

**Caratteristiche del Rumore  
Sismico nei pressi del Rilevatore  
di Onde Gravitazionali VIRGO  
(Cascina, Pisa)**

**Quaderni di  
Geofisica**

90



# Quaderni di Geofisica

## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Simona Masina (BO)

Mario Mattia (CT)

Nicola Pagliuca (RM1)

Umberto Sciacca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - Editor in Chief (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)

# Caratteristiche del Rumore Sismico nei pressi del Rilevatore di Onde Gravitazionali VIRGO (Cascina, Pisa)

## Characteristics of Seismic Noise Around VIRGO Gravitational Waves Detector (Cascina, Pisa)

Davide Piccinini<sup>1</sup>, Lena Cauchie<sup>2</sup>, Riccardo M. Azzara<sup>1</sup>, Thomas Braun<sup>1</sup>, Irene Fiori<sup>3</sup>, Federico Paoletti<sup>3</sup>, Gilberto Saccorotti<sup>4</sup>

<sup>1</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica)

<sup>2</sup>University College of Dublin (School of Geological Sciences)

<sup>3</sup>EGO (European Gravitational Observatory, Cascina - Pisa)

<sup>4</sup>INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa)

# Caratteristiche del Rumore Sismico nei pressi del Rilevatore di Onde Gravitazionali VIRGO (Cascina, Pisa)

In questo lavoro si presentano i risultati di uno studio sulle caratteristiche del rumore sismico in prossimità del rilevatore di onde gravitazionali VIRGO (Cascina, Pisa), con particolare riferimento alle vibrazioni associate all'azione di un vicino parco eolico. La valutazione delle componenti spettrali del rumore verosimilmente indotte dagli aerogeneratori è stata effettuata mediante (i) Misure dirette alla base di una turbina, (ii) Correlazione fra le ampiezze spettrali del rumore e la velocità del vento; (iii) Determinazione delle proprietà direzionali da misure multicanale, (iv) Misura dell'attenuazione del segnale con la distanza dal parco eolico. Il disturbo provocato dagli aerogeneratori è particolarmente energetico alla frequenza di 1.7 Hz e, in particolari condizioni, è stato osservato fino a distanze di 11 km dal Parco Eolico. Il decadimento spaziale delle ampiezze ha un andamento complesso, che può essere interpretato in termini di una combinazione fra onde superficiali e onde di volume rifratte ad un'interfaccia profonda (~800 m) fra i sedimenti plio-pleistocenici ed i calcari Mioceni. La risposta locale nei dintorni dell'interferometro è stata investigata utilizzando la tecnica dei rapporti spettrali H/V. Si sono così evidenziate due bande di amplificazione imputabili ad effetti di risonanza legati alla geologia a scala locale: il primo intorno alla frequenza di 0.35 Hz, il secondo fra 0.7 e 2.0 Hz. Entrambi i picchi risultano essere essenzialmente omogenei in tutta l'area di studio, a conferma della sostanziale uniformità della struttura geologica.

**W**e present analyses of the noise wavefield in the vicinity of VIRGO, the Italy-France gravitational wave observatory located close to Pisa, Italy, with special reference to the vibrations induced by a nearby wind park. The spectral contribution of the wind turbines is investigated using (i) on-site measurements, (ii) correlation of spectral amplitudes with wind speed, (iii) directional properties determined via multichannel measurements, and (iv) attenuation of signal amplitude with distance. Among the different spectral peaks thus discriminated, the one at frequency 1.7 Hz has been associated the greatest power, and under particular conditions it can be observed at distances from the wind park as large as 11 km. The spatial decay of amplitudes exhibits a complicate pattern, that we interpret in terms of the combination of direct surface waves and body waves refracted at a deep (~ 800 m) interface between the plio-pleistocenic marine, fluvial and lacustrine sediments and the Miocene carbonate basement. We then investigated the local soil responses using H/V spectral ratios. We found significant amplification of the horizontal components over two frequency bands: the first, centered at about 0.35 Hz; the second, between 0.7 Hz and 2 Hz. These frequency peaks, likely due to resonance effects in shallow, soft layers, are observed uniformly throughout the investigated area, thus confirming the homogeneity of the shallow geological setting.

## Introduzione

### La Convenzione EGO-INGV

In questo lavoro presentiamo i risultati preliminari delle ricerche svolte nell'ambito di una Convenzione fra il consorzio EGO (*European Gravitational Observatory*) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, avente ad oggetto la misura del campo d'onda del rumore sismico nei dintorni dell'antenna interferometrica VIRGO. EGO è un consorzio fra l'INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Italia) ed il

CNRS - *Centre National de la Recherche Scientifique* (Francia), il cui fine principale è garantire l'ottimale funzionamento dell'antenna interferometrica VIRGO (<http://www.virgo.infn.it/central.html>), ubicata a circa 15 km Sud-Ovest di Pisa. VIRGO è un interferometro laser di tipo Michelson costituito da due bracci ortogonali, ciascuno di lunghezza 3 km, orientati circa N20°E e N70°W (Figura 1), ed ai cui vertici (West- e North-Tower, rispettivamente WT e NT) si trovano gli specchi del sistema interferometrico. Da Settembre 2008 è attivo, in prossimità di VIRGO, un

Parco Eolico (*Eolico Gello*) costituito da 4 aerogeneratori con potenza nominale di 2 MW ciascuno. Recentemente, sono state presentate istanze sia per estendere l'esistente parco, che per realizzarne uno nuovo da 6 turbine, ad una distanza di circa 5 km dal terminale Ovest di VIRGO (Figura 1).

Sulla base di questi presupposti, EGO ha affidato all'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) un incarico di consulenza scientifica con i seguenti obiettivi:

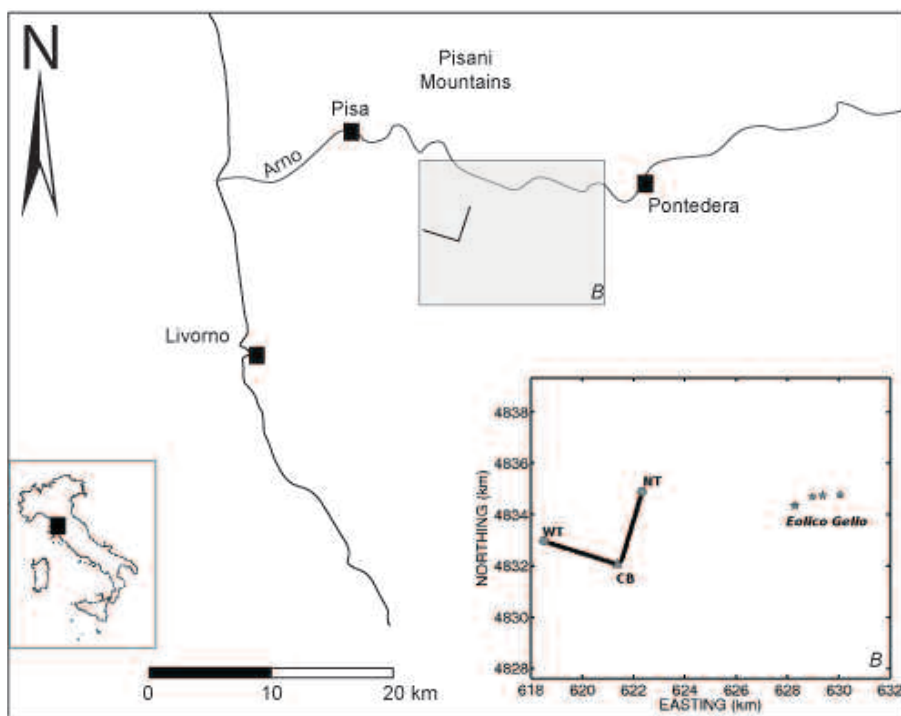
1. La **caratterizzazione del rumore sismico** in prossimità di Eolico Gello, con particolare riferimento all'individuazione di oscillazioni a frequenze specifiche verosimilmente attribuibili alla presenza ed all'attività degli aerogeneratori;
2. Per tali frequenze, la **definizione di una legge di attenuazione** del segnale microsismico con la distanza;
3. La **caratterizzazione dei suoli** sulla base dei rapporti spettrali del rumore ambientale;
4. Sulla base dei punti precedenti, lo **sviluppo di un modello predittivo** per valutare l'entità del disturbo atteso ai terminali di VIRGO in conseguenza dell'incremento del parco eolico esistente e la realizzazione di quello di progetto.

Questo lavoro descrive i risultati di una campagna sismologica svolta durante il mese di Novembre 2009, durante la quale si sono misurate le caratteristiche del rumore sismico su tutta l'area compresa fra l'antenna interferometrica ed *Eolico Gello*. La lunga durata delle misure ha permesso l'osservazione del campo d'onda microsismico secondo diverse condizioni meteorologiche e di attività antropica, permettendo così una valutazione rigorosa e quantitativa delle possibili sorgenti di attività microsismica.

### Vibrazioni indotte da Aerogeneratori

Gli aerogeneratori sono torri cilindriche fortemente accoppiate con il terreno attraverso fondazioni di pali in cemento armato. Le vibrazioni strutturali della torre e quelle associate al movimento delle eliche sono quindi trasmesse al suolo sia direttamente, che come radiazione infrasonica accoppiata al terreno. In funzione della geologia locale, del numero di aerogeneratori e della loro potenza, tali vibrazioni sono state osservate anche a distanze di quasi 20 km dalla sorgente [Schofield, 2001]. Per quanto negli ultimi anni il ricorso all'energia eolica abbia conosciuto una notevole espansione, sono ancora pochi gli studi che riguardano l'impatto degli aerogeneratori in termini di vibrazioni microsismiche.

Alla data attuale, fra gli studi più esaurienti in materia troviamo quello di Schofield [2001], Fiori et al. [2009], e Styles et al.



**Figura 1** Ubicazione dell'area di studio (rettangolo ombreggiato) rispetto alla Toscana Nord-Occidentale. Nel riquadro in basso a destra è indicata la geometria di VIRGO, e la posizione delle turbine del parco eolico.

**Figure 1** Location of the study area (shaded rectangle) with respect to NW Tuscany. The inset at the bottom right reports the layout of VIRGO, and the location of the turbines of the wind park.

[2005]. Le conclusioni raggiunte da questi studi e di maggior rilevanza per i nostri scopi sono:

1. Turbine eoliche a velocità sia fissa che variabile generano vibrazioni a frequenze nella banda 0.1-10 Hz, che sono multiple della frequenza di rotazione delle pale e che possono essere discriminate sulle registrazioni sismometriche anche a distanze di molti chilometri;
2. Alle vibrazioni direttamente correlabili con la rotazione delle pale se ne aggiungono altre la cui origine è probabilmente da ricondursi alle oscillazioni armoniche del traliccio dell'aerogeneratore sollecitato dall'azione del vento;
3. La rotazione delle pale eoliche genera anche segnali sia infrasonici che acustici, di ampiezza tale da poter essere riconosciuti anche a distanze di molti chilometri;
4. Tuttavia, la propagazione del segnale infrasonico è efficiente solo in condizioni di vento ridotto; unita alle caratteristiche di attenuazione con la distanza del segnale sismico, questa osservazione ha permesso di concludere che le vibrazioni si propagano come onde sismiche superficiali;
5. L'entità della vibrazione sismica generata da un parco eolico composto da aerogeneratori tutti eguali scala con la radice quadrata del numero di aerogeneratori; perciò 100 turbine sono 10, e non 100 volte più rumorose di una singola turbina.
6. All'aumentare del numero di parchi eolici, l'entità della vibrazione sismica attesa è data dalla somma in quadratu-

ra delle vibrazioni associate a ciascun parco eolico:

$$A_{tot} = \sqrt{(A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 + A_N^2)}$$

7. La Potenza del segnale sismico è proporzionale alla velocità del vento secondo una legge di potenza:  $P = v^{1.93}$ , per cui l'ampiezza del segnale sismico dipende in modo quasi-lineare dalla velocità del vento;
8. Poiché la potenza della produzione elettrica è proporzionale alla velocità del vento, allora l'ampiezza della vibrazione sismica è circa linearmente dipendente dalla potenza di produzione.

## 1. Inquadramento geologico

L'area di VIRGO è ubicata nella parte sud orientale del bacino dell'Arno (Figura 1), in località Santo Stefano a Macerata, approssimativamente a metà strada fra la zona industriale di Gello (Pontedera) ad Est e l'area di Coltano ad Ovest, nel settore compreso tra gli abitati di Cascina a Nord e Vicarello a Sud. Il bacino del Fiume Arno è un bacino neogenico costiero del bordo tirrenico, inserito nel complesso sistema dei bacini marginali di retro-arco dell'area tirrenica settentrionale. L'evoluzione della Pianura di Pisa prende origine dalle fasi distensive mioceniche che hanno caratterizzato il settore orientale delle Toscana come risultato della formazione del Tirreno Settentrionale [Fanucci et al., 1987, Patacca et al., 1990]. La depressione tettonica così creata è delimitata a nord dal Monte Pisano e a sud dai Monti Livornesi e da quelli di Casciana Terme. Le formazioni più antiche affioranti nell'area (Mt. Pisano) sono rappresentate da filliti e quarziti (Paleozoico-Trias), da carbonati mesozoici, da depositi terrigeni (Cretaceo-Oligocene) della sequenza Toscana e da depositi del flysch Ligure (Cretaceo-Eocene).

A cominciare dal Miocene a causa di eventi climatici e tettonici sedimenti marini, lacustri e continentali hanno coperto il substrato roccioso, variamente dislocato da un sistema di faglie normali con direzione NO-SE e ENE-OSO. Procedendo da SE verso NO il tetto del substrato carbonatico infatti si approfondisce da una profondità di circa 500-700 m rispetto al piano di campagna nel lato sud-est della piana e l'area ad ovest di Pisa, dove la sua profondità raggiunge i 2500 m [Mariani and Prato, 1988; Della Rocca et al., 1988; Boschian et al., 2006]. Ad alcune fasi trasgressive mio-plioceniche, segue una importante fase regressiva Pliocenica che erode i depositi miocenici e deposita nella piana un importante spessore di sedimenti. A causa delle ripetute fasi glaciali, importanti fluttuazioni eustatiche hanno interessato l'area durante il Pleistocene. Inizialmente (Pleistocene Inferiore) sedimenti di ambiente in predominanza marino hanno ricoperto il substrato e poi durante il Pleistocene medio e Superiore, ghiaie, sabbie e argille-limose hanno contribuito al riempimento della piana, depositate a causa delle esondazioni del sistema fluviale Arno-Serchio. I sedimenti di chiusura della sequenza deposizionale

della piana sono rappresentati da depositi fluviali e di palude, depositati in un ambiente sempre meno energetico, a causa della ridotta attività fluviale [Grassi and Cortecchi, 2005].

Una ricostruzione di grande dettaglio del substrato fino ad una profondità di circa 50/60 metri di un intorno significativo dell'area in esame è stata desunta da diverse perizie geologiche e idrogeologiche disponibili. In particolare la presenza di un elevato numero di stratigrafie di pozzi e sondaggi reperibili on-line (Sistema Informativo Territoriale dei siti web istituzionali di Regione Toscana [www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/indagini/li\\_vornese.htm](http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/indagini/li_vornese.htm) e Provincia di Pisa [sit.provincia.pisa.it/](http://sit.provincia.pisa.it/)) hanno permesso la ricostruzione di una sezione geologica basata su circa 120 stratigrafie derivate da sondaggi [Doveri et al., 2008] lungo un profilo di circa 9 km di lunghezza compreso fra Pontedera e Lavoria. La ricostruzione eseguita conferma la situazione geologica già ampiamente documentata da diversi autori [Mazzanti and Rau, 1994; Giardi and Pellegrini, 2002; Giardi, 2003]. La stratigrafia è rappresentata da una successione continua di sedimenti a litologia prevalente argilloso-limosa di ambiente fluvio-palustre, intervallata intorno ai -30/-40 m s.l.m. da un livello pressoché continuo di ghiaie di spessore variabile da 5 a 10 metri (noto in letteratura come *Conglomerato dell'Arno e del Serchio da Bientina*) attribuibile al Wurm. All'interno della successione a componente argilloso-limosa sono presenti lenti di sabbie di vario spessore poste a diversa profondità e difficilmente correlabili. Durante l'esecuzione dei sondaggi più profondi sono stati inoltre ritrovati ulteriori orizzonti ghiaiosi di non precisata estensione laterale, presenti a profondità variabili e comprese tra -140 e -200 m slm. Il livello ghiaioso (*Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina*) è ben noto in letteratura [p.es. Fancelli et al., 1986] poiché rappresenta l'acquifero più importante di questa porzione della piana di Pisa e ospita una falda di notevole valore idrogeologico che, nella zona di studio, risulta in pressione con un livello piezometrico collocato alla profondità di circa -1 m slm (ovvero a circa 10/12 m di profondità dal p.c.).

Inoltre questo livello più competente è ben visibile anche nel sottosuolo dell'area di VIRGO, ad una profondità variabile compresa fra i 25 e i 60 m come confermato da alcune misure microgravimetriche effettuate nell'area [Stefanelli et al., 2008] e dalle ricostruzioni stratigrafiche effettuate durante la costruzione delle fondazioni dell'antenna interferometrica. L'analisi dei sondaggi disponibili confermano la presenza del livello di ghiaie alcuni chilometri ad Ovest di VIRGO (Ponte Biscottino), ad una profondità di circa 50-60 metri.

## 2. Acquisizione dei dati

### 2.1 Misure di campagna

La maggior parte dei dati utilizzati per la stesura di questa Relazione sono stati acquisiti durante una campagna di

misura condotta nel periodo 26 Ottobre - 17 Novembre 2009. Nel corso della campagna, abbiamo utilizzato un totale di 12 stazioni sismiche, di cui 3 sono state mantenute fisse nella medesima posizione per tutta la durata dell'esperimento, mentre le altre sono state successivamente riposizionate in diverse configurazioni. Abbiamo inoltre utilizzato dati accelerometrici e velocimetrici provenienti dai sistemi di monitoraggio delle vibrazioni attivi a VIRGO, e cortesemente messi a disposizione da EGO. Nel disegnare le diverse geometrie di acquisizione, abbiamo tenuto conto dei seguenti obiettivi: (i) Determinazione delle proprietà

direzionali dei segnali nella banda di frequenza 0.1 – 10 Hz; (ii) Determinazione delle caratteristiche di attenuazione; (iii) Definizione delle caratteristiche dei terreni mediante analisi della dispersione delle onde superficiali e dei rapporti spettrali H/V indicativi di possibili effetti di amplificazione locale dovuti a risonanze in strati superficiali a bassa velocità. L'ubicazione complessiva di tutti i siti di misura utilizzati nei diversi esperimenti è riportata in Figura 2.

## 2.2 Geometrie di Acquisizione

In una prima serie di esperimenti abbiamo installato 8 sta-

ESPERIMENTO #1: 27/10/09 15:00-29/10/09 13:00				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
932B	RT130	LE3D-5s	43.6518	10.5822
9324	RT130	LE3D-5s	43.6515	10.5839
931E	RT130	LE3D-5s	43.6513	10.5851
9204	RT130	LE3D-5s	43.6512	10.5828
9195	RT130	LE3D-5s	43.6509	10.5835
9213	RT130	LE3D-5s	43.6509	10.5842
920A	RT130	LE3D-5s	43.6505	10.5834
ESPERIMENTO #2: 29/10/09 14:00-30/10/09 10:00				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
932B	RT130	LE3D-5s	43.6518	10.5822
9324	RT130	LE3D-5s	43.6515	10.5839
931E	RT130	LE3D-5s	43.6513	10.5851
9204	RT130	LE3D-5s	43.6512	10.5828
9213	RT130	LE3D-5s	43.6509	10.5842
9195	RT130	LE3D-5s	43.6535	10.5807
920A	RT130	LE3D-5s	43.6505	10.5834
A284	RT130	LE3D-5s	43.6489	10.5795
ESPERIMENTO #3: 30/10/09 11:00-30/10/09 11:30				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
9195	RT130	LE3D-5s	43.6535	10.5807
932B	RT130	LE3D-5s	43.6518	10.5822
931E	RT130	LE3D-5s	43.6513	10.5851
920A	RT130	LE3D-5s	43.6505	10.5834
A284	RT130	LE3D-5s	43.6489	10.5795
9324	RT130	LE3D-5s	43.6479	10.5765
9213	RT130	LE3D-5s	43.6459	10.5734
9204	RT130	LE3D-5s	43.6443	10.5698
ESPERIMENTO #4: 10/11/09 10:00-12/11/09 09:00				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
932B	RT130	LE3D-5s	43.6518	10.5822
931E	RT130	LE3D-5s	43.6513	10.5851
920A	RT130	LE3D-5s	43.6505	10.5834
A284	RT130	LE3D-5s	43.6489	10.5795
9324	RT130	LE3D-5s	43.6479	10.5765
9213	RT130	LE3D-5s	43.6459	10.5734
9204	RT130	LE3D-5s	43.6443	10.5698

ESPERIMENTO #5: 12/11/09 14:00-17/11/09 11:00				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
920A	RT130	LE3D-5s	43.6310	10.5013
932B	RT130	LE3D-5s	43.6303	10.5013
A284	RT130	LE3D-5s	43.6303	10.5022
ESPERIMENTO #6: 17/11/09 14:30-17/11/09 17:00				
Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
9195	RT130	LE3D-5s	43.6305	10.4669
9324	RT130	LE3D-5s	43.6287	10.4668
9204	RT130	LE3D-5s	43.6298	10.4802
9213	RT130	LE3D-5s	43.6296	10.4643
920A	RT130	LE3D-5s	43.6296	10.4657
932B	RT130	LE3D-5s	63.6296	10.4682
931E	RT130	LE3D-5s	43.6296	10.4738
A284	RT130	LE3D-5s	43.6297	10.4669

**Tabella 1** Coordinate delle stazioni per i 6 esperimenti.  
**Table 1** Coordinates of the stations for the 6 experiments.

Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
VIR01	72A	CMG40T	43.6530	10.5866
VIR02	72A	CMG40T	43.6381	10.5553

**Tabella 2** Coordinate delle due stazioni semi-permanenti VIR01 e VIR02.  
**Table 2** Coordinates of the two semi-permanent stations.

Nome stazione	Acquisitore	Sensore	Latitudine(WGS84)	Longitudine(WGS84)
hv01	72 A	LE3D-5s	43.6300	10.5020
hv02	72A	LE3D-5s	43.6303	10.5048
hv03	72A	LE3D-5s	43.6306	10.5072
hv04	72A	LE3D-5s	43.6309	10.5098
hv05	72A	LE3D-5s	43.6311	10.5124
hv06	72A	LE3D-5s	43.6314	10.5150
hv07	72A	LE3D-5s	43.6316	10.5177
hv08	72A	LE3D-5s	43.6318	10.5203
hv09	72A	LE3D-5s	43.6321	10.5229
hv10	72A	LE3D-5s	43.6372	10.5190
hv11	72A	LE3D-5s	43.6372	10.5143
hv12	72A	LE3D-5s	43.6386	10.5094
hv13	72A	LE3D-5s	43.6318	10.5033
hv14	72A	LE3D-5s	43.6338	10.4975
hv15	72A	LE3D-5s	43.6349	10.4915
hv16	72A	LE3D-5s	43.6370	10.4861
hv17	72A	LE3D-5s	43.6379	10.4799
hv18	72A	LE3D-5s	43.6395	10.4740

**Tabella 3** Coordinate delle misure HV.  
**Table 3** Coordinates of the HV measurements.





**Figura 2** Mappa dei punti di misura occupati durante l'intero periodo di acquisizione. In celeste i punti dove sono state effettuate le misure H/V.

**Figure 2** Overall map of station sites throughout the seismic survey. In light blue the H/V measurement sites.

zioni sismiche in prossimità di *Eolico Gello*. Le coordinate e caratteristiche delle stazioni sono riportate nella tabella 1. La frequenza di campionamento per tutte le stazioni è di 100 Hz.

Due stazioni sismiche sono state mantenute fisse tra VIRGO ed *Eolico Gello* nelle posizioni indicate in tabella 2 per l'intero periodo dell'esperimento.

Le misure puntuali mirate alla determinazione dei rap-

porti spettrali H/V sono state effettuate il giorno 26/10/09. Nella tabella 3 sono riportate le caratteristiche delle tre stazioni utilizzate e le posizioni di ciascun sito di misura.

Inoltre, abbiamo integrato questo data set con delle registrazioni di 2 accelerometri EPISENSOR ubicati a Torre Nord (NT) e a Torre Ovest (WT), di un velocimetro CMGV ubicato presso il *Central Building* per il periodo

Acquisitore / Registratore	Proprietà	Quantità	Nome	Sensore	Banda passante (Hz)	Output	Frequenza di Campionamento (Hz)
REFTEK 130	INGV	9	9* A*	Lennartz LE3D-5s	0.2- 40	Velocità	125
REFTEK 72A	INGV	2	1078 7148	Guralp CMG40T	0.025 - 50	Velocità	100
REFTEK 72A	INGV	3	HV*	Lennartz LE3D-5s	0.2- 40	Velocità	100
VIRGO ACQ*	EGO	1	CMGV	Guralp CMG40T	0.025 - 50	Velocità	50
VIRGO ACQ*	EGO	2	EPNE EPWE	Episensor	0-200	Accelerazione	1000
REFTEK 130	IRIS-PASSCAL	1	VRGR	STS2	0.0083- >50	Velocità	50

\* Sistema interno acquisizione dati di VIRGO  
\* Virgo acquisition system

**Tabella 4** Strumentazione utilizzata nell'esperimento.

**Table 4** Instruments used during the experiment.

28/10/09-18/11/09 (dati forniti da EGO) e di una stazione IRIS-PASSCAL (VRGR) installata da INGV a Torre Ovest durante un esperimento svolto nel 2004 nell'ambito del progetto "RETREAT". Infine ulteriori registrazioni sono state effettuate con le stazioni mobili, ubicate per brevi periodi a Torre Nord e Torre Ovest al fine di effettuare un "Huddle Test" con le stazioni proprietà di EGO. La varietà della strumentazione utilizzata ha reso necessario la conduzione preliminare di acquisizioni mirate alla comparazione della caratteristiche dei vari tipi di acquisitori e sensori.

### 3. Caratteristiche spettrali del rumore sismico

Questa sezione è dedicata alla caratterizzazione spettrale del rumore sismico osservato in prossimità di *Eolico Gello*. I dati analizzati provengono dalla stazione di riferimento 931E (Figura 2), ubicata ad una distanza dagli aerogeneratori compresa fra 0.47 e 2.26 km.

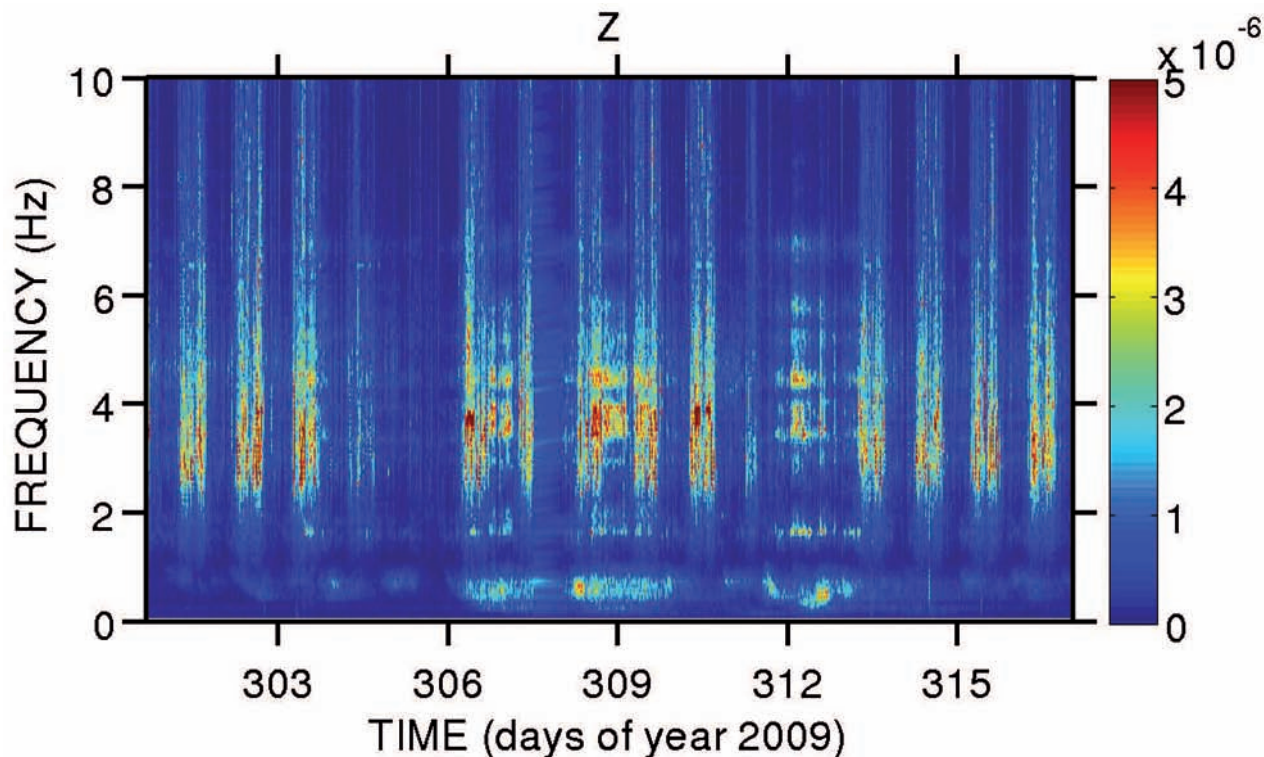
#### 3.1 Caratteristiche generali del rumore sismico

Il contenuto spettrale del rumore sismico alla stazione di riferimento per tutto il periodo delle misure è riportato in Figura 3 in forma di rappresentazione tempo-frequenza

(spetrogramma), per la componente verticale della velocità del suolo. Questa rappresentazione è stata ottenuta calcolando la trasformata di Fourier su finestre di 600 s in movimento lungo il segnale senza sovrapposizione; le ampiezze spettrali sono state successivamente mediate su bande di frequenza di larghezza pari a 0.05 Hz.

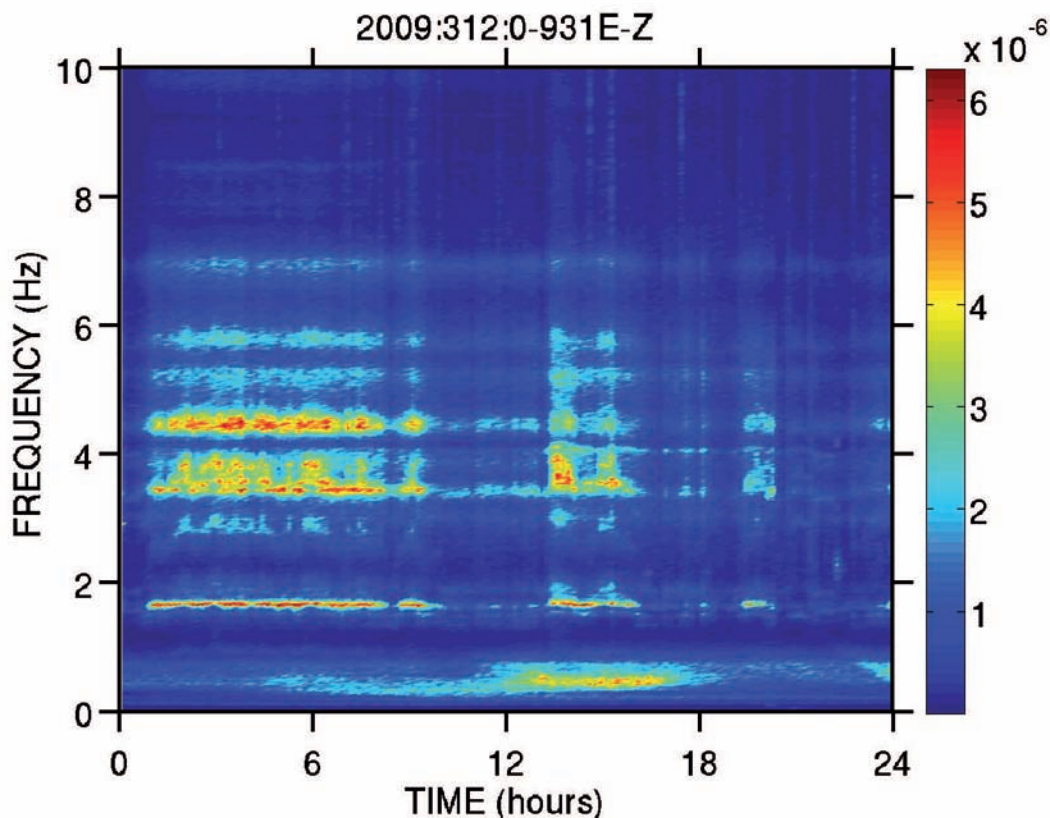
Nella banda 0.2-1 Hz, il rumore è caratterizzato da massimi di ampiezza localizzati nel tempo, verosimilmente associabili al rumore sismico di origine marina. A frequenze maggiori di 1 Hz, l'ampiezza del rumore ha un tipico andamento giornaliero, raggiungendo valori massimi durante le ore diurne dei giorni lavorativi. Durante il massimo dell'attività antropica, l'ampiezza è distribuita abbastanza uniformemente su tutta la banda 1-10 Hz. In Figura 4 è illustrato lo spettrogramma relativo alla componente Z per un singolo giorno di registrazione (Domenica 8 Novembre 2009). In questa rappresentazione di maggior dettaglio si osservano alcuni marcati picchi spettrali nella banda 1-10 Hz (ad esempio, a frequenze di 1.5, 3.5, e 4.5 Hz), la cui ampiezza è maggiore durante la notte, e la cui origine non è quindi direttamente correlabile con attività antropiche.

La Figura 5 illustra le variazioni spettrali del rumore in orari notturno e diurno, in entrambe i casi in assenza di vento. Le osservazioni principali sono: (1) A parte un picco



**Figura 3** Spetrogramma alla componente verticale del moto per la stazione 931E durante tutta la durata delle misure. La scala dei tempi è in giorni Giuliani; per riferimento, il giorno 302 corrisponde a giovedì 29 Ottobre 2009. La scala dei colori indica la densità di ampiezza spettrale in  $ms^{-1}/\sqrt{Hz}$ .

**Figure 3** Spectrograms for the vertical component of motion at station 931E for the whole duration of the survey. The time scale is expressed in Julian days from the beginning of the year; as a reference, day 302 corresponds to the October 29, 2009. Color scale indicates amplitude spectral density in  $ms^{-1}/\sqrt{Hz}$ .



**Figura 4** Spettrogramma giornaliero per la componente Z della stazione di riferimento 931E per il giorno 8 Novembre 2009 (Domenica); la scala dei tempi ha inizio alla mezzanotte UTC. La scala dei colori indica la densità di ampiezza spettrale in  $ms^{-1} / \sqrt{Hz}$ .

**Figure 4** Daily spectrogram for the vertical component of motion at reference station 931E taken on Sunday November 8, 2009; the time scale begins at 00:00 UTC. The colour scale indicates the amplitude spectral density expressed in  $ms^{-1} / \sqrt{Hz}$ .

spettrale a circa 3 Hz presente sulla componente Z, il rumore antropico (diurno) non presenta alcuna caratteristica monocromatica; piuttosto, la sua energia è distribuita in maniera abbastanza uniforme su tutta la banda 1-10 Hz. (2) In generale, la firma spettrale del rumore è la medesima sia durante il giorno che la notte, a prescindere dalla variazione di ampiezza. Fa eccezione un lobo spettrale a 1.7 Hz, presente sulla componente NS durante la notte, ed obliterato dal rumore antropico durante il giorno; (3) L'origine di questo picco non può essere dovuta ad un effetto locale di amplificazione, altrimenti esso sarebbe visibile anche negli spettri diurni.

### 3.2 Analisi di Covarianza

La Figura 6 riporta la matrice di covarianza per la componente N del moto, ottenuta dalle righe del corrispondente spettrogramma di Figura 3. Il generico elemento  $ij$  di questa matrice (simmetrica) indica la correlazione fra le serie temporali dell'ampiezza spettrale associata alle frequenze di indice  $i$  e  $j$ . Per questa matrice, i valori di picco fuori dalla diagonale rappresentano le coppie di frequenze per le quali l'ampiezza del rumore sismico è correlata nel tempo, e che presentano maggior ampiezza (le stime di covarianza, infatti,

non sono normalizzate).

Nella figura si nota una marcata correlazione delle frequenze di  $\sim 0.45, 1.7, 3.5, 4.5$  e  $5.5$  Hz. È da notare come questi picchi di correlazione corrispondano alle frequenze evidenziate nella seconda metà del giorno dallo spettrogramma di Figura 4.

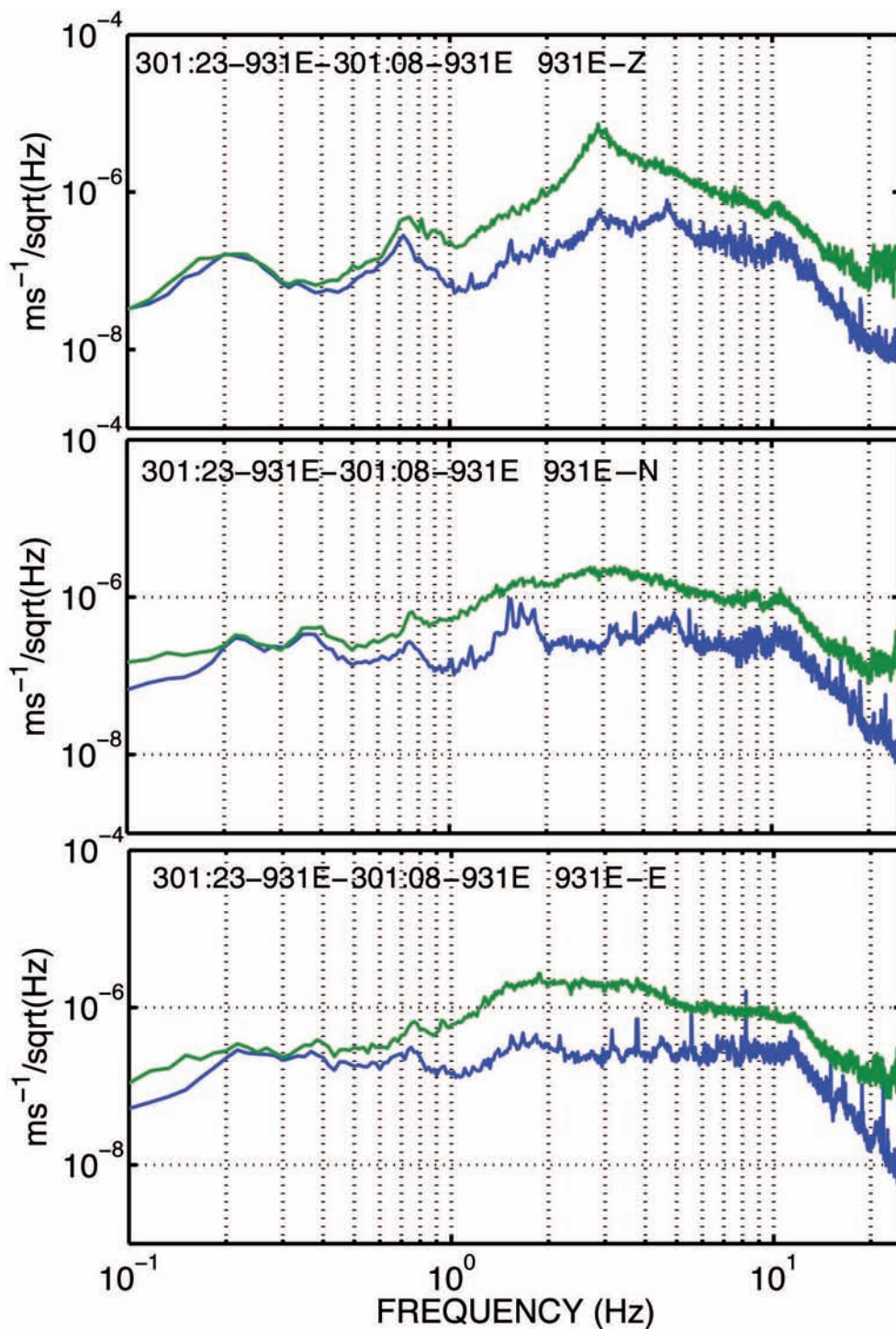
### 4. Relazioni fra rumore sismico e ventosità

In questa sezione vengono ricercate la relazione fra l'ampiezza del rumore e le sue caratteristiche spettrali con l'intensità e la direzione del vento. Unite alle osservazioni riportate al termine della Sezione precedente, tali determinazioni mirano alla discriminazione delle componenti spettrali del campo d'onda microsismico direttamente associabili all'azione degli aerogeneratori. I dati di ventosità, campionati ad una frequenza di 6 dati / minuto, provengono da una stazione anemometrica installata sull'edificio di controllo di VIRGO "Daniel Enard" e cortesemente messi a disposizione da EGO. È stato chiaramente osservato come i venti più frequenti siano quelli da E (direzione di provenienza  $90^{\circ}$ - $100^{\circ}$ ), mentre invece i venti più intensi provengono preferenzialmente da W-NW ( $270^{\circ}$ - $300^{\circ}$ ).

#### 4.1 Relazioni generali fra rumore sismico e ventosità

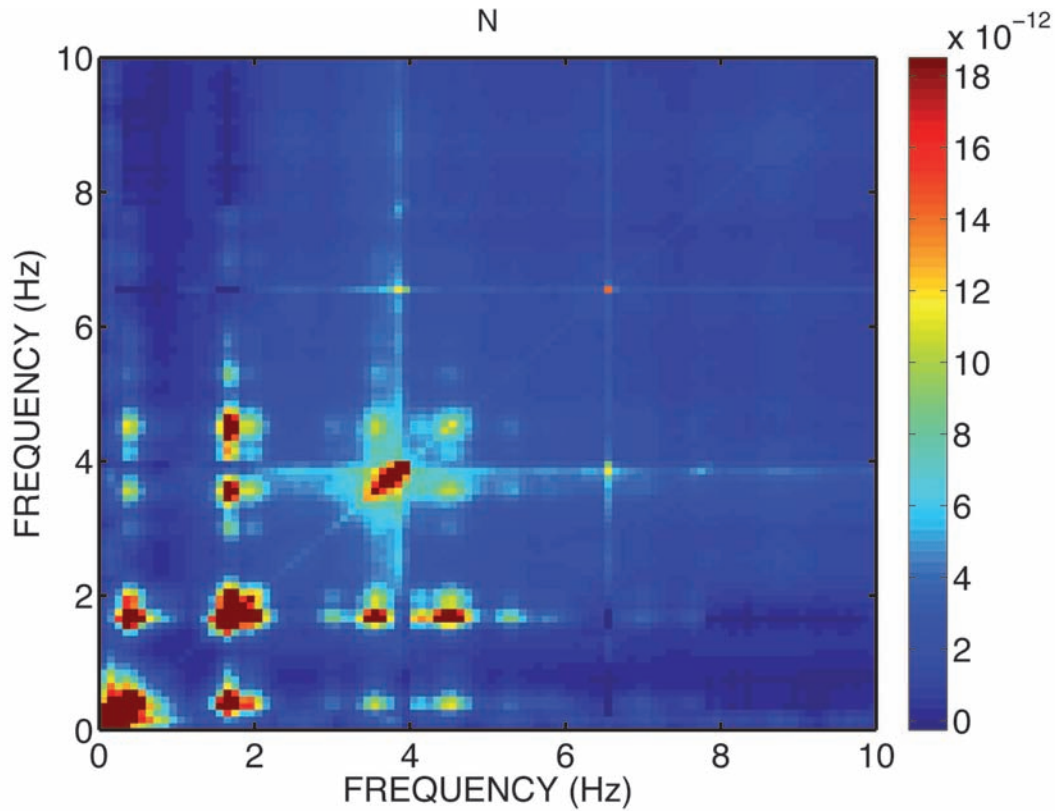
Come accennato nell'introduzione, è ben noto in letteratura che il vento, con la sua azione forzante su piante e manufatti, provochi un generale aumento della vibrazione microsismica.

In un dettagliato studio sul rumore sismico a Danil, New Mexico (USA), Withers et al., [1996] osservano una marcata correlazione fra l'ampiezza spettrale del rumore sulla banda 1-60 Hz ed il vento, per velocità maggiori di circa 10 km/h (3m/s). Simili conclusioni sono state raggiunte da



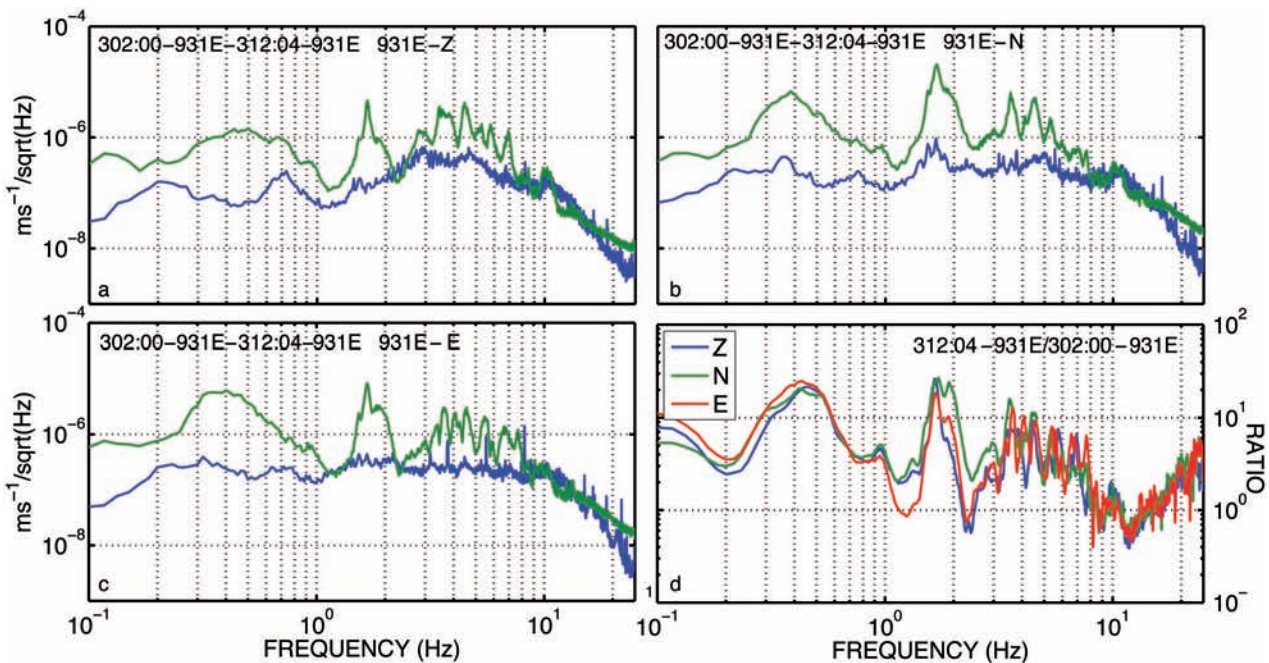
**Figura 5** Confronto fra le densità spettrali ottenute alle 3 componenti della stazione 931E per un'ora di registrazione notturna (linea blu) e diurna (linea verde). Giorno Giuliano e ora di inizio delle registrazioni sono riportati sopra ciascuna figura.

**Figure 5** Comparison between the spectral densities obtained for the 3 components of motion at station 931E for one-hour-long signal recorded at nocturnal and diurnal periods (blue and green lines, respectively). Julian day and time at the beginning of the recordings are reported above each figure.



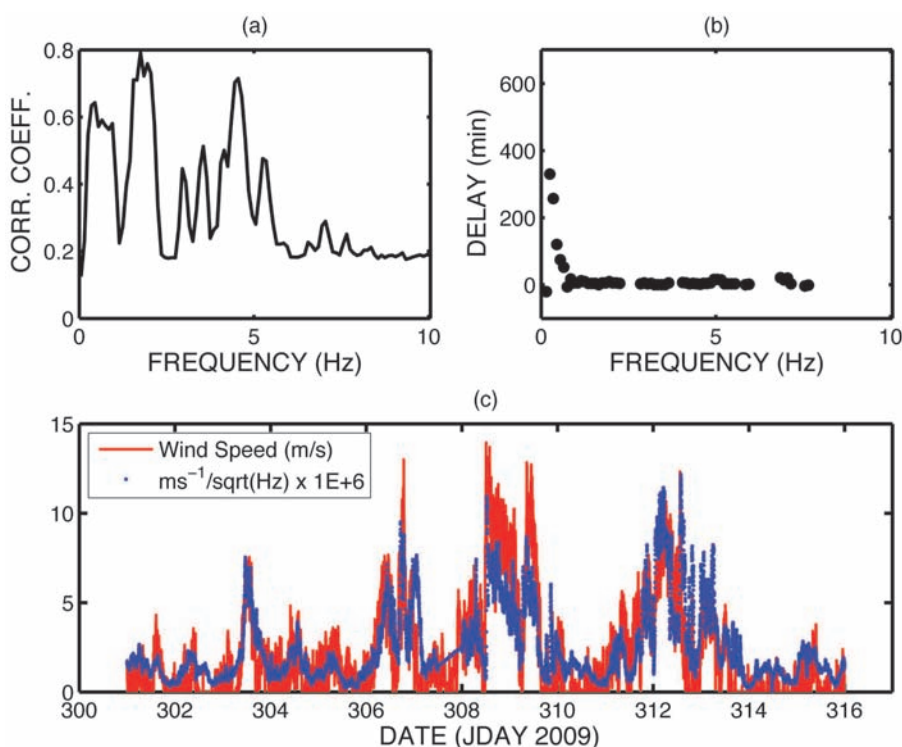
**Figura 6** Covarianza spettrale del rumore sismico per la banda di frequenza 0-10 Hz calcolata alla componente NS della stazione 931E.

**Figure 6** Spectral covariance of seismic noise for the frequency band 0-10 Hz calculated for the NS component of station 931E.



**Figura 7** (a,b,c) Spettri di rumore alle 3 componenti del moto del suolo per un'ora di registrazione durante una notte di calma (linea blu; inizio 302:00; velocità del vento c.a 5 km/h) ed una di vento forte (linea verde; inizio 312:04; velocità del vento c.a 35 km/h). (d) Rapporti spettrali vento/quiete per le 3 componenti del moto.

**Figure 7** (a, b, c) Noise spectra for each component of motion for one-hour-long record during a calm night (blue line; start 302:00; wind velocity about 5 km/h) and a windy night (green line; start 312:04; wind velocity about 35 km/h). (d) Spectral ratios between windy and calm spectra for the 3 components of motion.



**Figura 8** Correlazione fra ampiezza spettrale del rumore sismico alla componente NS del moto del suolo all’array e la velocità del vento, per tutto il periodo di misura. (a) Massimi delle funzioni di cross-correlazione normalizzata. (b) Ritardi temporali per i quali la funzione di cross-correlazione assume il valore massimo. Notare il ritardo di circa 5-6 h associato al picco di coerenza a 0.45 Hz, consistente con l’ipotesi che questo picco sia principalmente dovuto all’azione del mare, la cui intensità è ritardata rispetto all’aumento di velocità del vento. (c) Confronto fra le serie temporali di velocità del vento e densità spettrale del rumore sismico alla frequenza di 1.7 Hz.

**Figure 8** Correlation between the spectral amplitude of seismic noise for the component NS of motion and the wind speed throughout the duration of our survey. (a) Maxima of the normalized cross-correlation function. (b) Time lags corresponding to the maxima of the correlation function. Note the delay of about 10 h associated with the coherence peak at 0.45 Hz, consistent with the hypothesis that this peak is due to marine noise, whose intensity is delayed with respect to wind speed. (c) Comparison between the times series of wind velocity and seismic noise spectral density at the frequency 1.7 Hz.

Singh [2007] in uno studio sul rumore sismico ad AIGO, l’antenna interferometrica per onde gravitazionali installata in Australia occidentale. Anche in questo caso, l’ampiezza spettrale del rumore è ben correlata con la ventosità per tutta la banda di frequenze 1-25 Hz e per velocità del vento maggiori di 10 km/h.

La Figura 7 illustra le caratteristiche spettrali del rumore sismico registrato alla stazione 931E per 2 intervalli notturni, in assenza di vento e con venti moderati-forti (20-40 km/h). Il vento provoca un aumento per più di un ordine di grandezza nell’ampiezza spettrale del rumore sismico; tuttavia, questo aumento non interessa tutta la banda spettrale esaminata, come riportato negli studi citati in precedenza, bensì solo alcuni picchi spettrali ben definiti. Per meglio quantificare questa osservazione, abbiamo calcolato la correlazione fra le serie temporali di velocità del vento e densità di ampiezza spettrale del rumore su ridotte (0.05 Hz) bande

consecutive di frequenza. I risultati, mostrati nella Figura 7d, indicano come le due serie temporali siano ben correlate in corrispondenza di alcune frequenze ben definite, fra le quali quelle di ~ 0.45 Hz e 1.7 Hz sono comuni a tutte e tre le componenti del moto.

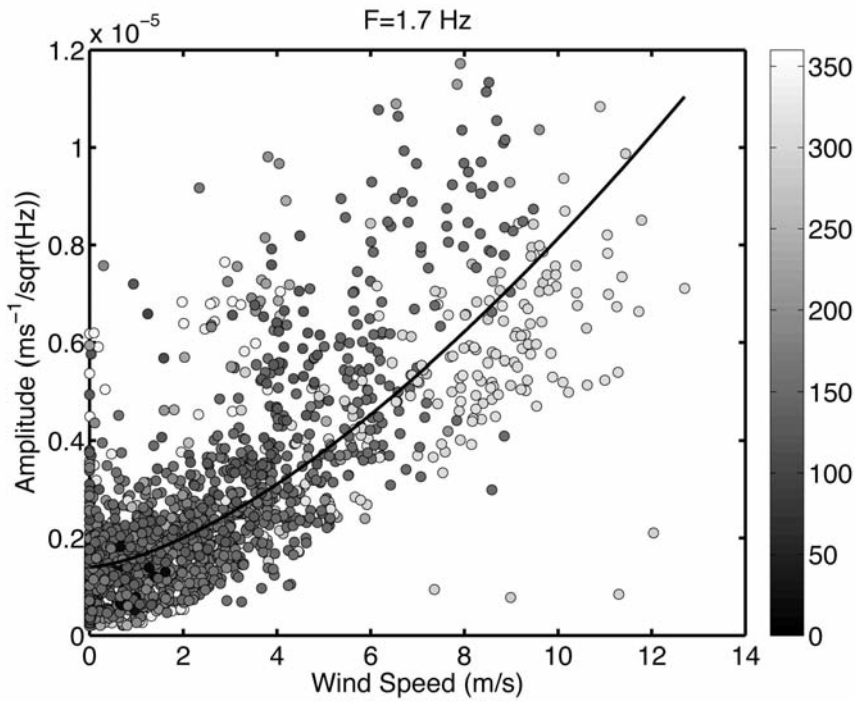
Un esempio di questa correlazione è illustrato nella Figura 8c, in cui l’ampiezza spettrale media per la banda 1.6-1.8 Hz alla componente NS del sito di riferimento è comparata con l’andamento del vento lungo tutto il periodo di osservazione. Infine, la Figura 9 illustra le relazioni fra velocità del vento  $v$  e densità di ampiezza spettrale  $A$  al sito di riferimento per la frequenza di 1.7 Hz. In accordo con Shofield [2001], le misure sono adattate in maniera ragionevole (coefficiente di correlazione  $R \sim 0.51$ ) da una legge del tipo  $A = a \cdot v^{1.5} + b$ , dove le costanti  $a$  e  $b$  assumono i valori di  $2.13 \times 10^{-7} \text{ Hz}^{-0.5}$  e  $1.40 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1} \text{ Hz}^{-0.5}$ , rispettivamente, per velocità del vento e densità spettrale della velocità del suolo espresse in  $\text{m/s}$  e  $\text{ms}^{-1} / \sqrt{\text{Hz}}$ , rispettivamente. Tuttavia, si nota una marcata dispersione dei valori sperimentali attorno al

modello, il quale appare fornire una sottostima delle ampiezze previste nel caso di venti dai due quadranti orientali.

#### 4.2 Misure di campo vicino

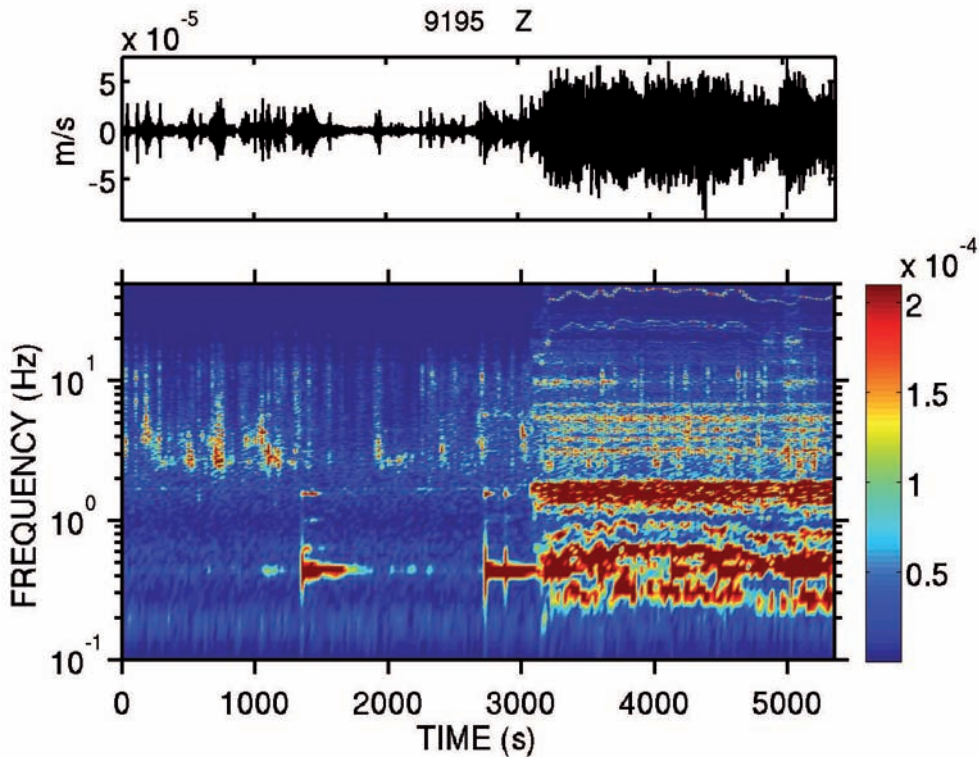
Il giorno 10 Novembre, fra le 12 e le 14 UTC, abbiamo condotto delle misure in prossimità della turbina n.2 ( $v$  Figura 2), durante un intervallo di venti molto deboli (~5 km/h), cogliendo comunque la sequenza di attivazione dell’aerogeneratore. L’attivazione dell’aerogeneratore, ben visibile poco dopo il secondo 3000 nello spettrogramma di Figura 10, è caratterizzata da uno spettro molto complesso, in cui si riconoscono:

- (i) alcuni picchi spettrali modulati in frequenza, di cui si evidenziano armoniche a 0.3 Hz, 0.9 Hz, e probabilmente anche a frequenze superiori a 20 Hz; l’origine di queste componenti è probabilmente attribuibile all’effetto “bilanciere” associato con la rotazione delle 3 pale del-



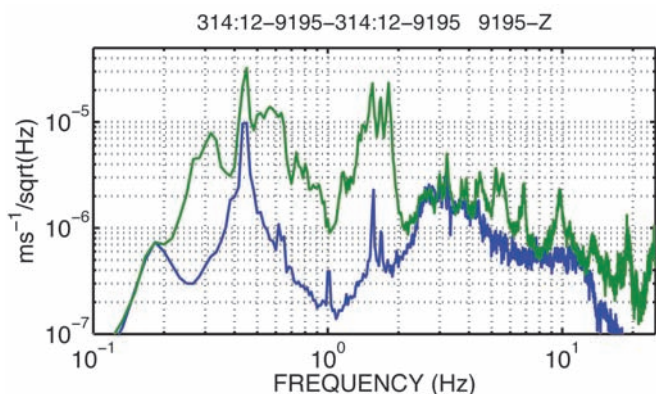
**Figura 9** Dipendenza dell'ampiezza spettrale della velocità del suolo alla frequenza 1.7 Hz dalla velocità del vento. Il colore dei punti indica la direzione di provenienza del vento (gradi misurati in direzione oraria dal N), secondo la scala di grigio riportata alla destra. La linea nera rappresenta l'adattamento di una legge di potenza ai dati sperimentali.

**Figure 9** Dependence of the ground velocity spectral amplitude at 1.7 Hz on wind speed. Graytones represent wind direction, according to the gray scale at the right (degrees measured clockwise from N). The black line represents the fit of a power law to the experimental data.



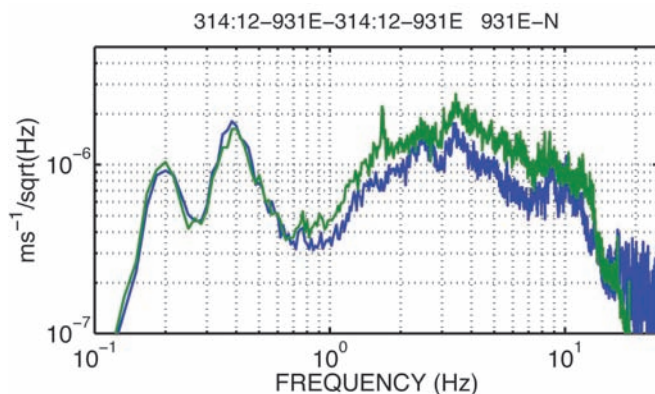
**Figura 10** Misura della componente Z della velocità del suolo e corrispondente spettrogramma in prossimità della turbina eolica n. 2. Le eliche dell'aerogeneratore sono entrate in funzione al secondo 3000. La scala dei colori indica la densità di ampiezza spettrale in  $\text{ms}^{-1} \text{Hz}^{-0.5}$ .

**Figure 10** Measure of the Z component of the ground velocity and related spectrogram close to turbine n.2. The turbine switched on at second 3000. Colour scale indicates the amplitude spectral density expressed in  $\text{ms}^{-1} \text{Hz}^{-0.5}$ .



**Figura 11** Confronto fra le densità spettrali misurate in prossimità della turbina n. 2 per la componente Z in assenza (linea blu) e presenza (linea verde) di movimento delle pale.

**Figure 11** Comparison between the spectral densities measured close to turbine n. 2 for the Z component without (blue line) and with (green line) the turbines switched on.



**Figura 12** Confronto fra le densità spettrali misurate ad una distanza di circa 1 km dalla turbina n. 2 per la componente N in assenza (linea blu) e presenza (linea verde) di movimento delle pale.

**Figure 12** Comparison between the spectral densities measure 1km far from the wind power plant n. 2 for the N component without (blue line) and with the turbines (green line) switched on.

l'elica, il cui periodo completo di rivoluzione è stato stimato visivamente nell'ordine di 10 s;

- (ii) due componenti di maggior energia stazionarie nel tempo, a frequenze di 0.45 e 1.7 Hz;
- (iii) alcune linee spettrali, sempre stazionarie, a frequenze di 3, 3.5, 4.5... Hz, diverse comunque a seconda della componente del moto considerata.

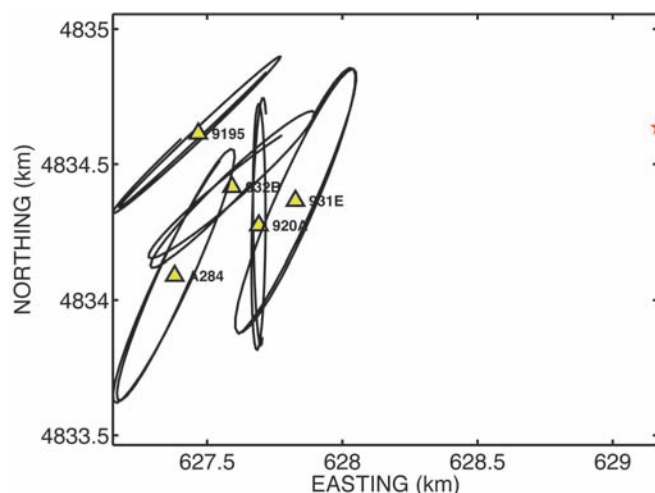
La complessità dello spettro di vibrazione in prossimità della turbina è ben evidenziata dalle Figure 11 e 12, dove vengono comparate le densità spettrali prima e dopo l'attivazione dell'aerogeneratore. Alle frequenze di 0.3, 0.6 e 1.7 Hz, l'attivazione della turbina induce un aumento nell'ampiezza della vibrazione di un fattore 50. Alla stazione di riferimento 931E, ubicata a circa 1.2 km dalla turbina, l'attivazione di quest'ultima si manifesta solo con un debole aumento del picco spettrale a 1.7 Hz (Figura 12).

### 5. Proprietà direzionali

In questa sezione si analizzano le proprietà cinematiche (direzione di propagazione e velocità apparente) stimate mediante gli *arrays* densi installati in prossimità del parco eolico. Le analisi sono state condotte utilizzando il metodo PWF [*Plane Wave Fitting*; Del Pezzo and Giudicepietro, 2002]. Nell'approssimazione di fronte d'onda piano, questa tecnica stima le due componenti del vettore lentezza sulla base dei tempi di ritardo inter-stazione stimati dal massimo della funzione di cross-correlazione. Abbiamo condotto l'analisi calcolando la funzione di cross-correlazione su finestre di 10 minuti in movimento con una sovrapposizione di 5 minuti lungo 4 ore di registrazione. L'utilizzo di finestre temporali così estese consegue da numerosi tests preliminari mirati a verificare la stabilità delle stime di correlazione in funzione

della lunghezza del segnale analizzato. L'analisi è stata poi ripetuta per 51 bande spettrali di ampiezza 0.2 Hz sovrapposte del 50%, comprese quindi nell'intervallo 0.1-5.4 Hz. La geometria di acquisizione è illustrata in Figura 13. I risultati relativi alle tre componenti del moto sono riportati invece in Figura 14, relativamente ad un intervallo di vento forte.

È interessante notare le relazioni fra direzioni di propagazione e direzione principale di vibrazione del suolo (*particle motion*). La Figura 13 riporta un esempio di traiettoria sul piano orizzontale del *particle motion* alla frequenza di 1.7 Hz. Si nota come le direzioni dominanti di vibrazione siano (a) rettilinee, e (b) quasi perpendicolari alla direzione di propagazione, sug-



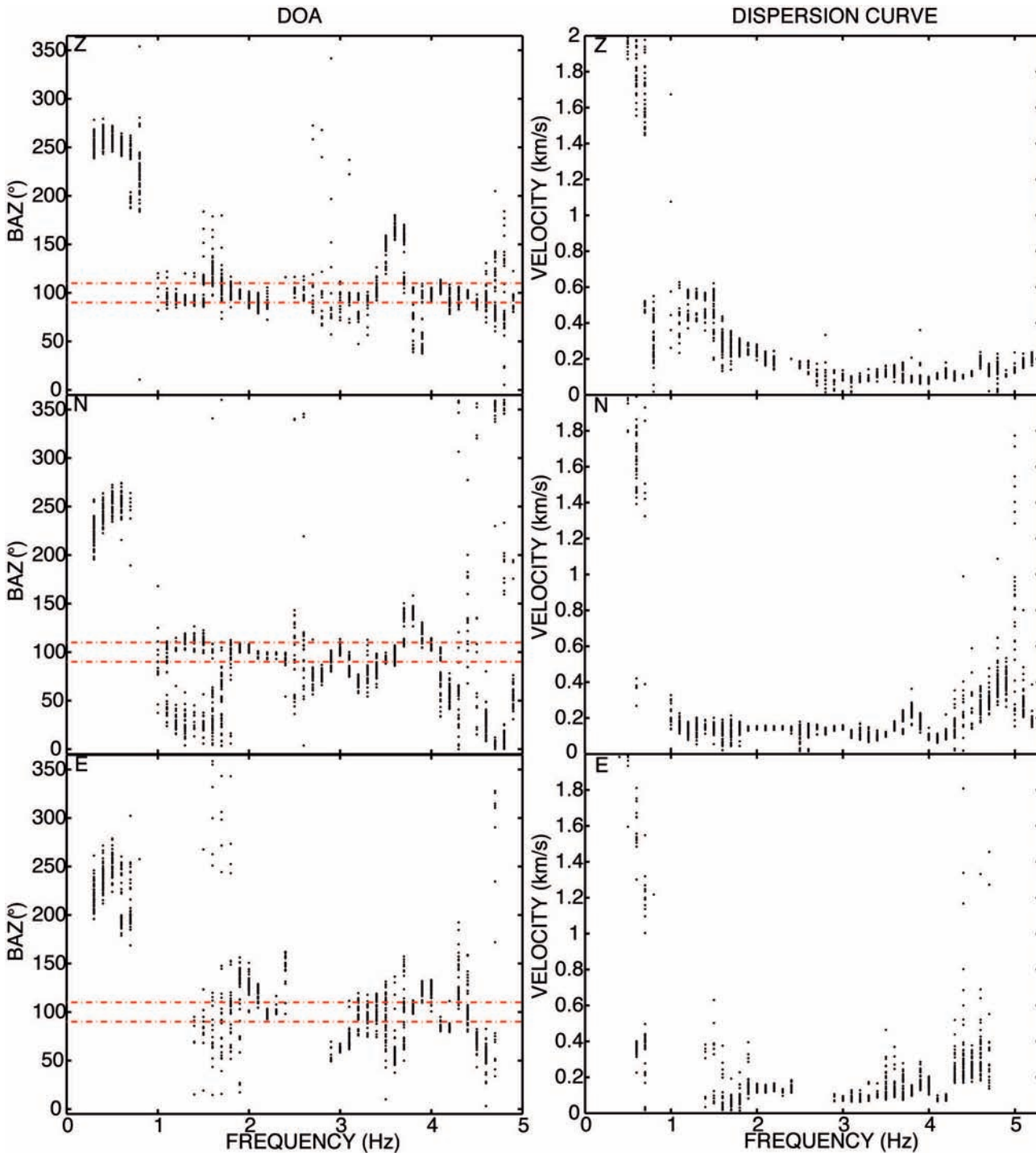
**Figura 13** Direzioni caratteristiche di vibrazione del suolo sul piano orizzontale e configurazione dell'array utilizzato per la misura delle proprietà direzionali. La stelletta rossa indica, per riferimento, la posizione del baricentro delle parco eolico.

**Figure 13** Configuration of the array used for measuring the directional properties of the noise wavefield, and particle motion trajectories on the horizontal plane. The red star indicates the location of the barycentre of the wind Park.



gerendo quindi un campo d'onda, a questa particolare frequenza, dominato da onde trasversali. Alla medesima frequenza, la velocità apparente di propagazione osservata a tutte e tre le componenti del moto è nell'or-

dine di 200 m/s, consistente quindi con onde di Love propagantesi in terreni poco consolidati e parzialmente saturi [e.g., Campbell, 2009], caratteristici della geologia superficiale al sito di misura (Figura 14).



**Figura 14** Nella colonna di sinistra, direzioni di provenienza (backazimuth) misurate in senso orario dal N per le 3 componenti del moto lungo 4 ore di registrazione alle stazioni di Figura 13, per l'intervallo di frequenze 0.2-5 Hz. Le linee rosse tratteggiate indicano l'intervallo azimuthale che include il Parco Eolico. Nella colonna di destra, stime della velocità apparente in funzione della frequenza (velocità di fase). Per entrambe le serie di grafici, abbiamo riportato solo i valori associati ad un coefficiente di correlazione medio maggiore di 0.5. **Figure 14** (Left column) backazimuths measured clockwise from North for the 3 components of motion derived from analysis of a 4-hour-long recording at the stations of figure 13, for the 0.2-5 Hz frequency band. The red dashed lines indicate the azimuthal interval corresponding to the wind park. (Right column) estimates of the apparent velocities as a function of frequency (phase velocity). In both columns, we present only results associated with an average correlation coefficient greater than 0.5.

## 6. Attenuazione con la distanza

In questa sezione si analizzano le variazioni di ampiezza della vibrazione microsismica con l'aumentare della distanza dal parco eolico. Si riporta un esempio relativo ad un intervallo orario acquisito durante un periodo con venti da E-SE (8 Novembre 2009; velocità media  $\sim 25$  km/h).

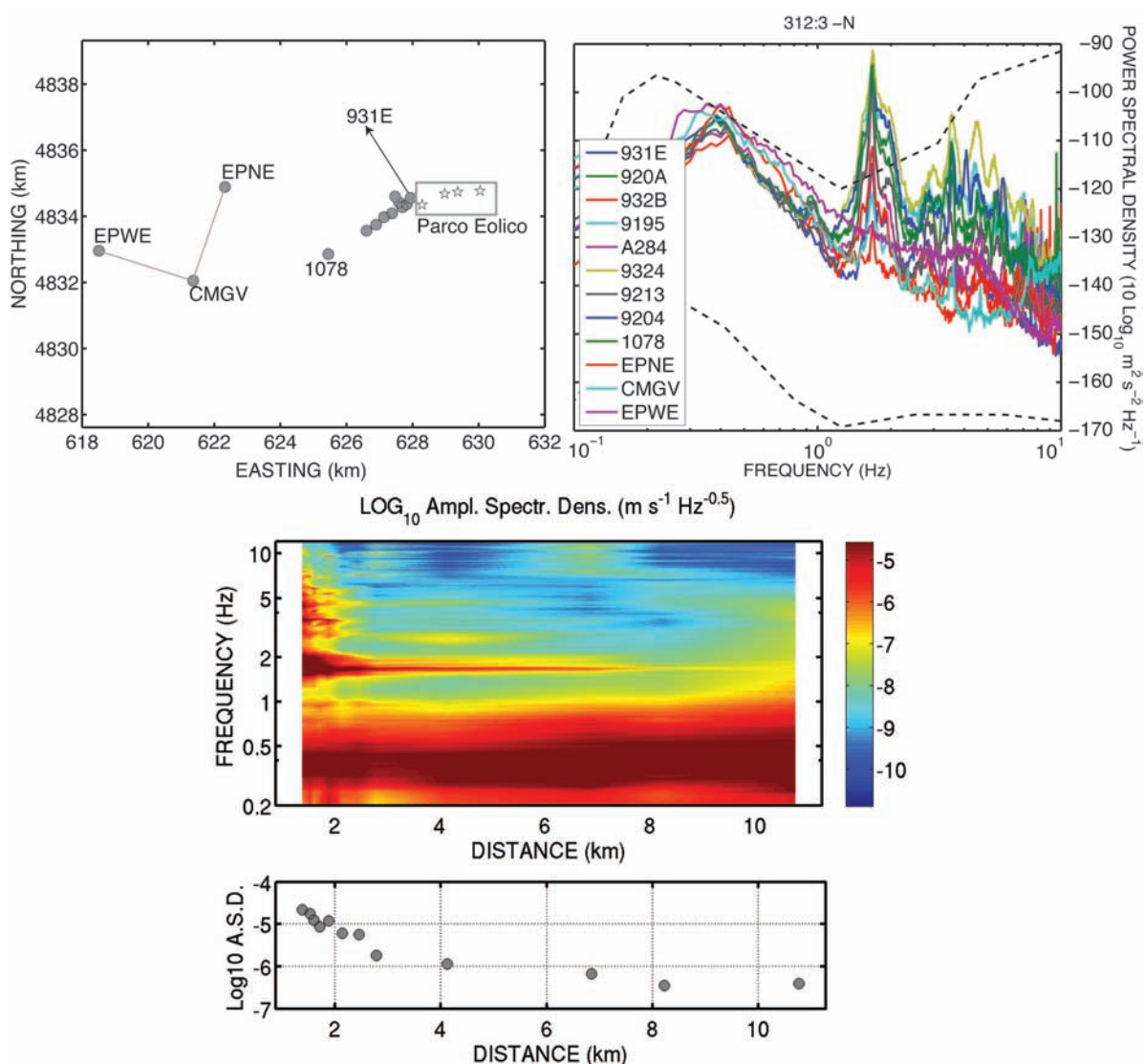
Queste analisi forniscono ulteriore supporto alla definizione delle frequenze caratteristiche di vibrazione degli aerogeneratori. Se osserviamo un determinato picco spettrale attenuarsi con l'aumentare della distanza dal parco eolico, è allora verosimile che l'origine di tale energia sia attribuibile all'azione degli aerogeneratori.

Come ben evidenziato dall'esempio mostrato in Figura

15c, l'energia a frequenza 1.7 Hz è osservabile sino a distanze di 11 km dal parco eolico (Torre W di VIRGO-stazione EPWE). Sono presenti altri due picchi a 3.5 e 4.5 Hz la cui energia diminuisce allontanandosi dal parco eolico. L'attribuzione di questo segnale all'azione degli aerogeneratori è supportata da 2 evidenze separate: (1) la distribuzione dei tempi di ritardo rispetto alla stazione di riferimento, e (2) la coerenza con la stazione di riferimento.

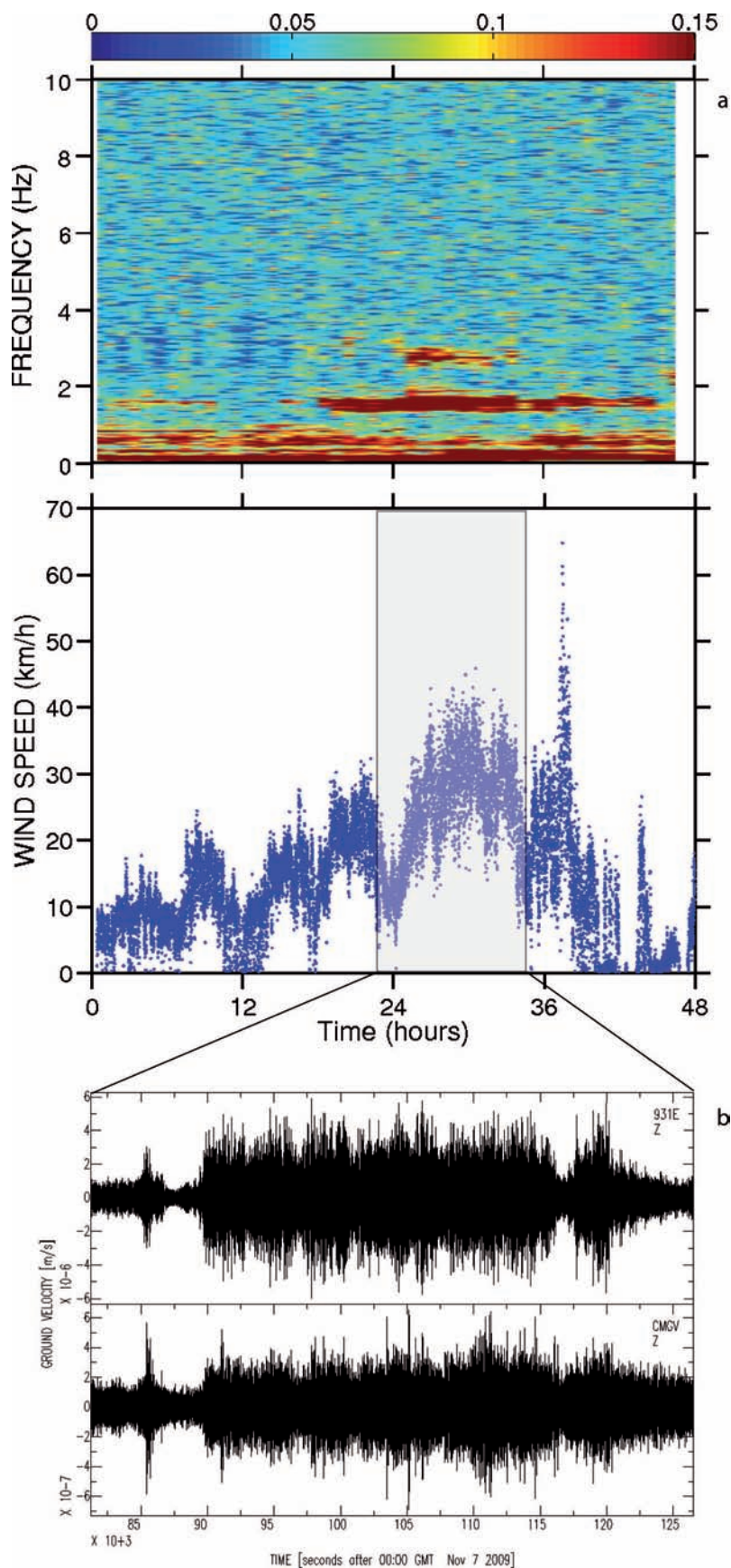
### 6.1 Distribuzione spaziale dei tempi di ritardo

Per quest'analisi, abbiamo cross-correlato i segnali alla componente verticale delle stazioni 931E filtrati nella banda 1-3 Hz, 1078, CMGV ed EPNE (Figura 15a), al fine di misurare i tempi relativi di ritardo e quindi definire le direzioni di propagazione.



**Figura 15** (a) Mappa delle stazioni utilizzate per misurare la variazione dell'ampiezza spettrale con la distanza. (b) Densità di potenza spettrale per la componente NS di tutti i siti di misura. Le linee tratteggiate indicano i modelli Low- and High-Noise di Peterson [1993] (c) Variazioni dell'ampiezza spettrale con la distanza dal parco eolico. Il grafico in basso riporta l'andamento dell'ampiezza spettrale (in scala logaritmica) per la frequenza di 1.7 Hz.

**Figure 15** (a) Map of stations used to investigate the variations of spectral amplitudes for increasing distances from the wind park. (b) Power spectral densities for the N component of all the stations. Data are compared to Peterson's [1993] Low- and High-Noise models (dashed lines). (c) Variation of the spectral amplitude with distance from the Wind Park. The bottom panel the decay of spectral amplitude (logarithmic scale) for a narrow frequency band centered at 1.7 Hz.



**Figura 16** (a) Coerenza fra le componenti Z del moto del suolo delle stazioni CMGV e 931E (in alto), comparata con la velocità del vento (in basso) per un intervallo di 48 ore con inizio alle 00:00 UTC del 7 Novembre 2009. La coerenza è mappata secondo la scala di colori riportata in alto. Notare l'apparizione di un picco di coerenza a 1.7 Hz in corrispondenza della massima velocità del vento. (b) Sismogrammi per la componente Z alle medesime due stazioni durante l'intervallo di maggior ventosità (ore 22-34 in [a]).

**Figure 16** (a) Coherency for the Z components of stations CMGV and 931E (top panel) compared to wind speed (bottom panel) for a 2-day-long period beginning at 00:00 UTC on November 7, 2009. Note the coherence peak at 1.7 Hz in correspondence of increased wind speed. (b) Z-component seismograms for the same two stations during the interval of strongest wind (hours 22-34 in [a]).



I risultati (v. Tabella 5) mostrano chiaramente che l’arrivo della vibrazione a 1.7 Hz avviene a tempi successivi allontanandosi dal parco eolico, consistente quindi con l’ipotesi che il segnale osservato anche ai siti più distanti sia riconducibile all’azione delle turbine. La geometria sparsa dell’array non consente l’applicazione del metodo PWF utilizzato in precedenza, poiché i fronti d’onda non possono essere ritenuti piani sulle ampie distanze coperte dalle stazioni. Tuttavia, riportiamo per completezza di informazione che l’inversione dei tempi di ritardo osservati per velocità apparente e direzione di provenienza ha fornito i valori di 420 m/s e 80°, rispettivamente, pienamente compatibili quindi con una sorgente associata con il parco eolico.

**6.2 Coerenza**

Alla frequenza di 1.7 Hz, il segnale osservato in posizione distale è comunque coerente con quello registrato dalla stazione di riferimento. Questa evidenza è chiaramente illustrata dalla Figura 16a, dove riportiamo l’andamento della coerenza fra le componenti Z del moto delle stazioni CMGV e 931E (v. Figura 15a), per un intervallo di tempo di 2 giorni comprendente un periodo di forte ventosità (dalle 00:00 UTC del 7 Novembre 2009 alle 00:00 UTC del 9 Novembre 2009). Il calcolo della coerenza è stato effettuato mediando e poi normalizzando le stime del cross-spettro ottenute su 10 finestre consecutive lunghe 1 minuto, e ripetendo la procedura per intervalli successivi senza sovrapposizione. I risultati mostrano chiaramente come la coerenza CMGV-931E si correli significativamente con l’intensità del vento (Fig. 16a).

**7. Modello di propagazione**

Per l’energia a frequenza 1.7 Hz, la distribuzione delle ampiezze osservate ai nostri punti di misura (distanze comprese fra 1200 m e 8200 m rispetto al baricentro del parco), mostra un comportamento significativamente diverso da quanto atteso sulla base di una semplice legge di attenuazione per onde superficiali. Le Figura 17 illu-

stra questa osservazione. Per i primi 2500-3000 m di distanza, l’abbattimento delle ampiezze *A* con la distanza dalla sorgente *r* e la frequenza *f* è ben descritto da una legge del tipo:

$$A(r,f)|_{f=1.7} = A_0 r^{-n} \exp(-\pi r f / Q v) \tag{7.1}$$

dove *n* è il coefficiente di *spreading* geometrico, *v* è la velocità di propagazione, *Q* il fattore di qualità, ed *A*<sub>0</sub> l’ampiezza alla sorgente.

L’adattamento di tale modello ai dati sperimentali illustrato in Figura 17d è stato effettuato utilizzando i valori *n*=0.5 (onde superficiali), *v*=180 m/s (come derivato dalle analisi di lentezza), e *Q*=20 [Campbell, 2009]. A distanze maggiori, invece, l’abbattimento delle ampiezze diventa molto più graduale, ed il segnale registrato a CB ( $\Delta \sim 8000$  m) è inferiore di appena un fattore 1.4 rispetto a quello osservato a distanza di 4000 m.

Tale comportamento non può essere descritto da una singola legge di attenuazione quale la (7.1), ed è necessario ipotizzare che parte della propagazione avvenga lungo tragitti più profondi, per i quali valori più elevati di velocità sismica e fattore di qualità inducono una minore attenuazione dell’energia.

La definizione quantitativa di un modello di propagazione in grado di spiegare tale complesso pattern di attenuazione è oltre gli scopi di questo rapporto. Ai fini della definizione di un modello predittivo, ci limiteremo ad osservare come il decadimento osservato possa essere ragionevolmente adattato da una relazione lineare del tipo:

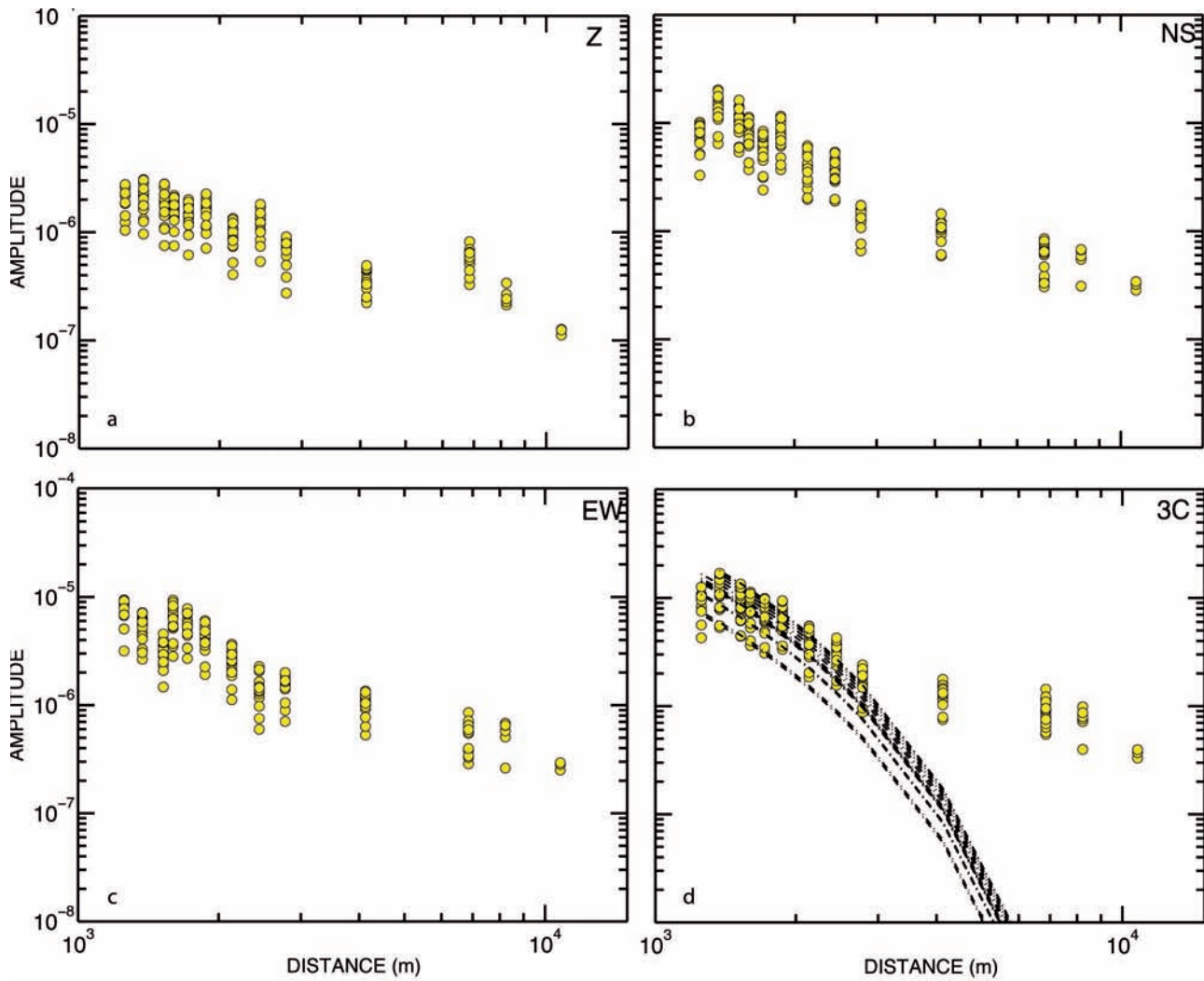
$$\log_{10}(A^{nr^m}(r)) = m \log_{10}(r) + q \tag{7.2}$$

dove *A*<sup>nr<sup>m</sup></sup>(*r*) è l’ampiezza spettrale (in m/s/sqrt(Hz)) osservata alla distanza *r* (in m) dal baricentro del parco eolico, normalizzata rispetto alla stazione di riferimento 931E.

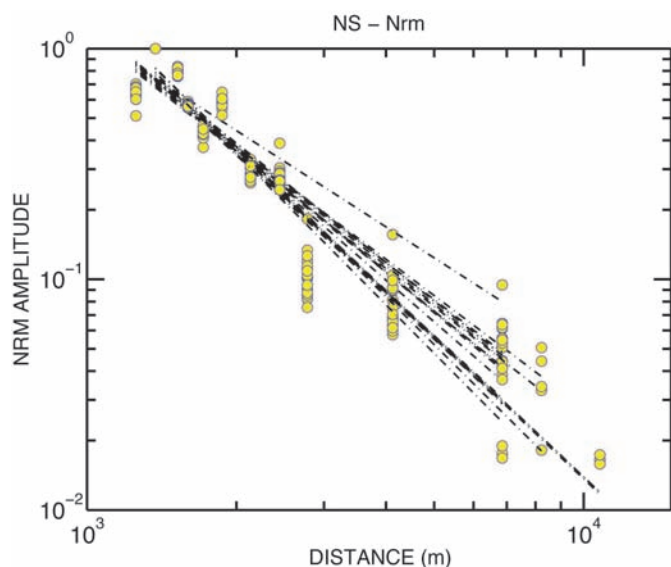
Applicata alla componente NS del moto (quella alla quale sono osservate le ampiezze maggiori), questa relazione fornisce un ragionevole adattamento ai dati sperimentali per i valori dei coefficienti *m* = -1.8535 +/- 0.2 e *q*=5.6854 +/- 0.7 (Figura 18).

Stazione	931E (1.2 km)	1078 (4.5 km)	EPNE (7.5 km)	CMGV (8.9 km)
931E	0	7.44	19.64	19.84
1078		0	6.80	6.44
EPNE			0	0.42
CMGV				0

**Tabella 5** – Distribuzione dei tempi di ritardo (s) per stazioni ubicate a distanza crescente dal parco eolico. Nella prima riga, i numeri in parentesi a lato delle sigle stazione indicano la distanza dal baricentro del parco eolico.  
**Table 5** Distribution of delays for stations located at distances always farther from the wind park. In the first row, number in parenthesis close to station names are the corresponding distances from the barycentre of the wind park.



**Figura 17** Variazione con la distanza dell'ampiezza spettrale nella banda 1.6-1.8 Hz. I dati sono stati ottenuti dalle analisi spettrali di 20 intervalli di segnale di lunghezza oraria. I pannelli (a,b,c) sono relativi alle componenti Z, N e E del moto del suolo, rispettivamente. Il pannello (d) è invece relativo alla somma in quadratura delle tre componenti del moto. Le linee tratteggiate in (d) rappresentano, per ciascuno intervallo analizzato, le variazioni di ampiezza attese sulla base di una legge di attenuazione per onde superficiali (eq. 7.1 nel testo). **Figure 17** Variation of spectral amplitude with distance for the frequency band 1.6-1.8 Hz. These data are obtained from spectral analysis of 20, 1-hour-long signal windows. Panels (a,b,c) are related to the Z,N,E components of ground motion, respectively. Panel (d) represents the squared sum of the 3 components of the ground motion. Dot-dashed lines are the fit of eq. (7.1) in text to experimental data from the 20 selected time intervals.



**Figura 18** Una legge lineare descrive ragionevolmente bene la relazione fra i logaritmi delle ampiezze spettrali e delle distanze dalla sorgente. Nella figura è riportato un esempio per la componente NS della velocità del suolo (stessi dati di Figura 17b), normalizzati rispetto alla stazione di riferimento 931E. Le diverse curve tratteggiate rappresentano gli adattamenti ai dati di ampiezza collezionati in 20 differenti intervalli temporali. **Figure 18** A linear model can reasonably reproduce the relationships between the base-10 log of spectral amplitudes and epicentral distances. The figure shows an example for the NS component of ground velocity (same data as in Figure 17b), normalised with respect to the reference site 931E. Dashed lines are the fit to amplitude measurements taken during 20 different time intervals.

## 8. Strutture di velocità ed effetti di amplificazione locale

L'analisi del rumore sismico ambientale è uno strumento estremamente economico e speditivo per caratterizzare la risposta sismica di un'area, necessaria per indagare eventuali effetti di amplificazione del moto del suolo dovuti alle condizioni geologiche locali.

Il metodo utilizzato in questo studio [Nogoshi e Igarashi (1971), Nakamura (1989, 1996, 2000)] consiste nella misura del microtremore per intervalli di alcune decine di minuti e nel calcolo del rapporto fra gli spettri di Fourier delle componenti orizzontali e verticale del moto del suolo [Azzara et al., 2004].

Questa tecnica consente di individuare la frequenza di risonanza del sito, in particolare quando si è in presenza di condizioni di forte contrasto di velocità di propagazione delle onde sismiche. Il rapporto spettrale inoltre risulta essere generalmente stazionario e insensibile ai transienti (eventi sismici).

Per ogni punto di misura temporanea è stata individuata la frequenza di risonanza caratteristica. La stazionarietà di dette frequenze è stata valutata in funzione delle condizioni ambientali di misura (ventosità) utilizzando le registrazioni effettuate dalle stazioni sismiche permanenti al fine di evidenziare eventuali correlazioni con l'attività del campo eolico.

Sono state eseguite 18 misure di rumore sismico in prossimità dell'interferometro con interdistanza variabile fra 200 e 500 m (vedi Figura 2 e Tabella 3). La durata delle misure è stata di circa 30 minuti per ogni punto di misura, il passo di campionamento è stato fissato a 100 sps.

L'analisi dei dati è consistita nel calcolo della densità di potenza spettrale (PSD) media e del rapporto fra gli spettri

delle componenti orizzontali e verticale calcolati su intervalli di lunghezza pari a 100 s non sovrapposti, fino a coprire tutto l'intervallo di misura.

Non è stato utilizzato un algoritmo di *detrigger* per analizzare gli intervalli privi di transienti sul segnale.

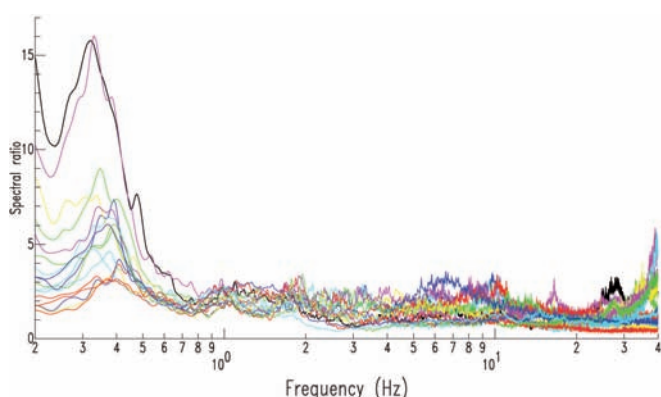
Sebbene si noti una certa variabilità in ampiezza per le diverse stazioni, è ben evidente un picco di amplificazione centrato sulla frequenza di 0.35 Hz (Figura 15 b e c).

Il giorno 29 Ottobre 2009 (13:49 GMT) è stato registrato un evento sismico di magnitudo pari a 2.5, localizzato dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV in Garfagnana. In Figura 20 è mostrato il rapporto spettrale HV calcolato sulle registrazioni di tutte le stazioni sismiche operanti nell'area.

È evidente la presenza di un picco di amplificazione abbastanza ben correlato fra tutte le stazioni nella banda 0.7 – 2.0 Hz. Il picco a bassa frequenza (0.35 Hz) già rilevato sul rumore sismico non è invece osservabile a tutti i siti di misura.

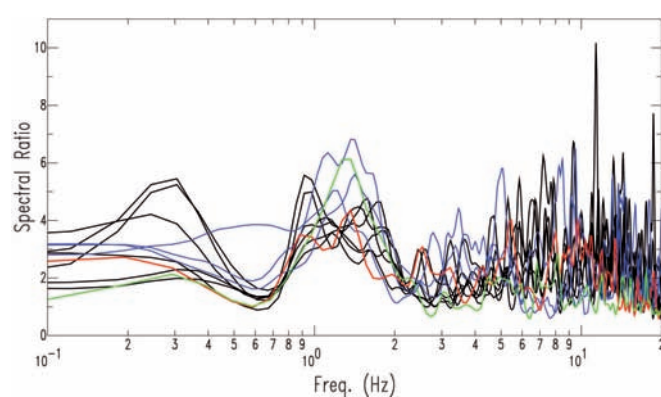
Durante il periodo di monitoraggio sono stati registrati altri due eventi sismici localizzati dalla rete sismica nazionale dell'INGV nell'Appennino modenese (9/11/2009 04:06 GMT,  $M_l = 3.3$ ) e nella Pianura Padana emiliana (16/11/2009 22:21 GMT,  $M_l = 3.0$ ). I risultati delle analisi dei rapporti HV per questi due eventi sono del tutto analoghi a quanto mostrato per il terremoto della Garfagnana, ovvero un picco di amplificazione nella banda di frequenze 0.7 – 2.0 Hz e, in modo meno evidente un picco a bassa frequenza (0.35 Hz).

Al fine di valutare la distribuzione spaziale e la stazionarietà del rapporto spettrale HV su rumore sismico, sono state calcolate le medie orarie e giornaliere. La Figura 21 mostra gli andamenti medi giornalieri rispettivamente alla stazione A284 dell'Esperimento #5, alla A284 dell'Esperimento #3, al CMGV del *Central Building*, alle due stazioni fisse installate durante il



**Figura 19** Rapporti spettrali HV medi per ogni punto di misura. Si riconosce in maniera abbastanza evidente per tutte le stazioni la presenza di un picco di amplificazione centrato su circa 0.35 Hz.

**Figure 19** Averaged spectral ratios for each measurement site. We note the presence of an amplification peak centred around 0.35 Hz.



**Figura 20** Rapporti spettrali HV per il terremoto della Garfagnana (29 Ottobre 2009 13:49 GMT), curve nere Esperimento #1, blu punti di misura HV, rosso VIR02, verde VIR01.

**Figure 20** HV spectral ratios for the Garfagnana earthquake (see text for details). In black, stations from Esperimento #1, in blue stations from HV experiments, in red station VIR02 and in green station VIR01.

monitoraggio VIR01 e VIR02.

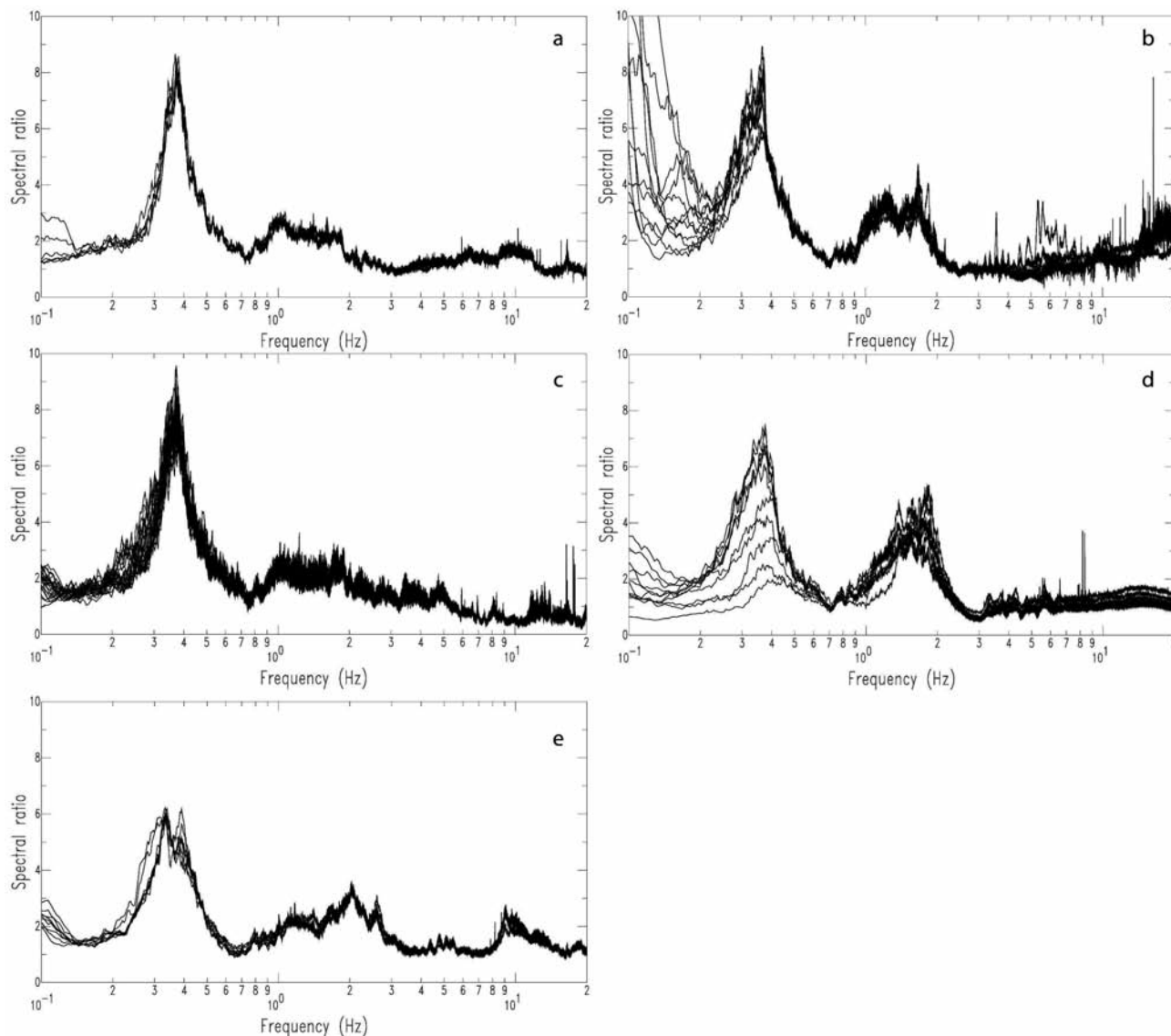
Su tutte le stazioni è evidente una forte correlazione spaziale del picco di amplificazione centrato su 0.35 Hz che domina tutti i rapporti spettrali e che presenta una forte stazionarietà. Inoltre è presente un picco che mantiene le sue caratteristiche spettrali nel tempo centrato nella banda 0.7-2.0 Hz e che mostra valori di ampiezza minori rispetto a quello descritto in precedenza.

Considerazioni aggiuntive vanno fatte per la stazione sismica VIR01, la più vicina al campo eolico.

Si nota infatti una forte variabilità temporale del picco a bassa frequenza probabilmente correlata alle condizioni di vento registrate nell'area. Diverso è il comportamento del picco a più alta frequenza che ha un valore di amplificazione maggiore rispetto alle altre stazioni ma mostra una sta-

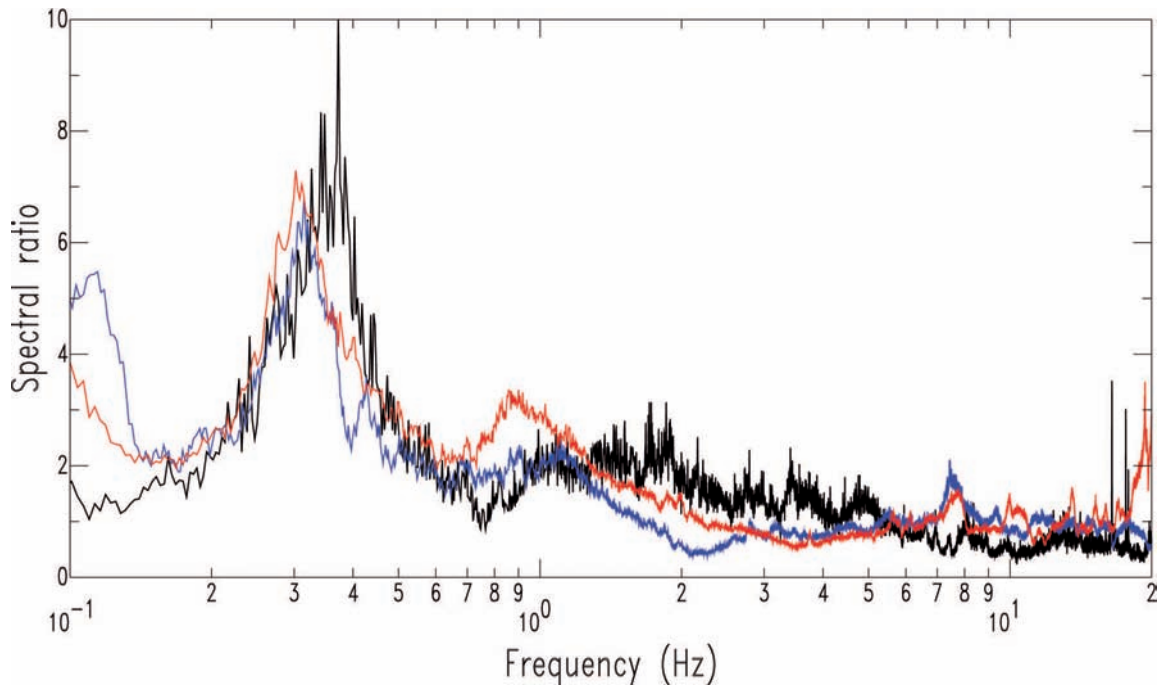
zionarietà che escluderebbe una possibile correlazione con le condizioni di ventosità.

La Figura 22 mostra il confronto fra le medie giornaliere del rapporto spettrale HV calcolato per la stazione sismica installata durante il progetto *RETREAT* (presente a WT prima della costruzione del parco eolico), per il CMGV e per quella installata nella NT (cfr. sezione 2). Si nota un ottimo accordo nella presenza di un picco di amplificazione centrato a 0.3 Hz fra gli andamenti delle due Torri, che differisce leggermente da quello presente nella stazione sismica installata nell'area centrale (CMGV). Al di sopra di 0.7 Hz gli andamenti differiscono in modo significativo; tuttavia, i valori di amplificazione sono così bassi da non giustificare l'uso del rumore sismico ambientale per la caratterizzazione dell'area.



**Figura 21** Rapporti spettrali medi giornalieri per la stazione A284 durante gli esperimenti #5 (a) e #3 (b), per la stazione CMGV (c), per le stazioni VIR01 (d) e VIR02 (e).

**Figure 21** Daily mean Spectral ratios for station A284 during the experiments #5 (a) #3 (b), for the station CMGV(c), for the stations VIR01 (d) and VIR02 (e).



**Figura 22** Rapporti spettrali medi per la stazione CMGV di Virgo (curva nera), quella installata nella Torre Nord (curva blu) e quella installata nella Torre Ovest fra il 2004 e il 2005 durante l'esperimento RETREAT (curva rossa).  
**Figure 22** Averaged Spectral ratios for stations CMGV (black), NT (blue) and WT (red).

### Considerazioni finali

Dall'analisi dei rapporti HV su rumore sismico condotti sulle stazioni temporanee (cfr. Tabella 1 e Figura 2) si riconoscono due diversi andamenti delle aree sottoposte ad analisi.

Procedendo dal *Central Building* verso Est, i rapporti spettrali sono dominati da un picco di ampiezza fra 4 e circa 10, centrato su una frequenza media di circa 0.35 Hz; le tre misure effettuate più a Nord presentano inoltre altri picchi comparabili in ampiezza, ma a più alta frequenza.

Procedendo verso Ovest invece, il picco a bassa frequenza continua ad essere dominante, ma è evidente un picco di ampiezza pari a circa 2, costante su tutte le stazioni, che si estende fra circa 0.7 e 2.0 Hz.

Il rapporto spettrale HV sui tre terremoti considerati evidenzia in maniera abbastanza chiara la presenza di una banda di amplificazione nella banda di frequenza 0.7 – 2.0 Hz. Questo picco è ben correlato su tutte le stazioni e presenta un'ampiezza circa tripla rispetto a quella calcolata sul rumore.

Dalle informazioni geologiche e geofisiche disponibili, tale picco potrebbe essere ascrivibile alla presenza di uno strato di conglomerati che si riconosce ad una profondità di circa 25 – 60 m su tutta l'area in esame. Questo livello di conglomerati è responsabile del contrasto di impedenza con le argille sovrastanti e produce un effetto di amplificazione locale su frequenze dell'ordine di 1-2 Hz.

### Conclusioni

Sulla base dei risultati e degli argomenti illustrati nelle sezioni precedenti, si riportano le seguenti osservazioni conclusive con specifico richiamo agli obbiettivi dichiarati nella parte introduttiva.

#### Obiettivo 1: Caratterizzazione del rumore sismico

1. Il rumore sismico in prossimità del Parco Eolico di Pontedera ha un contenuto spettrale compreso nella banda 0.2-10 Hz. Il rumore di origine antropica, individuato sulla base delle caratteristiche variazioni legate agli orari lavorativi, si estende principalmente nella banda 1-10 Hz e non presenta alcun picco spettrale distinto associabile a sorgenti monocromatiche.
2. L'analisi di covarianza dell'andamento temporale delle ampiezze spettrali evidenzia una marcata correlazione dell'energia emessa a frequenze di 0.45, 1.7, 3.5 e 4.5 Hz, suggerendo per queste particolari frequenze l'azione di una sorgente comune. Le ampiezze spettrali associate a tali frequenze persistono per estesi intervalli temporali e con una variabilità non associabile ai cicli antropici.
3. L'ampiezza spettrale alle frequenze di 0.45, 1.7, 3.5 e 4.5 Hz mostra anche una marcata correlazione con le velocità del vento. Si esclude che tale osservazione sia attribuibile all'azione diretta del vento, poiché essa produr-



rebbe un rumore dal contenuto spettrale uniformemente distribuito su tutta la banda di sensibilità strumentale (*spettro bianco*).

4. La correlazione fra le serie temporali di velocità del vento e ampiezze spettrali del rumore sismico a 1.7, 3.5 e 4.5 Hz assume valori massimi per ritardi temporali minori di un minuto. Al contrario, l'ampiezza spettrale del rumore a 0.45 Hz risulta ritardata di circa 6 h rispetto all'intensità del vento.
5. Misure effettuate in prossimità di un aerogeneratore durante una sequenza di attivazione delle turbine, hanno evidenziato una serie di picchi spettrali (0.3 Hz e armoniche superiori) la cui frequenza varia lievemente nel tempo, e che pertanto sono stati associati al periodo di rivoluzione delle eliche della turbina. Questa ipotesi è supportata anche dall'assenza di tali componenti spettrali in condizioni di arresto della turbina.
6. Sempre per le misure di cui al punto precedente, il picco spettrale maggiormente energetico (1.7 Hz) risulta invece imputabile al modo principale di vibrazione del traliccio, essendo evidente sia in condizioni di arresto che di movimento della turbina. In particolare, la componente della vibrazione che viene trasmessa in maniera più efficiente è quella centrata a 1.7 Hz, unico picco spettrale visibile ad un sito di misura ubicato a 1.2 km di distanza.
7. L'analisi direzionale per l'energia a 1.7, 3.5 e 4.5 Hz indica una sorgente ubicata in direzione del Parco Eolico; inoltre le analisi di polarizzazione e di dispersione delle vibrazioni registrate ai siti di misura indicano la dominanza di onde di superficie (Love) che si propagano con basse velocità ( $< 0.2$  km/s), consistenti con quanto atteso per sedimenti saturi e poco consolidati, caratteristici della geologia di superficie ai siti di misura.
8. Per le frequenze minori di 1 Hz, le direzioni di provenienza puntano invece verso la costa Tirrenica (distante circa 20 km da VIRGO), suggerendo che in tale banda di frequenza il contributo più energetico è quello attribuibile al microsisma marino.

### Obiettivo 2: Definizione di una legge di attenuazione

9. L'ampiezza dei picchi spettrali a 1.7, 3.5 e 4.5 Hz diminuisce all'aumentare della distanza dal Parco Eolico. In condizioni di particolare ventosità, il picco spettrale più energetico (1.7 Hz) è distintamente visibile anche a distanza di 11 km (Torre Ovest di Virgo). L'associazione fra questo picco osservato in posizione remota e l'azione del parco eolico è supportata dalle analisi di coerenza spaziale e direzionalità del campo d'onda.
10. Il decadimento delle ampiezze spettrali con la distanza dal Parco Eolico presenta due distinti andamenti: per

distanze inferiori a ca. 2500-3000 m dal baricentro di *Eolico Gello*, l'ampiezza diminuisce in accordo ad una legge di attenuazione tipica delle onde superficiali. Per distanze superiori, si osserva una marcata diminuzione del tasso di abbattimento delle ampiezze, che è interpretata in termini di propagazione profonda in mezzi di migliori proprietà elastiche.

### Obiettivo 3: Caratterizzazione dei suoli

11. Nonostante la forte variabilità a scala locale tipica dei depositi di riempimento fluvio-palustri della Piana Pisana, si può asserire che l'area oggetto dell'indagine possiede caratteristiche geo-litologiche molto omogenee dal punto di vista sismico. Elementi caratterizzanti sono la presenza di un livello di ghiaie a matrice sabbiosa ad una profondità di circa 30-60 m e quella di un substrato calcareo che nell'area si individua ad una profondità di circa 800 m.
12. L'analisi delle misure di rumore sismico ambientale col metodo dei rapporti spettrali evidenzia due bande di amplificazione imputabili ad effetti di risonanza legati alla geologia a scala locale: il primo intorno alla frequenza di 0.35 Hz, il secondo fra 0.7 e 2.0 Hz. Entrambi i picchi risultano essere essenzialmente omogenei in tutta l'area di studio, a conferma della sostanziale uniformità della struttura geologica.

### Obiettivo 4: Sviluppo di un modello predittivo

13. Per le frequenze attribuite all'azione del Parco Eolico è evidente una correlazione fra ampiezza della vibrazione  $A$  e velocità del vento  $v$ , che può essere descritta da una legge di potenza del tipo  $A=a*v^{3/2}+b$ , come proposto anche da studi precedenti.
14. Il complesso *pattern* di decadimento delle ampiezze con l'aumentare della distanza dal parco eolico è probabilmente attribuibile alla combinazione di onde superficiali e onde di volume che percorrono cammini profondi entro terreni di migliori proprietà elastiche. In prima approssimazione, la relazione fra i logaritmi delle ampiezze e delle distanze dal parco è lineare, permettendo quindi una ragionevole predizione delle ampiezze attese all'aumentare del numero delle sorgenti.

### Ringraziamenti

Si ringraziano Chiara P. Montagna, Nicola Piana Agostinetti e Luciano Zuccarello per la loro partecipazione alle operazioni di campagna. Le lunghe discussioni con Jaques Colas (Direttore di EGO), Francesco Fidecaro e Pasquale Popolizio sono state di fondamentale importanza per la conduzione dello studio. Il lavoro è stato interamente finanziato dal Consorzio EGO.

## Bibliografia

- Azzara R.M., Cara F., Cultrera G., Di Giulio G. (2004). *Manuale d'uso dei programmi per lo scaricamento dei dati e l'analisi semiautomatica dei dati registrati da stazioni sismiche per lo studio di effetti di sito*, Rapporti Tecnici INGV, n. 25, pp. 34.
- Boschian G., Bossio A., Dell'Antonio B. e Mazzanti R., (2006). *Il Quaternario della Toscana Costiera*; Studi Costieri, 12.
- Campbell K.W., (2009). *Estimates of Shear-Wave Q and K0 for Unconsolidated and Semiconsolidated Sediments in Eastern North America*. Bull. Seism. Soc. Amer., 99, 4, 2365-2392.
- Cantini P., Testa G., Zanchetta G., Cavallini R. (2001). *The Plio-Pleistocene evolution of extensional tectonics in northern Tuscany, as constrained by new gravimetric data from the Montecarlo basin (lower Arno valley, Italy)*. Tectonophysics, 330, 25-43.
- Del Pezzo E. and Giudicepietro F., (2002). *Plane wave fitting method for a plane, small aperture, short period seismic array: a MATHCAD 2000 professional program*. Computer and Geosciences 28, 59-64.
- Della Rocca B., Mazzanti R. e Pranzini E., (1988). *Studio geomorfologico della Pianura di Pisa*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10 (1987), 56-84.
- Doveri M., Lelli M., Mussi M., Raco B., (2008). *Studio idrogeologico-geochimico della parte orientale della Pianura di Pisa con valutazioni sulla possibilità di interazione tra i corpi idrici e la discarica di Gello (Pontedera)*. Proceedings del Simposio Stato del Territorio e delle Risorse Naturali in Toscana.
- Fanucci F., Firpo M., Ramella A., (1987). *Genesi ed evoluzione di pianure costiere del Mediterraneo: esempi di piccole pianure della Liguria*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 10, 193-203.
- Fancelli R., Grifoni R., Mazzanti R., Menchelli S., Nencicini C., Pasquinucci M. e Tozzi C., (1986). *Il contesto geomorfologico*. In "Terre e Paduli" Pisa, 23-39.
- Fiori, I., L. Giordano, S. Hild, G. Losurdo, E. Marchetti, G. Mayer, and F. Paoletti (2009). *A study of the seismic disturbance produced by the wind park near the gravitational wave detector GEO-600*. Proc. 3rd Int. Meeting on Wind Turbine Noise. Aalborg (Denmark), 1719 June 2009.
- Giardi M. e Pellegrini M., (2002). *Indagini idrogeologiche per l'ottimizzazione della rete di monitoraggio della discarica di Gello a Pontedera*. Geofor S.p.A. Pontedera.
- Giardi M., (2003). *Relazione Geologica e Idrogeologica*. In "Progetto Definitivo" relativo all'Ampliamento della discarica in loc. Gello di Pontedera mediante costruzione di un nuovo lotto destinato allo smaltimento di rifiuti speciali non pericolosi. Geofor S.p.A. Pontedera.
- Grassi S., Cortecchi G., (2005). *Hydrogeology and geochemistry of the multilayered confined aquifer of the Pisa plain (Tuscany-central Italy)*. Appl. Geochem. 20: 41-54.
- Mariani M., Prato R. (1988). *I bacini neogenici costieri del margine tirrenico: approccio sismicostratigrafico*. Mem. Soc. Geol. It., 41, 519-531.
- Mazzanti R., Rau A. (1994). *La Geologia*. In: Mazzanti R. (ed.) - La pianura di Pisa e i rilievi contermini. La natura e la storia. Memorie della Società Geografica Italiana, 50, 31-87.
- Nakamura, Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*, Quarterly Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), Vol. 30, No.1.
- Nakamura Y. (1996). *Real time information systems for hazards mitigation*, atti del 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico.
- Nakamura Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*, in atti del 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- Nogoshi M. & Igarashi T. (1971). *On the amplitude characteristic of microtremor (part.2)*, Journal of Seismological Society of Japan, 24, 1971, pp.26-40 (in giapponese, con abstract in inglese).
- Patacca E., Sartori R., Scandone P. (1990). *Tyrrhenian basin and Apenninic arcs: kinematic relations since Late Tortonian times*. Mem. Soc. Geol. Ital., 45, 425-451.
- Schofield R., (2001). *Seismic Measurements at the Stasteline Wind Project*, LIGO T020104-00-Z.
- Singh A.K., (2007). *Search for the variation in seismic noise due to wind at AIGO Western Australia*, [www.gravity.uwa.edu.au/docs/presentations/Atul\\_seismic\\_report.pdf](http://www.gravity.uwa.edu.au/docs/presentations/Atul_seismic_report.pdf)
- Stefanelli P., Carmisciano C., Caratori Tontini F., Cocchi L., Beverini N., Fidecaro F. and D. Embriaco (2008). *Microgravity vertical gradient measurement in the site of VIRGO interferometric antenna (Pisa plain, Italy)*. Annals of Geoph., 51, 877-886.
- Styles, P., Stimpson I., Toon S., England R. and Wright M., (2005). *Microseismic and Infrasound Monitoring of Low Frequency Noise and Vibrations from Windfarms - Recommendations on the Siting of Windfarms in the Vicinity of Eskdalemuir, Scotland*.
- Withers M.M., Aster R.C., Young C.J. and Chael E. P., (1996). *High-Frequency Analysis of Seismic Background Noise as a Function of Wind Speed and Shallow Depth*. Bull. Seism. Soc. Amer., 86, 1507-1515.

# Indice

<b>Introduzione</b>	4
<b>1. Inquadramento geologico</b>	6
<b>2. Acquisizione dei dati</b>	6
2.1 Misure di campagna	6
2.2 Geometrie di Acquisizione	7
<b>3. Caratteristiche spettrali del rumore sismico</b>	10
3.1 Caratteristiche generali del rumore sismico	10
3.2 Analisi di Covarianza	11
<b>4. Relazioni fra rumore sismico e ventosità</b>	11
4.1 Relazioni generali fra rumore sismico e ventosità	12
4.2 Misure di campo vicino	14
<b>5. Proprietà direzionali</b>	16
<b>6. Attenuazione con la distanza</b>	18
6.1 Distribuzione spaziale dei tempi di ritardo	18
6.2 Coerenza	20
<b>7. Modello di propagazione</b>	20
<b>8. Strutture di velocità ed effetti di amplificazione locale</b>	22
<b>Considerazioni finali</b>	24
<b>Conclusioni</b>	24
<b>Ringraziamenti</b>	25
<b>Bibliografia</b>	26



**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Daniela Riposati | Laboratorio Grafica e Immagini | INGV

© 2011 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**