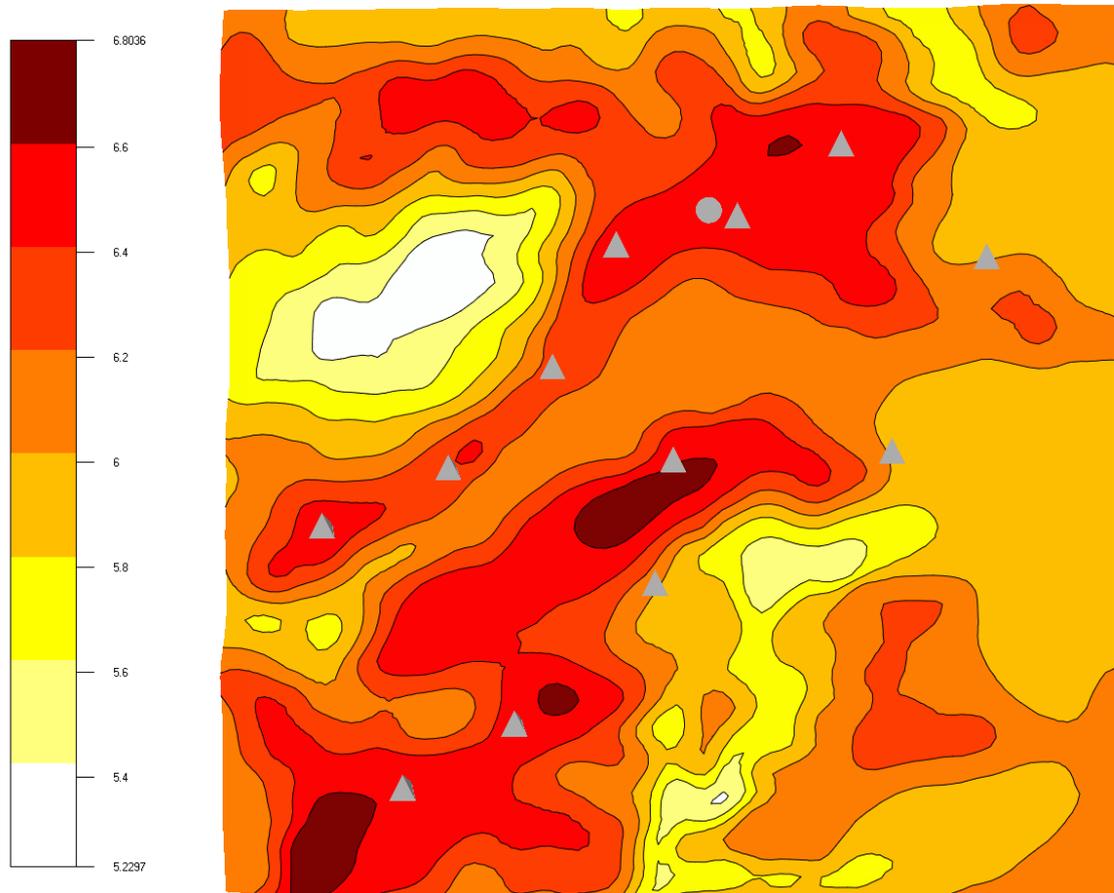


Fig. 21: Mappa di ventosità a 105 m s.l.s. (Castelvetro)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	35 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

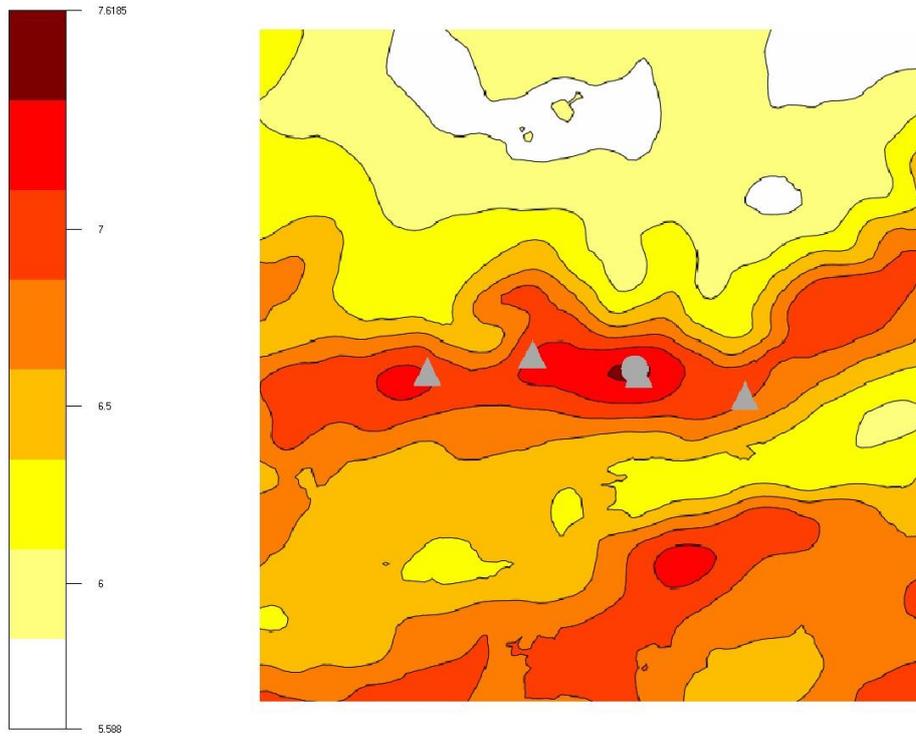


Fig. 22: Mappa di ventosità a 114 m s.l.s. (Salemi Ovest)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	36 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

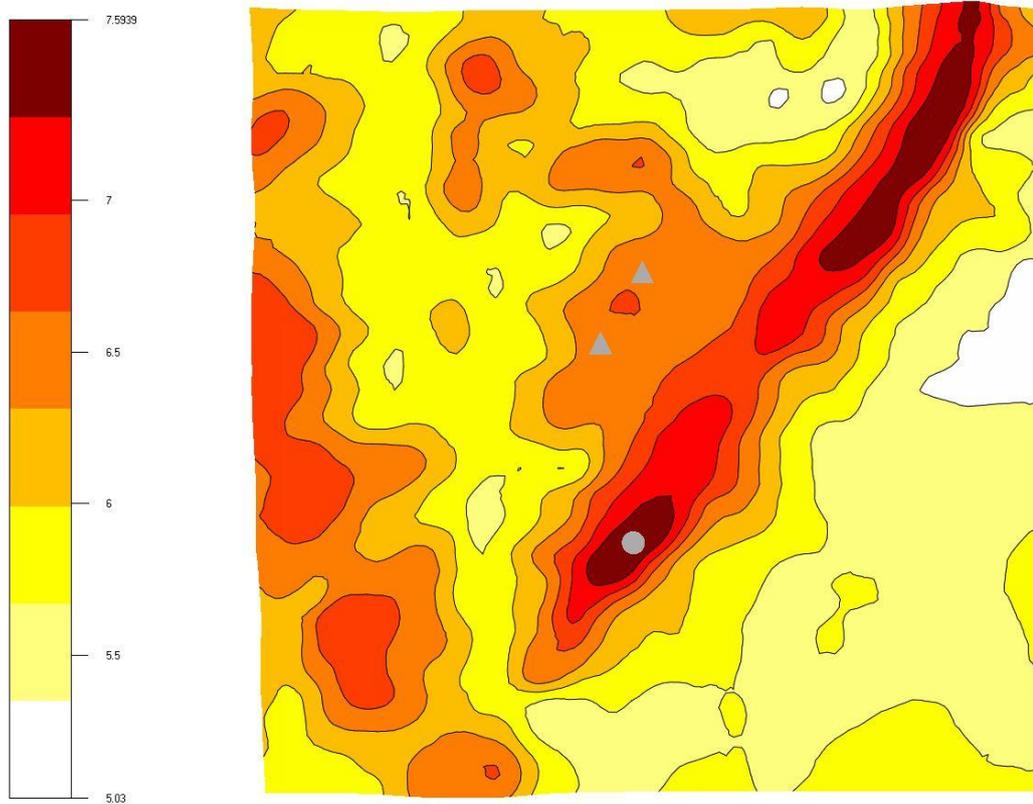


Fig. 23: Mappa di ventosità a 114 m s.l.s. (Salemi Est)

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	37 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

5.4 Risultati del modello

A questo punto sono noti tutti gli elementi per avere una prima stima della producibilità energetica prevista per l'aerogeneratore che rappresenta la media dell'impianto e quindi dell'intero parco risultante dalla somma dei prodotti tra il numero di ore/anno e la potenza certificata per ogni bin di velocità del vento:

	N131	N149
Numero WTG	6	12
Produzione media lorda attesa (MWh/anno)	239141	

Le perdite per effetto scia sono calcolate dal software CFD. In questo caso si è preferito utilizzare il modello di Jensen, che è uno dei modelli di calcolo delle scie implementati.

N131-N149					
	Lordo		Netto scia		Perdite scia
	v (m/s)	MWh/y	v (m/s)	MWh/y	
R-SAL01	7,04	13323	6,99	13154	1,3%
R-SAL02	7,13	13589	7,03	13201	2,9%
R-SAL03	7,38	14168	7,29	13812	2,5%
R-SAL04	6,89	12837	6,84	12652	1,4%
R-SAL05	6,52	11425	6,43	11124	2,6%
R-SAL06	6,57	11510	6,52	11384	1,1%
R-CV01	6,56	13829	6,47	13432	2,9%
R-CV02	6,53	13861	6,31	12859	7,2%
R-CV03	6,04	12533	5,74	11192	10,7%
R-CV04	6,59	14128	6,28	12695	10,1%
R-CV05	5,97	12266	5,77	11346	7,5%
R-CV06	6,53	14044	6,41	13555	3,5%
R-CV07	6,39	13482	6,17	12530	7,1%
R-CV08	6,32	13323	6,00	12000	9,9%
R-CV09	6,58	14195	6,4	13481	5,0%
R-CV10	6,52	13976	6,31	13081	6,4%
R-CV11	6,58	14195	6,41	13519	4,8%
R-CV12	6,01	12457	5,89	11907	4,4%
Media	6,56	13286	6,40	12607	5,1%

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	38 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

6 ANALISI DELLE PERDITE E DELLE INCERTEZZE

L'output del modello, in termini di energia annua producibile, deve essere decurtato di tutte le perdite esterne, al fine di poter determinare la producibilità annua netta, meglio nota come P50.

Le perdite esterne, oltre alle perdite per effetto scia di cui si è già parlato in precedenza, vengono suddivise in:

Perdite per mancata disponibilità di sistema (WTG + BOS) dell'impianto	3.00%
Perdite elettriche (cavidotto MT – consegna in AT)	3.20%
Perdite varie (basate sull'esperienza, in funzione dell'indice di turbolenza del vento)	2.50%
Perdite varie (basate sull'esperienza delle condizioni climatiche)	0.20%
Perdite dovute al rumore	1.00%
Totale perdite escluso scie	9.55%

La produzione netta attesa per singolo aereogeneratore, ovvero quella che viene ritenuta più probabile, risulta quindi pari a:

	N131(*)	N131(**)	N149
Numero WTG	2	4	12
Produzione netta WTG -P50 (MWh/anno)	10284	12066	11427

(*) Salemi orientale

(**) Salemi occidentale

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	39 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Da cui risulta il valore della producibilità netta P50 specifica per ogni MW installato:

$$Prod_{netta_specifica} = \frac{Prod_{netta_WTG}}{Pot_{nom_WTG}}$$

N131 - N149	Velocità del vento a quota mozzo (m/s)	Producibilità netta specifica P50 (ore equivalenti)
R-SAL01	7,04	3082
R-SAL02	7,13	3093
R-SAL03	7,38	3236
R-SAL04	6,89	2964
R-SAL05	6,52	2606
R-SAL06	6,57	2667
R-CV01	6,56	2700
R-CV02	6,53	2585
R-CV03	6,04	2250
R-CV04	6,59	2552
R-CV05	5,97	2281
R-CV06	6,53	2725
R-CV07	6,39	2519
R-CV08	6,32	2412
R-CV09	6,58	2710
R-CV10	6,52	2629
R-CV11	6,58	2717
R-CV12	6,01	2393
Media	6,56	2673

CODICE DOCUMENTO					OGGETTO DELL' ELABORATO	PAGINA
IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROG.	REV.	SALEMI-CASTELVETRANO (TP) Valutazione risorsa eolica e analisi di producibilità	40 di 40
SAL	ENG	REL	0026	2		

Moltiplicando la produzione netta del WTG per il numero di WTG dell'impianto si ottiene la stima P50 della produzione netta dell'impianto:

$$Pr od_{netta_tot} = Pr od_{netta_WTG} \times N_{WTG}$$

	N131	N149
Numero WTG	6	12
Produzione netta P50 dell'intero impianto (MWh/anno)	205954	

Una volta ottenuto il valore P50, rappresentativo di tutto l'impianto, vengono individuati i relativi valori di producibilità P62.5 P75 e P90, a valle di una specifica analisi di incertezza (o analisi di confidenza).

Questo tipo di analisi, individua tre differenti macro-aree, per ognuna delle quali viene determinata la relativa incertezza di calcolo. Si riportano le tabelle per ogni sotto-area:

	Salemi occidentale	Salemi orientale	Castelvetrano
Incertezza complessiva	19,0%	18,9%	17,5%

Considerando proprio l'incertezza complessiva ottenuta, si possono infine determinare, a partire dal P50, i percentili P62.5, P75 e P90.

N131-N149	
P50 (GWh/anno)	206,0
P62.5 (GWh/anno)	194,1
P75 (GWh/anno)	181,0
P90 (GWh/anno)	158,5