

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA  
 PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO  
 NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - LUPIAE MARIS  
 35 WTG – 525 MW

**PROGETTO DEFINITIVO - SIA**

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



**SIA.ES STUDI SPECIALISTICI**

**ES.2.2 Valutazione Previsionale di Impatto Acustico**

REV.	DATA	DESCRIZIONE



Citazione consigliata:

<<Pace F., H. Wecker, e E. Ozanich>>. 2022. Parco Eolico Marino di Brindisi: Modellizzazione del rumore subacqueo. Documento 02951, Versione 1.0. Relazione tecnica della JASCO Applied Sciences

I risultati qui presentati sono rilevanti all'interno del contesto specifico descritto in questo rapporto. Potrebbero essere interpretati erroneamente se non considerati alla luce di tutte le informazioni contenute nella presente relazione. Pertanto, qualora le informazioni derivanti dalla presente relazione siano utilizzate in documenti diffusi al pubblico o ad organismi di regolamentazione, tali documenti dovranno citare chiaramente la relazione originale, che sarà resa prontamente disponibile ai destinatari in forma integrale e inedita.

# Contenuti

Sommario Esecutivo .....	1
<b>1. Introduzione .....</b>	<b>2</b>
1.1. Il Progetto .....	2
1.2. Criteri per la valutazione degli impatti sui mammiferi marini .....	3
1.2.1. Soglie e funzioni di ponderazione uditiva dei mammiferi marini .....	4
1.3. Effetti sul suono della propagazione nell'ambiente marino .....	5
1.4. Rumore ambientale di fondo .....	6
1.5. Descrizione delle attività.....	8
1.5.1. Installazione delle ancore - perforazione .....	9
1.5.2. Rumore operativo delle turbine.....	10
1.6. Impatto sulla fauna marina .....	12
<b>2. Metodi .....</b>	<b>14</b>
2.1. Stima dei livelli di sorgente .....	14
2.2. Modellizzazione della propagazione del suono .....	16
2.3. Stima dell'impatto sui mammiferi marini .....	16
2.4. Parametri Ambientali .....	17
2.4.1. Profilo della velocità del suono.....	17
2.4.2. Batimetria .....	18
2.4.3. Geoacustica .....	18
<b>3. Risultati .....</b>	<b>20</b>
<b>4. Discussione e Conclusioni.....</b>	<b>1</b>
Glossario .....	3
Letteratura Citata.....	12
Appendice A. Terminologia .....	17
Appendice B. Propagazione del suono .....	21

## Figura

Figura 1. Mappa che mostra l'ubicazione del progetto nel mar Adriatico meridionale (tratta dal documento VIA).....	2
Figura 2. Una piattaforma viene rimorchiata dopo l'installazione della turbina a Ferrol Outer Harbor, in Spagna. Una seconda piattaforma attende la sua turbina in banchina (crediti: Principle Power. Artista: DOCK90). .....	3
Figura 3. Curve di Wenz che descrivono i livelli di densità spettrale di pressione del suono ambientale marino prodotto da fenomeni meteorologici, vento, attività geologica e navigazione commerciale (adattate da NRC 2003, basate su Wenz 1962).. Le linee spesse indicano i limiti del suono ambientale prevalente. ....	7
Figura 4. Traffico navale nel Mar Adriatico meridionale e Mar Ionio durante il 2021 .....	8
Figura 5. SPL calcolate sull'intervallo di 1 minuto per il monitoraggio di rumore ambientale nell'area in cui è previsto il Progetto (Fossati 2022). ....	8
Figura 6. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava per le registrazioni effettuate fra Nov-Dec 2021 a 200m da una turbina del parco eolico Kinkardine (misurazioni e analisi effettuate da SAMS, Van Geel et al. 2022). ....	12
Figura 7. Spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello per l'operazione di perforazione. ....	14
Figura 8. Spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello per una turbina operativa.....	15
Figura 9. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari ((JASCO Applied Sciences 2019), riadattato da Etter, 2009). ....	16
Figura 10. Esempi di aree insonificate a un certo livello sonoro con le distanze $R_{max}$ e $R_{95\%}$ dimostrate per due scenari differenti: (sinistra) una distribuzione del livello sonoro radialmente simmetrica con piccole sporgenze, per la quale $R_{95\%}$ meglio rappresenta l'area insonificata effettiva; e (destra) una distribuzione di livello sonoro fortemente asimmetrica con lunghe sporgenze, per la quale $R_{max}$ meglio rappresenta le aree insonificate in alcune direzioni. L'azzurro indica le aree insonificate delimitate da $R_{95\%}$ ; il blu più scuro indica le regioni limitrofe che determinano $R_{max}$ . ....	17
Figura 11. Profilo della velocità del suono utilizzato per la modellizzazione (rosso) e per ogni altro mese dell'anno (grigio). ....	18
Figura 12. Costruzione: mappa che mostra la distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini (sinistra) e gli stessi dati presentati come eccedenza rispetto al rumore di fondo (a destra). ....	22
Figura 13. Costruzione: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2). ....	23
Figura 14. Intero parco operativo: mappa che mostra la distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini (sinistra) e gli stessi dati presentati come eccedenza rispetto al rumore di fondo (a destra). ....	23
Figura 15. Aerogeneratore operativo - Sito 2: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2). ....	24
Figura 16. Aerogeneratore operativo - Sito 2: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2). ....	24

## Tabelle

Tabella 1. Lista di specie di cetacei note per essere presenti (o eventualmente presenti).....	3
--	---

Tabella 2. Soglie di insorgenza di TTS e PTS per mammiferi marini esposti a rumore non impulsivo: soglie in dB re $1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$ sott'acqua e dB re $(20 \mu\text{Pa})^2\text{s}$ in aria (soltanto per i gruppi PCA e OCA). Le soglie per i sirenidi e gli otaridi sono presentate per completezza ma non verranno utilizzate in quanto nel mar Mediterraneo non sono presenti specie appartenenti a questi gruppi. Tabella adattata da Southall et al. (2019).....	5
Tabella 3. Descrizione dei due siti usati come sorgenti per la modellizzazione. ....	15
Tabella 4. Profilo geoacustico stimato per il sito modellizzato. All'interno di ogni intervallo di profondità, ogni parametro varia linearmente all'interno dell'intervallo indicato. L'onda di compressione (P) è l'onda primaria. L'onda trasversale (S) è l'onda secondaria.....	19
Tabella 5. Distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini. Il simbolo '-' indica che il livello è minore del livello di sorgente, '<0.02' indica che la soglia non viene ecceduta, e '>80' indica che la distanza eccede il dominio del modello. ....	21
Tabella 6. Distanze corrispondenti alle soglie di PTS e TTS per i diversi gruppi uditivi di mammiferi marini. Il simbolo '-' indica che la soglia non viene raggiunta. ....	22

## Sommario Esecutivo

La JASCO Applied Sciences (JASCO) è stata commissionata per effettuare la modellizzazione del rumore subacqueo emesso durante le fasi di costruzione e operazione del parco eolico offshore di Brindisi, e per stimare le distanze di impatto sulla fauna marina, e in particolare sui cetacei, delle sorgenti sonore identificate.

Il parco eolico sarà costituito da 35 turbine, ciascuna fissata su una struttura galleggiante con tre cilindri semi-sommergibili, su uno dei quali viene montata la torre della turbina.

Per determinare il potenziale disturbo comportamentale e danni uditivi della sorgente sui mammiferi marini, si è fatto riferimento ai più recenti criteri disponibili nella letteratura scientifica corrispondenti all'impatto da suono di tipo non impulsivo, in quanto il rumore delle attività modellizzate sono categorizzate come sorgenti acustiche continue.

La modellizzazione interessa le due operazioni che sono state ritenute più impattanti per quanto riguarda le potenziali emissioni sonore subacquee per le fasi di costruzione ed esercizio del parco eolico, cioè l'installazione delle ancore e l'operazione regolare delle turbine.

Data l'incertezza presente a tutt'oggi sulla soluzione ingegneristica per l'installazione delle ancore, il profilo conservativo della nave con posizionamento dinamico *Discoverer* presentato nello studio di Austin et al. (2018) è stato scelto come proxy per la sorgente con un livello di sorgente a banda larga (10Hz-32kHz) di 191.8 dB re 1  $\mu$ Pa m durante la fase di scavo. Per la fase operativa, il profilo acustico mediano (non scalato) di una turbina derivato dai risultati delle misurazioni effettuate presso la Kinkardine Offshore Wind Farm è stato utilizzato come input per il modello di sorgente, con un livello di sorgente a banda larga (10Hz-32kHz) di 152.5 dB re 1  $\mu$ Pa m per una turbina individuale.

Per la stima delle distanze di impatto per i mammiferi marini per il parco eolico operativo, le sorgenti sono state considerate puntiformi e sia la sorgente che il ricevitore (animale esposto al suono) sono statici nell'arco delle 24 ore di esposizione al rumore.

La modellizzazione mostra che la propagazione avviene preferenzialmente verso nord-ovest e sud-est seguendo la costa della Puglia. L'attività che presenta le maggiori distanze d'impatto comportamentale appare essere la perforazione, come previsto, dati i livelli di sorgente elevati rispetto a quelli degli aerogeneratori operativi.

La distanza di impatto comportamentale  $R_{95\%}$  variano dai 37.4 km durante la fase di costruzione ai 50m durante la fase di esercizio del parco eolico intero per  $L_p$  di 120 dB re 1  $\mu$ Pa, soglia di eccedenza per tutti i gruppi uditivi secondo ACCOBAMS (2013). Per  $L_p$  di 110 dB re 1  $\mu$ Pa, limite inferiore della soglia comportamentale per i cetacei a media frequenza secondo Borsani and Farchi (2011), le distanze  $R_{95\%}$  eccedono il dominio della modellizzazione per la fase di costruzione mentre rimangono sotto il km per la fase di esercizio. Per il limite inferiore della soglia dei cetacei a bassa frequenza di Borsani and Farchi (2011), pari a 100dB, le distanze eccedono il dominio della modellizzazione per la fase di costruzione e rimangono entro i 5km durante la fase di esercizio.

Il rumore sottomarino associato con lo scavo per l'installazione delle ancore ha il potenziale di comportare disturbo a tutte le specie di mammiferi marini presenti nell'area. Bisogna considerare però che questa attività sarà di breve durata rispetto alla vita del parco eolico. Inoltre, la modellizzazione è stata effettuata per il mese di febbraio, un profilo particolarmente favorevole alla propagazione del suono rappresentate quindi lo scenario più cautelativo dal punto di vista della stima degli impatti. Un'efficace mitigazione per questa attività potrebbe riscontrarsi nell'esecuzione dei lavori in periodi meno favorevoli alla propagazione del suono.

Il rumore sottomarino operativo è leggermente superiore al suono ambientale; tuttavia, i livelli sonori scendono ai livelli ambientali (cioè al di sotto  $L_p$  di 121 dB re 1 $\mu$ Pa) entro pochi metri dalla sorgente. Inoltre, entro meno di 1 km dalla turbina i livelli scendono ulteriormente di 10 dB.

# 1. Introduzione

La JASCO Applied Sciences (JASCO) è stata commissionata per effettuare la modellizzazione del rumore subacqueo emesso durante le fasi di costruzione e operazione del parco eolico offshore di Brindisi (denominato il Progetto) e per stimare le distanze di impatto delle sorgenti identificate sulla fauna marina, in particolare sui cetacei.

## 1.1. Il Progetto

L'area di progetto interessa una superficie di circa 60 km<sup>2</sup> nel mar Adriatico antistante le località di Torre Chianca (LE) a nord e Torre Specchia Ruggeri (LE) a sud, a circa 8 miglia dalla costa (Figura 1).

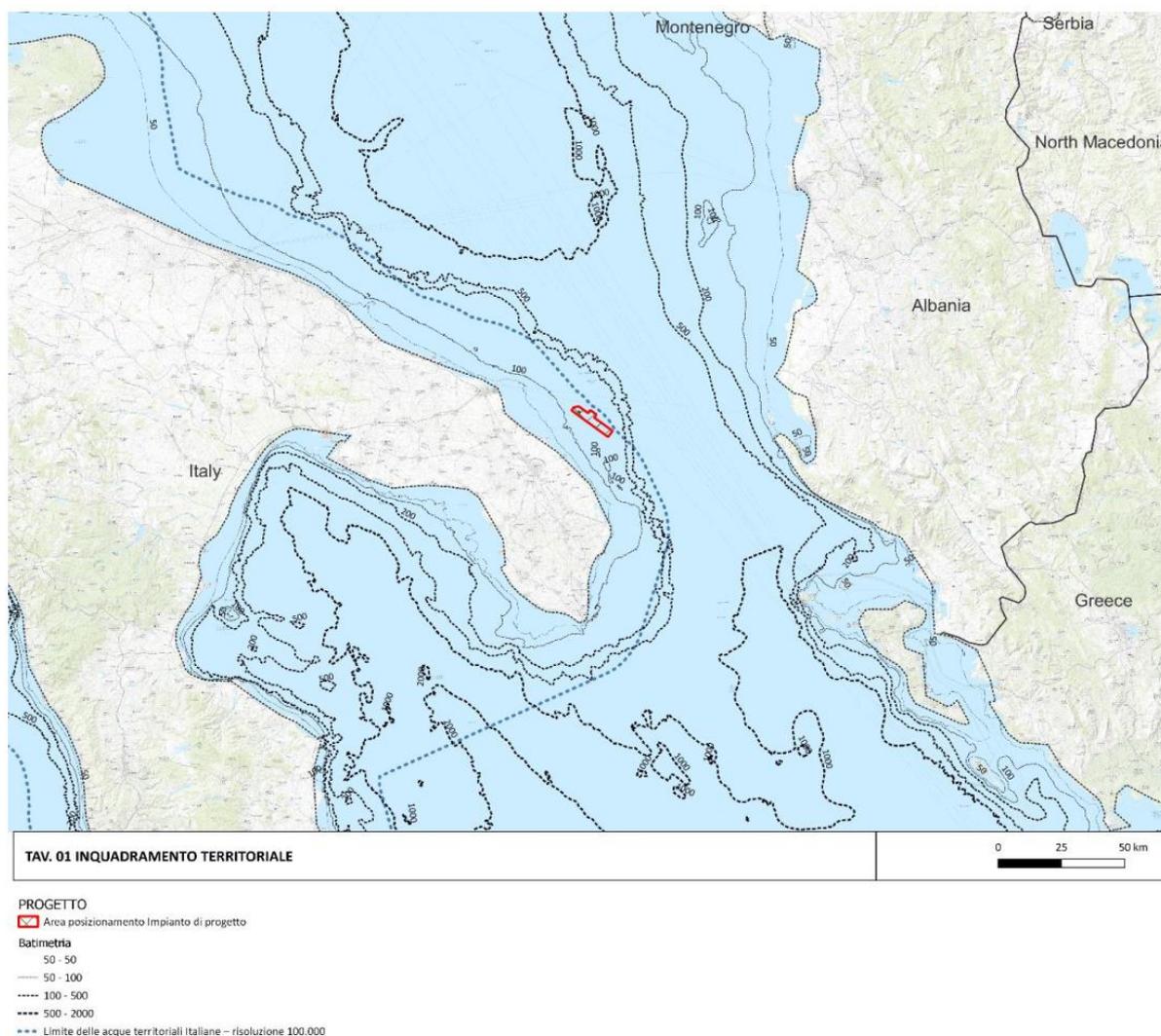


Figura 1. Mappa che mostra l'ubicazione del progetto nel mar Adriatico meridionale (tratta dal documento VIA).

Il parco eolico sarà costituito da 35 turbine, ciascuna fissata su una struttura galleggiante prodotta da Principle Power. Fino ad oggi, questo tipo di impianto è stato installato in Portogallo per il progetto WindFloat® e in Scozia per il parco eolico offshore Kinkardine.

La struttura consiste di una piattaforma con tre cilindri semi-sommergibili, su uno dei quali viene montata la torre della turbina. Il volume di acqua presente in ciascuno dei cilindri viene modificato a

seconda della direzione del vento e del meteo marino tramite l'attivazione di una pompa posizionata al suo interno. Le pompe utilizzate per equilibrare la struttura sono paragonabili a quelle utilizzate nelle navi; il loro design viene adeguato di volta in volta al progetto e in base alle tecnologie disponibili. Il sistema viene ancorato in posizione tramite catene o fibre sintetiche, utilizzate da sole o in combinazione con altri elementi (Xu et al. 2020). Il design preciso del sistema di ancoraggio e del suo metodo di installazione non è ancora stato definito con precisione in quanto studi ingegneristici devono ancora essere completati. Si ritiene che nel peggiore dei casi le ancore vadano installate tramite perforazione.



Figura 2. Una piattaforma viene rimorchiata dopo l'installazione della turbina a Ferrol Outer Harbor, in Spagna. Una seconda piattaforma attende la sua turbina in banchina (crediti: Principle Power. Artista: DOCK90).

## 1.2. Criteri per la valutazione degli impatti sui mammiferi marini

Lo studio è focalizzato sull'impatto del rumore subacqueo sui mammiferi marini; le specie elencate nella Tabella 1 sono state riscontrate nel mar Mediterraneo; quelle più comunemente riscontrate nell'area di studio sono evidenziate in grassetto.

I mammiferi marini sono i principali contributori biologici al paesaggio sonoro sottomarino. I canti delle balenottere comuni, ad esempio, possono aumentare i livelli di rumore nella banda 18–25 Hz di 15 dB per periodi prolungati (Simon et al. 2010). I mammiferi marini, in particolare i cetacei, si affidano quasi esclusivamente al suono per navigare, cercare cibo, accoppiarsi e comunicare (Clark 1990, Edds-Walton 1997, Tyack and Clark 2000). Sebbene le specie differiscano ampiamente nel loro comportamento vocale, ci si può ragionevolmente aspettare che la maggior parte produca suoni su base regolare.

Tabella 1. Lista di specie di cetacei note per essere presenti (o eventualmente presenti) e il loro stato di conservazione per la popolazione del mar Mediterraneo. LF= low frequency (bassa frequenza) e HF = high frequency (alta frequenza).

Specie	Nome scientifico	IUCN status	Gruppo uditivo
<b>Misticeti</b>			
Balenottera minore	<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	Minima preoccupazione	LF (Borsani and Farchi 2011) LF Southall et al. (2019)

Balenottera comune	<i>Balaenoptera physalus</i>	Vulnerabile	LF (Borsani and Farchi 2011) LF Southall et al. (2019)
<b>Odontoceti</b>			
<b>Delfino comune<sup>1</sup></b>	<b><i>Delphinus delphis</i></b>	<b>In via di estinzione</b>	<b>MF (Borsani and Farchi 2011) HF Southall et al. (2019)</b>
Stenella striata	<i>Stenella coeruleoalba</i>	Minima preoccupazione	MF (Borsani and Farchi 2011)
<b>Tursiope</b>	<b><i>Tursiops truncatus</i></b>	<b>Vulnerabile</b>	<b>HF Southall et al. (2019)</b>
<b>Grampo<sup>1</sup></b>	<b><i>Grampus griseus</i></b>	<b>Dati carenti</b>	<b>MF (Borsani and Farchi 2011)</b>
Globicefalo	<i>Globicephala melas</i>	Dati carenti	HF Southall et al. (2019)
<b>Capodoglio</b>	<b><i>Physeter macrocephalus</i></b>	<b>In via di estinzione</b>	<b>MF (Borsani and Farchi 2011)</b>
Pseudorca	<i>Pseudorca crassidens</i>	Dati carenti	HF Southall et al. (2019)
Zifio	<i>Ziphius cavirostris</i>	Dati carenti	MF (Borsani and Farchi 2011)

<sup>1</sup> Rara

### 1.2.1. Soglie e funzioni di ponderazione uditiva dei mammiferi marini

Per determinare il potenziale disturbo comportamentale e danni uditivi della sorgente sui mammiferi marini, i più recenti criteri disponibili nella letteratura scientifica sono stati utilizzati (Southall et al. 2007, Borsani and Farchi 2011, ACCOBAMS, 2013, ACCOBAMS, 2020).

In questo studio sono utilizzate le soglie corrispondenti all'impatto da suono di tipo non impulsivo, in quanto il rumore delle attività modellizzate sono categorizzate come sorgenti acustiche continue (D11C2 della Marine Strategy Framework Directive, MSFD) (Borsani and Farchi 2011, van der Graaf et al. 2012, European Commission 2017).

Le distanze corrispondenti all'eccedenza del criterio di disturbo comportamentale sono calcolate secondo (Borsani and Farchi 2011, ACCOBAMS, 2013, ACCOBAMS, 2020) usando:

1. Una soglia di riferimento corrispondente a un livello di pressione acustica (Sound Pressure Level, SPL o  $L_p$ ) di 120 dB re 1  $\mu$ Pa non ponderato, identica per tutti i gruppi uditivi dei mammiferi marini (ACCOBAMS, 2013, ACCOBAMS, 2020);
2. Le linee guida di Borsani and Farchi (2011) e Gomez et al. (2016) che identificano soglie comportamentali variabili a seconda dei gruppi uditivi come segue:
  - a. Cetacei di bassa frequenza:  $L_p$  100–110 dB re 1  $\mu$ Pa non ponderato
  - b. Cetacei di media frequenza (corrispondente ai cetacei ad alta frequenza in Southall et al. (2019)):  $L_p$  110–120 dB re 1  $\mu$ Pa non ponderato
  - c. Cetacei di alta frequenza (corrispondente ai cetacei frequenza molto alta in Southall et al. (2019)):  $L_p$  140–150 dB re 1  $\mu$ Pa non ponderato.

Inoltre, sono state calcolate le soglie d'insorgenza di danno uditivo temporaneo (Temporary Threshold Shift, TTS) o permanente (Permanent Threshold Shift, PTS) per i mammiferi marini. Quelle utilizzate in questo studio sono descritte da Southall et al. (2019), che rappresentano le linee guida più recenti e complete per stimare l'impatto del rumore antropogenico sui mammiferi marini (Tabella 2). Queste soglie sono state rivedute e aggiornate a partire dai criteri iniziali descritti in Southall et al. (Southall et al. 2007) prendendo in considerazione i risultati di ricerche più recenti effettuate a livello mondiale. In riferimento ai TTS e PTS, le linee guida di ISPRA (Borsani and Farchi 2011) fanno riferimento ai criteri del 2007 e sono dunque in parte superate. Recenti studi condotti dalla JASCO, presentati a ISPRA e da loro accettati, hanno utilizzato i criteri di Southall et al. (2019).

Tabella 2. Soglie di insorgenza di TTS e PTS per mammiferi marini esposti a rumore non impulsivo: soglie in dB re 1  $\mu\text{Pa}^2\text{s}$  sott'acqua e dB re  $(20 \mu\text{Pa})^2\text{s}$  in aria (soltanto per i gruppi PCA e OCA). Le soglie per i sirenidi e gli otaridi sono presentate per completezza ma non verranno utilizzate in quanto nel mar Mediterraneo non sono presenti specie appartenenti a questi gruppi. Tabella adattata da Southall et al. (2019).

Gruppo uditivo	TTS: SEL (ponderato)	PTS: SEL (ponderato)
Cetacei – basse frequenze Low frequency (LF) cetaceans	179	199
Cetacei – alte frequenze High frequency (HF) cetaceans	178	198
Cetacei – frequenze molto alte Very High frequency (VHF) cetaceans	153	173
Sirenidi* Sirenians (SI)	186	206
Pinnipedi focidi in acqua: Phocid carnivores in water (PCW)	181	201
Otaridi in acqua* Otarid carnivores in water (OCW)	199	219
Pinnipedi focidi in aria: Phocid carnivores in air (PCA)	134	154
Otaridi in aria* Otarid carnivores in air (OCA)	157	177

\*calcoli per gli otaridi e i sirenidi non sono stati inclusi in quanto non presenti nelle acque del Mar Mediterraneo.

Per calcolare le distanze corrispondenti alle soglie di insorgenza di PTS e TTS, i livelli vanno filtrati (ponderati) in base alle diverse sensibilità uditive spettrali dei mammiferi marini presenti nel Mediterraneo. I livelli di esposizione al suono, o Sound Exposure Level (SEL), sono calcolati seguendo la metodologia descritta in Southall et al. (2019), che involve accumulare per una durata di 24 ore l'esposizione sonora dovuta alla sorgente acustica considerata. I livelli calcolati in bande spettrali vanno poi ponderati in frequenza per ciascun gruppo uditivo dei mammiferi marini presenti, come descritto nell'Appendice A. I valori di SEL prendono in considerazione le durate tipiche delle operazioni nel corso di un giorno. Per esempio, se un'operazione dura 2 ore nell'arco di 24, il livello di esposizione al suono dell'attività accumulato in 24 ore sarà calcolato in base a una somma di 2 ore, le 22 ore rimanenti contribuendo soltanto un profilo di rumore ambientale.

### 1.3. Effetti sul suono della propagazione nell'ambiente marino

Un fattore chiave nello studio del suono subacqueo è come un segnale acustico cambia in natura mentre si propaga dalla sorgente a un ricevitore a una certa distanza. Comprendere e modellizzare la propagazione del suono nell'oceano è un argomento complesso che è oggetto di numerosi testi. Questa sezione fornisce una panoramica descrittiva dei concetti essenziali di propagazione del suono per assistere con i risultati presentati in questo rapporto. Questi concetti sono parte integrante dell'interpretazione del modo in cui i suoni emessi da una sorgente vengono trasformati in quelli ricevuti a una certa distanza. I suoni vengono modificati da: 1) la diffusione geometrica; 2) la riflessione, la dispersione e l'assorbimento al fondale e alla superficie del mare; 3) la rifrazione dovuta alle variazioni della velocità del suono con la profondità; e 4) l'assorbimento dovuto alla vibrazione molecolare. Questa sezione non affronta 3), poiché la rifrazione del suono svolge solo un ruolo minore in acque poco profonde.

Ad un estremo, i clic di eco-localizzazione delle focene a 130 kHz percorrono solo 500 m prima di diventare impercettibili (Au et al. 1999). All'altro estremo, i suoni delle balenottere comuni (20 Hz) e l'energia a bassa frequenza dei cannoni ad aria compressa per esplorazioni sismiche (5–100 Hz) possono essere rilevati a migliaia di km di distanza in condizioni ottimali (Nieukirk et al. 2012).

*Perdite per diffusione geometrica:* i livelli sonori da una sorgente puntiforme omnidirezionale nella colonna d'acqua vengono ridotti con la distanza, un processo noto come perdita per diffusione geometrica. Quando il suono lascia la sorgente, le onde sonore si propagano sfericamente e l'energia sonora si diffonde su questa sfera in continua espansione. Più si è lontani dalla sorgente, più basso sarà il livello sonoro ricevuto. I livelli di pressione sonora ricevuti a una distanza  $R$  (in m) dalla sorgente sono  $20 \log_{10} R$  dB inferiori al livello di sorgente (SL) riferito a una distanza standard di 1 m. Ma in un ambiente reale il suono non può diffondersi uniformemente in tutte le direzioni in modo illimitato. Una volta che le onde interagiscono con la superficie e il fondale marino, la diffusione diventa cilindrica anziché sferica ed è limitata ad un fronte d'onda cilindrico limitato dalla superficie e dal fondale marino con una perdita che può ridursi a  $10 \log_{10} R$  dB. Pertanto, la profondità dell'acqua è un fattore chiave nella previsione delle perdite per diffusione geometrica e quindi dei livelli sonori ricevuti. I menzionati regimi di diffusione sferico e cilindrico costituiscono limiti per approssimazioni rapide dei livelli ricevuti in un certo ambiente da una data fonte sonora. In acque molto basse, il suono si attenua rapidamente se la profondità dell'acqua è inferiore a un quarto di lunghezza d'onda (Urick 1983).

*Assorbimento, riflessione e dispersione alla superficie e al fondale marino:* se la diffusione geometrica fosse l'unico fattore che regola l'attenuazione del suono in acqua, allora a una particolare distanza da una sorgente i livelli sonori ricevuti in acque poco profonde sarebbero quasi sempre superiori a quelli in acque profonde. Nel primo caso, tuttavia, il suono subisce interazioni più frequenti con il fondale e la superficie del mare rispetto al suono che si propaga in acque profonde; queste interazioni risultano in riflessione, assorbimento e dispersione dei suoni. La superficie si comporta approssimativamente come un limite di rilascio della pressione, dove il suono incidente è quasi interamente riflesso con fase opposta. Di conseguenza, la somma delle onde sonore incidenti e riflesse alla superficie del mare è nominalmente zero. Sul fondale marino possono verificarsi molti tipi di interazioni a seconda della composizione del medesimo. I fondi soffici di limo e argilla assorbono il suono, i fondi di sabbia e ghiaia tendono a rifletterlo parzialmente e alcuni fondi compatti ma elastici, come il calcare, riflettono parte del suono ma altresì assorbono parte dell'energia convertendo le onde di compressione in onde elastiche trasversali.

*Assorbimento molecolare nell'acqua di mare:* quando il suono si propaga nell'oceano, parte dell'energia viene assorbita dalla vibrazione molecolare nell'acqua di mare, che trasforma l'energia acustica in calore. Il livello di attenuazione è quantificato da un coefficiente di assorbimento, espresso in unità di decibel per chilometro (dB/km). Questo coefficiente dipende dalla temperatura, dalla salinità, dal pH e dalla pressione dell'acqua, nonché dalla frequenza del suono. In generale, il coefficiente di assorbimento aumenta con il quadrato della frequenza, quindi le basse frequenze sono molto meno influenzate. L'assorbimento dell'energia delle onde acustiche ha un effetto apprezzabile ( $>0.05$  dB/km) a frequenze superiori a 1 kHz. Ad esempio, a 10 kHz la perdita da assorbimento molecolare su una distanza di 10 km, calcolata secondo le formule di François e Garrison (1982a, b), può superare i 10 dB.

## 1.4. Rumore ambientale di fondo

I suoni ambientali, o di sottofondo, che creano il paesaggio acustico dell'oceano sono prodotti da molte fonti naturali e antropiche (Figura 3). Le principali sorgenti naturali sono vento, precipitazioni e ghiaccio marino. Il rumore generato dal vento nell'oceano è ben documentato (es., Wenz 1962, Ross 1976), e il suono dei frangenti è noto come importante contributo ai paesaggi sonori vicino alla costa (Deane 2000). Nelle regioni polari, il ghiaccio marino può produrre suoni intensi che sono spesso la componente principale dell'energia acustica nel paesaggio sonoro locale, in particolare durante la formazione e la rottura del ghiaccio. Le precipitazioni sono una consueta fonte di rumore ambientale, contribuendo tipicamente a frequenze superiori a 500 Hz. A basse frequenze ( $<100$  Hz), terremoti e altri eventi geologici contribuiscono al paesaggio sonoro (Figura 3).

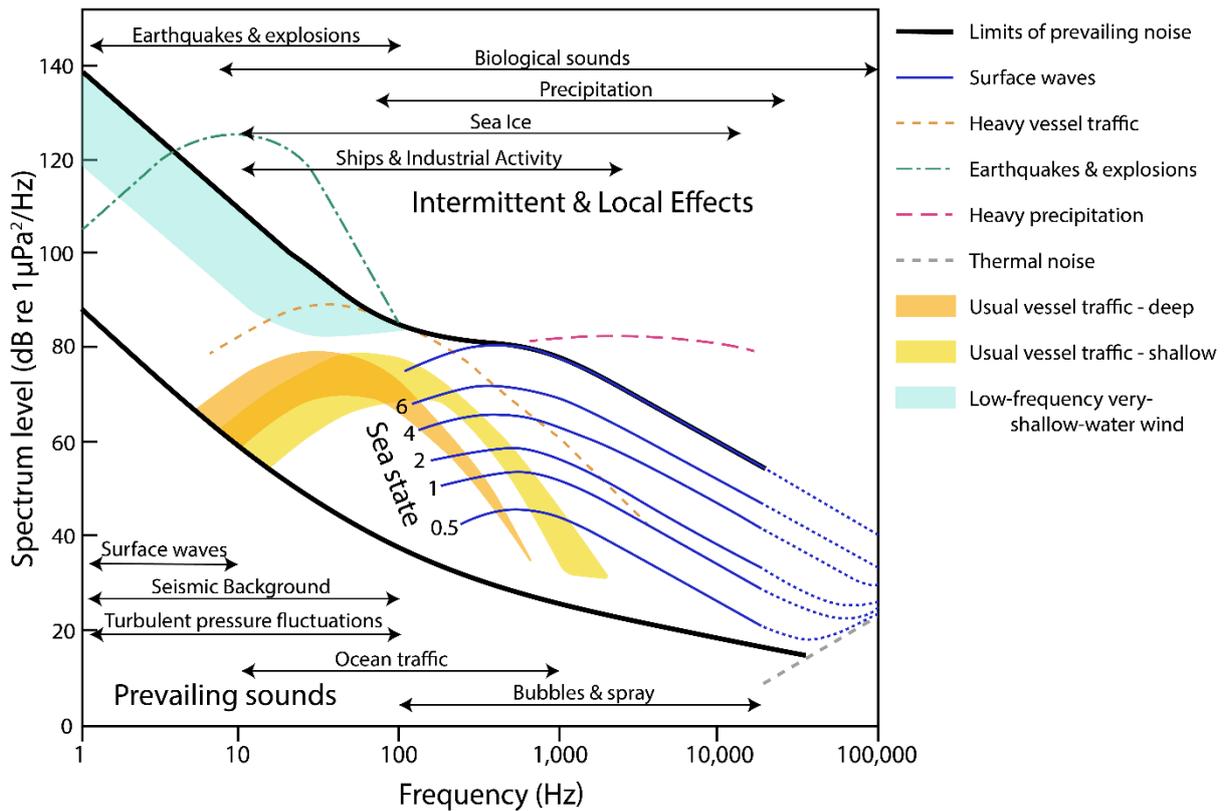


Figura 3. Curve di Wenz che descrivono i livelli di densità spettrale di pressione del suono ambientale marino prodotto da fenomeni meteorologici, vento, attività geologica e navigazione commerciale (adattate da NRC 2003, basate su Wenz 1962).. Le linee spesse indicano i limiti del suono ambientale prevalente.

Relativamente alle sorgenti antropiche nell'area d'interesse è possibile affermare che il rumore di fondo nell'area è notevolmente influenzato dal traffico navale, come si evince dalla Figura 4, in quanto ci sono molte importanti rotte di navigazione, in particolare i collegamenti fra il porto di Brindisi e porti nell'est del Mediterraneo. Inoltre l'area è soggetta a frequenti esercizi di esplorazione sismica. Infatti, questa zona è stata identificata come un hotspot per il rumore subacqueo da ACCOBAMS (Maglio et al. 2016).

Queste osservazioni sono supportate dai dati di rumore di sottofondo acquisiti nell'area (Fossati 2022) (Figura 5), in cui il rumore mediano di fondo riscontrato è di SPL 121 dB re 1  $\mu\text{Pa}^2$ . Sebbene i dati siano limitati a un breve periodo di acquisizione dei dati, si ritiene che questi siano rappresentativi del rumore di sottofondo e i risultati sono dunque stati utilizzati per contestualizzare i risultati della modellizzazione presentati in questo documento.

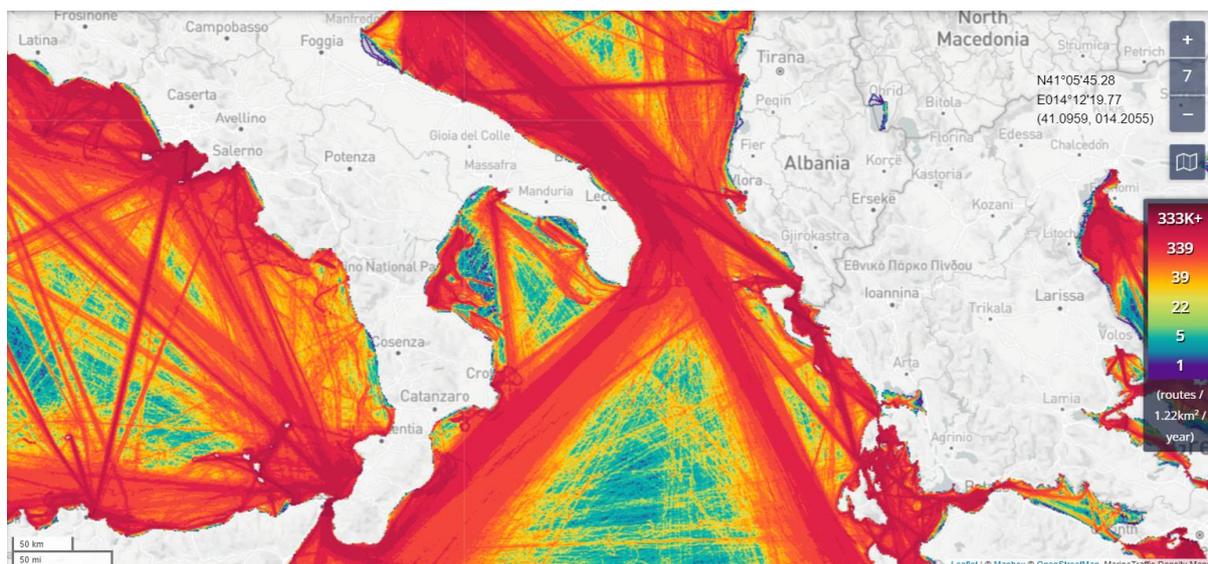


Figura 4. Traffico navale nel Mar Adriatico meridionale e Mar Ionio durante il 2021 (sorgente: marinetrffic.com).

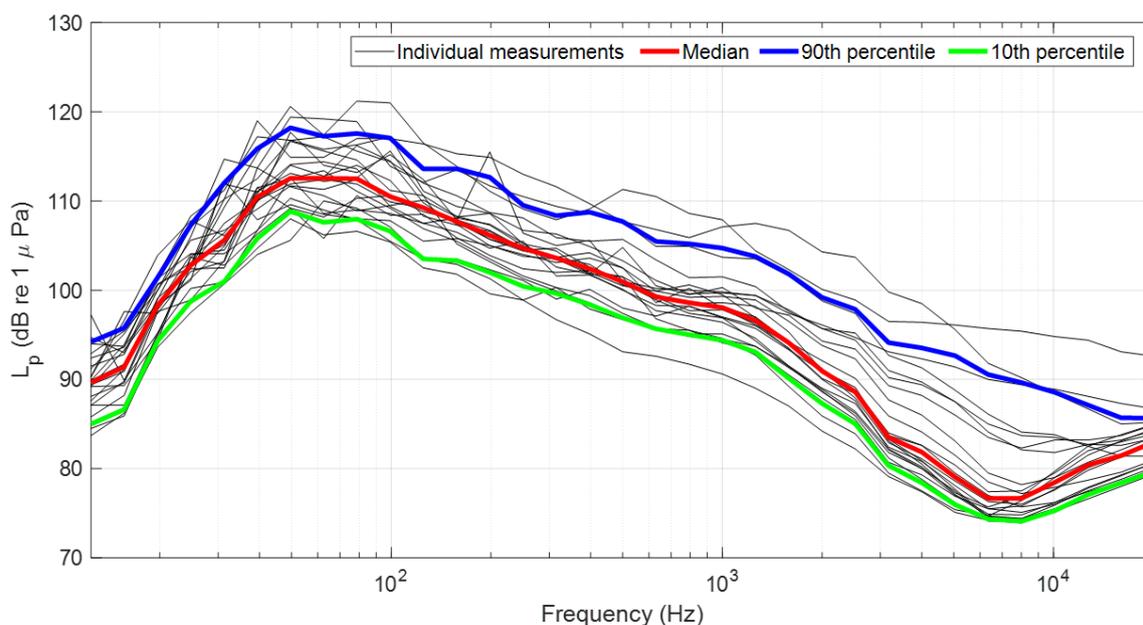


Figura 5. SPL calcolate sull'intervallo di 1 minuto per il monitoraggio di rumore ambientale nell'area in cui è previsto il Progetto (Fossati 2022).

## 1.5. Descrizione delle attività

Le seguenti attività sono state identificate come potenziali sorgenti di rumore sottomarino:

- Installazione delle ancore delle turbine (fase di costruzione)
- Dragaggio per la posa di cavi (fase di costruzione)
- Posa di cavi (fase di costruzione)
- Traffico di imbarcazioni per la costruzione e la manutenzione del parco eolico (fasi di costruzione e esercizio)

- Rumore operativo delle turbine (fase di esercizio)
- Rumore generato dalle navi e strumenti utilizzati per lo smantellato (fase di dismissione).

In questo studio, la modellizzazione è dedicata alle due operazioni che sono state ritenute più impattanti per quanto riguarda le potenziali emissioni sonore subacquee per le fasi di costruzione e esercizio del parco eolico, cioè l'installazione delle ancore e l'operazione regolare delle turbine. La fase di dismissione non è stata modellizzata in quanto non è ancora stata definita la modalità con cui questa operazione verrà condotta.

Essendo il Progetto ancora in una fase di definizione della soluzione ingegneristica, non si esclude che le attività modellizzate, descritte nelle sezioni 1.5.1 e 1.5.2, vadano riviste in futuro.

### 1.5.1. Installazione delle ancore - perforazione

Il sistema più comunemente utilizzato negli impianti offshore galleggianti è quello di fissare le turbine mediante catenarie ed ancore marine terminali. Esistono tuttavia, ove possibile per la natura dei fondali, tecniche di ormeggio con elementi tesi (catene o funi) o sistemi con ancore terminali costituite da strutture a suzione (suction buckets), pali ad avvitemento, e fondazioni a gravità. Queste tecniche di installazione alternative sono considerate meno rumorose dell'ancoraggio infisso a percussione.

Per questo progetto, è previsto che nel peggiore dei casi, le ancore debbano essere installate tramite perforazione. Durante la perforazione, la testa del trapano vibra e produce energia acustica (suono). Sono disponibili poche informazioni sulle emissioni sonore sottomarine derivanti dalla perforazione durante l'installazione di pali nei parchi eolici poiché la maggior parte delle misurazioni disponibili al pubblico proviene da operazioni di perforazione di petrolio e gas. La perforazione è classificata come sorgente sonora continua di bassa intensità (D11C2)(van der Graaf et al. 2012).

Durante le operazioni di perforazione, il suono può essere trasmesso nell'acqua tramite un percorso portato dal terreno o dalla struttura. La vibrazione trasmessa dal terreno viene generata all'interfaccia perforazione-roccia mentre la testa di perforazione ruota. Il suono si irradierà sia come onde di compressione che di taglio verso l'interfaccia della falda freatica dove si propagherà nell'acqua. Le vibrazioni meccaniche generate nel trapano possono anche essere trasmesse all'acqua circostante. Inoltre, diverse sorgenti sonore sono presenti a bordo della nave che verrà utilizzata durante le operazioni di perforazione, tra cui il sistema dinamico di posizionamento (DP) motori e propulsori, generatori e alimentatori per il funzionamento della perforatrice. Il suono si propagherà dalla nave nell'ambiente marino (Abrahamsen 2012).

Pochi studi sono disponibili sul suono subacqueo generato dalla perforazione, specialmente per attività come l'installazione di ancore sul fondale. La maggior parte della letteratura disponibile riguarda trivellazione per pozzi petroliferi.

Hall and Francine (1991) presentano le misurazioni di un impianto di perforazione installato su un'isola artificiale a Camden Bay, in Alaska, in un'area profonda da 10 a 15 m. I livelli sonori massimi ricevuti tra 1 e 100 Hz sono 127 dB re 1  $\mu$ Pa a 259 m dalla testa del trapano. I livelli di rumore sono stati registrati anche durante un'operazione di perforazione su piccola scala nella roccia dura (Willis et al. 2010). Il livello più alto ricevuto, misurato a 7,5 m dalla testa di perforazione, è stato di 109 dB re 1  $\mu$ Pa (livello di picco) a 10 Hz e 98 dB re 1  $\mu$ Pa (livello di picco) a 300 Hz. La frequenza della testa di perforazione non è stata riportata; tuttavia, è probabilmente più alto di quello che verrebbe utilizzato nel progetto studiato perché il suo diametro è relativamente piccolo (circa 10 cm). Componenti a bassa frequenza nell'energia acustica, simili a quelle del movimento rotatorio di una piattaforma rotante di perforazione, sono state segnalate durante l'installazione di cassoni in calcestruzzo (Nedwell et al. 2003). La velocità di rotazione di questo trapano dipende dal substrato: da 150 a 250 RPM è tipico in un substrato morbido e da 50 a 100 RPM in un substrato duro (0.8 to 1.7 Hz; Nguyen 1996). Le vibrazioni nel substrato possono ritrasmettere l'energia sonora nella colonna d'acqua.

Per una serie di misure effettuate a 1 km sono stati stimati i livelli alla sorgente (SL) per un utensile di perforazione simile con punta di 6 m di diametro per le attività di scavo e 50 cm di diametro per la perforazione, contenente una serie di dischi rotanti di 0,9 m di diametro. dalla fonte durante la perforazione esplorativa offshore in tre siti nei mari Chukchi e Beaufort (46 e 33 m di profondità) (Austin et al. 2018). I livelli della sorgente riportati differivano a seconda dell'imbarcazione utilizzata per le attività e variavano tra 168,6 dB re 1  $\mu$ Pa e 174,9 dB re 1  $\mu$ Pa (livelli medi della banda larga sulla banda di frequenza da 10 Hz a 32 kHz) (Austin et al. 2018). Austin et al. (2018) hanno riportato toni dominanti e armoniche inferiori a 2 kHz, con armoniche superiori presenti a 10 kHz. I toni inferiori a 100 Hz con armoniche a multipli interi delle frequenze fondamentali corrispondevano alle frequenze operative previste associate alle apparecchiature di generazione di energia, motori, pompe e motori sulle piattaforme. Lo scavo con la punta di perforazione più grande ha richiesto più potenza e ha portato a livelli di sorgente più elevati associati all'uso di macchinari a bordo della piattaforma di perforazione (191,8–193,3 dB re 1  $\mu$ Pa); pertanto si prevede che maggiore è la potenza necessaria per azionare il trapano, maggiori saranno i livelli sonori che esso genererà.

A profondità maggiori, le approssimazioni dei livelli della sorgente qui presentati potrebbero non essere valide perché il suono a bassa frequenza può propagarsi più lontano rispetto a questi ambienti di acque poco profonde. Non sono però disponibili studi effettuati in acque più profonde.

### 1.5.2. Rumore operativo delle turbine

Il rumore subacqueo delle turbine eoliche in funzione ha origine nelle parti meccaniche in movimento nella navicella, quasi esclusivamente con energia emessa alle basse frequenze, al di sotto 1 kHz, e tipicamente con forti elementi tonali alle frequenze corrispondenti alla rotazione degli ingranaggi e le loro armoniche (Pangerc et al. 2016). Il rumore viene trasmesso attraverso la torre e irradiato nell'acqua dalla sezione sommersa; i livelli sonori operazionali sottomarini potrebbero dunque dipendere dal tipo di fondazione, ma ciò non è stato dimostrato dagli studi condotti fino ad ora (Tougaard et al. 2020). Due fattori che chiaramente influenzano il livello sonoro sono la grandezza della turbina e la forza del vento. Con l'aumento delle dimensioni delle pale, le forze meccaniche che agiscono su ingranaggi e cuscinetti aumentano a loro volta e questo comporta livelli di rumore più elevati; lo stesso vale per un aumento della velocità del vento (Tougaard et al. 2020). Il rumore sottomarino emesso da turbine individuali risulta comunque notevolmente inferiore ai livelli acustici ambientali, mentre nel caso di numerose turbine i livelli di rumore aggregati del parco eolico potrebbero essere elevati rispetto al sottofondo acustico fino ad alcuni chilometri di distanza in condizioni di rumore ambientale molto basso.

La frequenza e il livello sonoro generati dagli aerogeneratori in funzione dipendono dalle dimensioni della WTG, dalla velocità e dalla rotazione del vento, dal tipo di fondazione, dalla profondità dell'acqua, dalle caratteristiche del fondale marino e dalle condizioni delle onde (Cheesman 2016, HDR 2019). Il rumore operativo è a bassa frequenza (da 60 a 300 Hz) e a livelli di pressione sonora relativamente bassi vicino alla fondazione (da 100 a 151 dB re 1  $\mu$ Pa) e per quelli misurati prima del 2012, diminuisce all'ambiente entro 1 km (Tougaard et al. 2009, Lindeboom et al. 2011b, Dow Piniak et al. 2012). I suoni subacquei emessi dai WTG sono udibili da mammiferi marini, tartarughe marine, pesci e invertebrati, ma sono inferiori al danno normativo e tipicamente inferiori alle soglie comportamentali per la fauna marina.

Il suono subacqueo irradiato dagli impianti eolici in funzione è a bassa frequenza e basso livello (Nedwell and Edwards 2004). A distanze da 14 a 20 m dagli aerogeneratori operativi in Europa, i livelli di pressione sonora sott'acqua variavano da 109 dB a 127 dB re 1  $\mu$ Pa (Tougaard et al. 2009c). Pangerc et al. (2016) hanno registrato livelli sonori a ~50 m da due singole fondazioni monopalo WTG da 3,6 megawatt (MW) per un periodo di funzionamento di 21 giorni. Il livello di pressione sonora è aumentato con la velocità del vento fino a un valore medio di 128 dB re 1  $\mu$ Pa a una velocità del vento di ~10 m/s, e poi ha mostrato una diminuzione generale dei livelli sonori con l'aumentare della velocità

del vento quando le pale della turbina erano piumate. Miller and Potty (2017) hanno misurato un SPL di 100 dB re 1  $\mu$ Pa entro 50 m da cinque turbine eoliche General Electric Haliade da 150-6 MW con una frequenza di picco del segnale di 72 Hz. Presso il parco eolico di Block Island al largo di Rhode Island, i livelli sonori sono stati trovati a 112-120 dB re 1  $\mu$ Pa quando la velocità del vento era compresa tra 2 e 12 m/s e i livelli sonori sono scesi all'ambiente entro 1 km dal WTG (HDR 2019). Tougaard et al. (2009) hanno rilevato che il livello sonoro di tre diversi tipi di WTG nelle acque europee era misurabile solo al di sopra dei livelli sonori ambientali a frequenze inferiori a 500 Hz, e Thomsen et al. (2016) suggeriscono che a circa 500 m dai WTG in funzione, i livelli sonori dovrebbero avvicinarsi ai livelli ambientali.

È stato riscontrato che il design della fondazione influenza i livelli sonori nell'acqua in funzione della distanza. I livelli sonori misurati a 150 m da una fondazione monopalo in acciaio sono stati di 133 dB re 1  $\mu$ Pa con frequenze di picco comprese tra 50-140 Hz, mentre le misurazioni a 150 m da una fondazione WTG a camicia sono state di 122 dB re 1  $\mu$ Pa con una frequenza di picco di 50 Hz e picchi secondari a 150, 400, 500 e 1.200 Hz. Tuttavia, a 40 m i livelli di pressione sonora erano paragonabili tra il monopalo in acciaio (135 dB) e il tipo di fondazione a camicia (137 dB) (Thomsen et al. 2016).

Due documenti recenti (Tougaard et al. 2020, Stöber and Thomsen 2021) hanno valutato i suoni operativi degli aerogeneratori estraendo i livelli sonori misurati a varie distanze in funzione dai rapporti attualmente disponibili. Tougaard et al. (2020) hanno utilizzato un modello lineare per adattare i livelli sonori in funzione delle dimensioni della turbina, della velocità del vento e della distanza. Il loro modello suggeriva che il suono proveniente da più WTG sarebbe stato rilevabile fino a pochi km in aree con livelli di rumore ambientale molto bassi, ma sarebbe stato al di sotto dell'ambiente a meno che non fosse "molto vicino" ai singoli WTG in aree con un elevato rumore ambientale dovuto a navi o vento. In particolare, i dati disponibili provenivano da WTG di potenza inferiore rispetto a quelli attualmente pianificati per la costa orientale degli Stati Uniti, e principalmente da turbine con ingranaggi, piuttosto che a trasmissione diretta. Stöber e Thomsen (2021) hanno tentato di colmare questa lacuna di conoscenza estraendo un sottoinsieme rigorosamente definito dei dati utilizzati da Tougaard et al. (2020) per estrapolare i livelli sonori a turbine di dimensioni maggiori e a turbine a trasmissione diretta. Tuttavia, la piccola dimensione del loro sottoinsieme di dati aumenta notevolmente la già considerevole incertezza dei risultati della modellazione. Inoltre, il loro modello presupponeva che l'SPL aumentasse linearmente con la capacità dell'aerogeneratore, il che contrasta con quanto noto dei tipici sistemi meccanici. Entrambi gli studi hanno riscontrato che i suoni sono generalmente più alti per le turbine di potenza maggiore. È importante sottolineare che finora non esistono misurazioni per queste turbine di dimensioni maggiori e sono state effettuate poche misurazioni per le turbine a trasmissione diretta; quindi, l'incertezza in queste stime è ampia.

Nel 2011 la JASCO condusse una spedizione per Statoil per misurare i livelli di rumore sottomarino associati con la turbina galleggiante di HYWIND in Norvegia. Le misure effettuate hanno mostrato che la struttura HYWIND genera una varietà di componenti acustici distintivi che possono essere rilevati al di sopra del livello del rumore di fondo e sembrano essere correlati all'azione degli ingranaggi per generazione elettrica. Nessuno di questi componenti ha mostrato livelli superiori a 115 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup> / Hz. I rumori rilevati includono occasionali suoni transitori di "schiocco" (a intervalli entro i 23 secondi) con livelli di picco superiori a 160 dB re 1  $\mu$ Pa nella banda di registrazione di 0 – 20000 Hz. Si pensa che questi rumori transitori siano correlati ai rilasci di tensione nell'ormeggio (Martin et al. 2011).

Più di recente, uno studio dettagliato del rumore operativo di turbine eoliche galleggianti presso Hywind Scotland (Burns et al. 2022), che sono sostenute tramite una boa di tipo spar. I risultati hanno mostrato che oltre ai segnali acustici tonali riscontrati nelle turbine a fondazione fissa, suoni a banda larga di tipo transitorio sono generati dal sistema di ancoraggio. I tipi di suoni associati col sistema di ancoraggio, e il loro livello, sono apparsi variare da turbina a turbina. I livelli medi della sorgente a banda larga (10-32000 Hz) variavano da 162,5 a 167,2 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>m<sup>2</sup> con il 95° percentile a 25 nodi di 172 dB re 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>m<sup>2</sup>. Nessuno studio è stato pubblicato su misurazioni effettuate con fondata

come descritto per questo progetto; gli autori della presente relazione hanno però ottenuto dei risultati delle misurazioni fatte dalla Scottish Association for Marine Science (SAMS) presso la Kinkardine Wind Farm (Van Geel et al. 2022), parco eolico galleggiante (aerogeneratori da 9.5MW) costruito con la struttura di Principle Power in un'area in cui la batimetria varia da 60 a 80 m. Lo studio condiviso, in via di pubblicazione, al momento non riporta i livelli di sorgente ma solo quelli ricevuti (Figura 6).

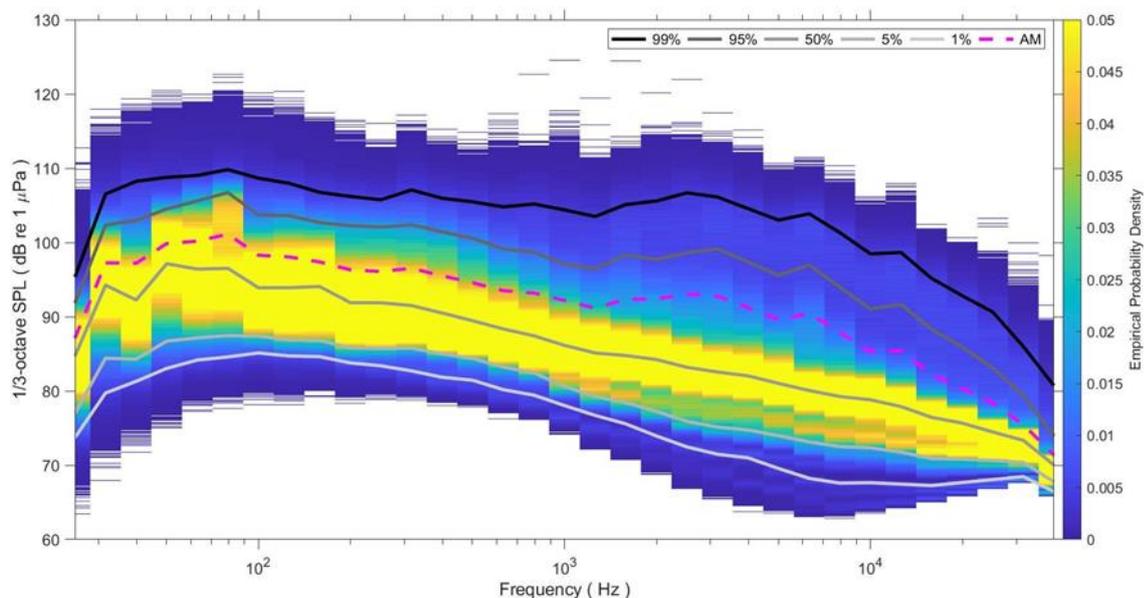


Figura 6. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava per le registrazioni effettuate fra Nov-Dec 2021 a 200m da una turbina del parco eolico Kinkardine (misurazioni e analisi effettuate da SAMS, (Van Geel et al. 2022)).

## 1.6. Impatto sulla fauna marina

Nei parchi eolici di Horns Rev e Nysted offshore in Danimarca, il monitoraggio a lungo termine ha dimostrato che sia la focena che la foca venivano avvistate regolarmente all'interno dei parchi operativi e, entro due anni dall'installazione, le popolazioni erano tornate a livelli comparabili con l'area più ampia (Diederichs et al. 2018). Analogamente, il programma di monitoraggio presso il parco eolico di Egmond aan Zee nei Paesi Bassi ha riportato che durante la fase operativa si riscontrò un'attività di focene significativamente maggiore all'interno dell'OWF rispetto all'area di riferimento (Scheidat et al. 2011). Anche altri studi presso gli OWF olandesi e danesi suggeriscono che la focena potrebbe essere attratta da maggiori opportunità di foraggiamento all'interno di parchi eolici offshore (Lindeboom et al. 2011a). Quindi non è da escludere che questo sia applicabile ad altre specie di mammiferi marini.

Studi condotti principalmente su pinnipedi hanno similmente concluso che il rumore operativo del parco eolico causa un impatto trascurabile (Madsen et al. 2006). Foche taggate hanno mostrato un comportamento di raduno intorno ai parchi eolici offshore operativi il che suggerisce che questi agiscano come dispositivi di aggregazione per i pesci, fornendo nuove o migliori opportunità di foraggiamento (Russell et al. 2016). Gli studi hanno inoltre dimostrato che le focene vengono osservate regolarmente all'interno dei parchi eolici offshore operativi (Scheidat et al. 2011, Diederichs et al. 2018) e possono attratte ad essi da maggiori opportunità di foraggiamento (Lindeboom et al. 2011a).

Uno studio (Nowacek et al. 2004) ha segnalato che le balene franche nordatlantiche (*Eubalaena glacialis*) mostrano un comportamento di evasione per suoni tonali a livelli (RMS) ricevuti tra 134 e 148 dB re 1  $\mu$ Pa. È quindi possibile ipotizzare che i rumori delle turbine operative possano avere degli impatti sui cetacei sensibili a basse frequenze, come la balenottera comune (Madsen et al. 2006). Non sono disponibili studi in acque profonde e sulle specie comuni nel Mediterraneo.

Il suono a bassa frequenza emesso dagli aerogeneratori è motivo di preoccupazione per le tartarughe marine. Il loro raggio uditivo più sensibile è limitato alle basse frequenze (Ridgway et al. 1969, Bartol et al. 1999) e le tartarughe marine hanno mostrato un di evitare i suoni a bassa frequenza (O'Hara and Wilcox 1990, Dow Piniak et al. 2012).

Il suono subacqueo generato dal funzionamento delle turbine è nella migliore gamma di frequenza uditiva dei pesci, ma è di bassa intensità (Madsen et al. 2006). I livelli sonori misurati sono ben al di sotto delle soglie acustiche non impulsive esistenti per lesioni o risposta comportamentale nei pesci (McCauley et al. 2000, Popper et al. 2014, Finneran et al. 2017). Mentre i livelli sonori sottomarini sono correlati alla potenza del WTG e alla velocità del vento, con l'aumento della velocità del vento che crea maggiori livelli sonori sottomarini, anche a velocità del vento elevate Wahlberg and Westerberg (2005) hanno stimato che l'evitamento permanente da parte dei pesci si verificherebbe solo entro quattro metri dalle fondamenta. Stober and Thomsen (2021) hanno estrapolato i livelli sonori misurati a WTG di dimensioni maggiori e hanno trovato distanze maggiori rispetto a una data soglia sonora, ma hanno notato che gli impatti potrebbero essere limitati alle risposte comportamentali nei pesci che potrebbero essere compensate dai benefici derivanti da un minore sforzo di pesca e dalla creazione di scogliere artificiali nei siti dei parchi eolici.

In uno studio sui pesci vicino al parco eolico di Svante in Svezia, i tassi di cattura del merluzzo atlantico e del triotto (*Rutilus rutilus*) erano significativamente più alti vicino alle turbine quando i rotori erano fermi, il che potrebbe indicare l'attrazione dei pesci per la struttura della turbina e l'evitamento del rumore durante il funzionamento (Westerberg 2000 as cited in Thomsen et al. 2006). In un altro studio, non è stato osservato alcun comportamento di evitamento quando la densità dei pesci è aumentata attorno alle fondazioni delle turbine del parco eolico offshore di Lillgrund in Svezia (Bergström et al. 2014).

## 2. Metodi

Questa sezione descrive i metodi utilizzati per stimare i livelli di sorgente (sezione 2.1), effettuare la propagazione del suono in mare (sezione 2.2), e stimare le distanze di impatto sui mammiferi marini che potrebbero essere presenti nell'area (sezione 2.3). I parametri ambientali usati come input nel modello sono specificati nella sezione 2.4.

### 2.1. Stima dei livelli di sorgente

Data l'incertezza sul metodo di installazione delle ancora a parte la considerazione che il caso peggiore sia la perforazione, è stato deciso di utilizzare i livelli di sorgente presentati da Austin et al. (2018), in quanto si considera la nave utilizzata per le operazioni sia la maggiore sorgente di rumore durante questa fase. La nave che verrà utilizzata per l'installazione delle ancore delle turbine non è ancora stata determinata; dunque per questo studio si è utilizzato direttamente il profilo della nave con posizionamento dinamico *Discoverer* (livello di sorgente a banda larga di 191.8 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  m per la fase di scavo) presentato nello studio di Austin et al. (2018). Una volta definiti i dettagli ingegneristici sarà possibile scalare i livelli per la potenza della nave scelta, se necessario.

I livelli di sorgente decedecade per rappresentare l'operazione di perforazione sono mostrati nella Figura 7. La sorgente è considerata puntiforme, con una profondità di 10m (metà del pescaggio) dato che si considera che la sorgente sarà statica durante le operazioni di perforazione.

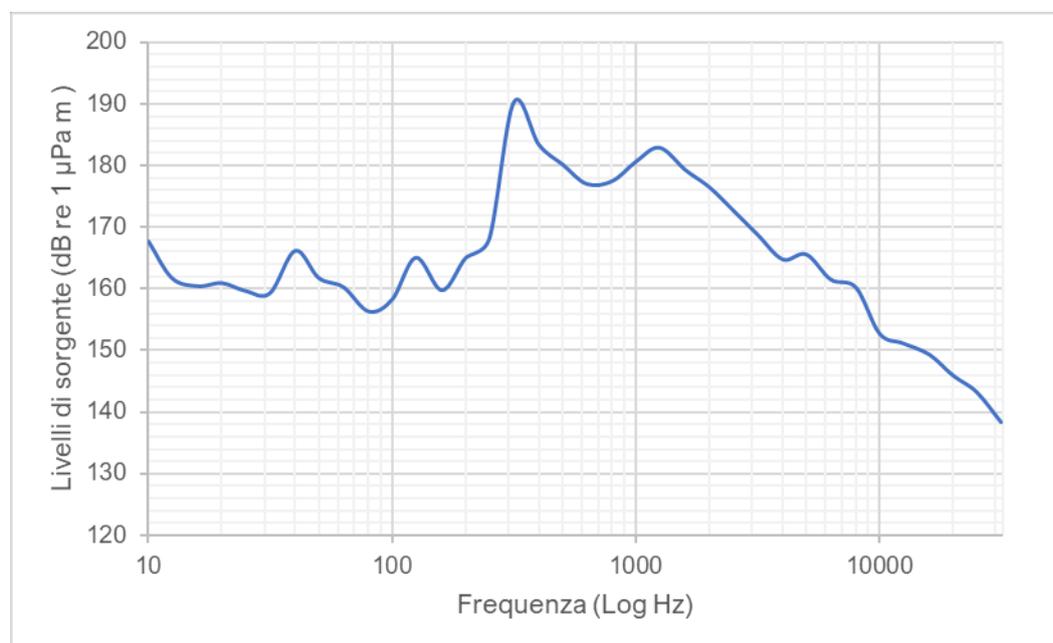


Figura 7. Spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello per l'operazione di perforazione.

Per la fase operativa, il profilo medio di una turbina derivato dai risultati delle misurazioni effettuate presso la Kinkardine Offshore Wind Farm è stato utilizzato come input per il modello di sorgente. Sebbene la potenza delle turbine del progetto sia maggiore rispetto a quella del proxy, si ritiene che scalare la sorgente per una maggiore potenza non sia possibile in quanto i dati disponibili su questo argomento nella letteratura scientifica sono estremamente limitati. Di conseguenza, scalare i livelli sulla base della potenza della turbina solamente potrebbe introdurre errori di valutazione. Rispetto ai livelli presentati nella Figura 6, i livelli di sorgente sono stati stimati applicando una retro-propagazione sferica (secondo l'equazione  $PL=20 \cdot \log R$ ) dato che le registrazioni furono effettuate a

200m dalla sorgente. Una stima più accurata non è stata possibile dato che la JASCO non era coinvolta con le misurazioni e la modellistica per quel progetto. Durante l'anno 2023, è possibile che dati più precisi sui livelli di sorgente divengano disponibili. I livelli di sorgente utilizzati nel modello sono presentati nella Figura 8; essi corrispondono a un livello di sorgente a banda larga (10Hz-32kHz) di 152.5 dB re 1  $\mu\text{Pa m}$  per una turbina individuale. La sorgente è considerata puntiforme, con una profondità di 10m.

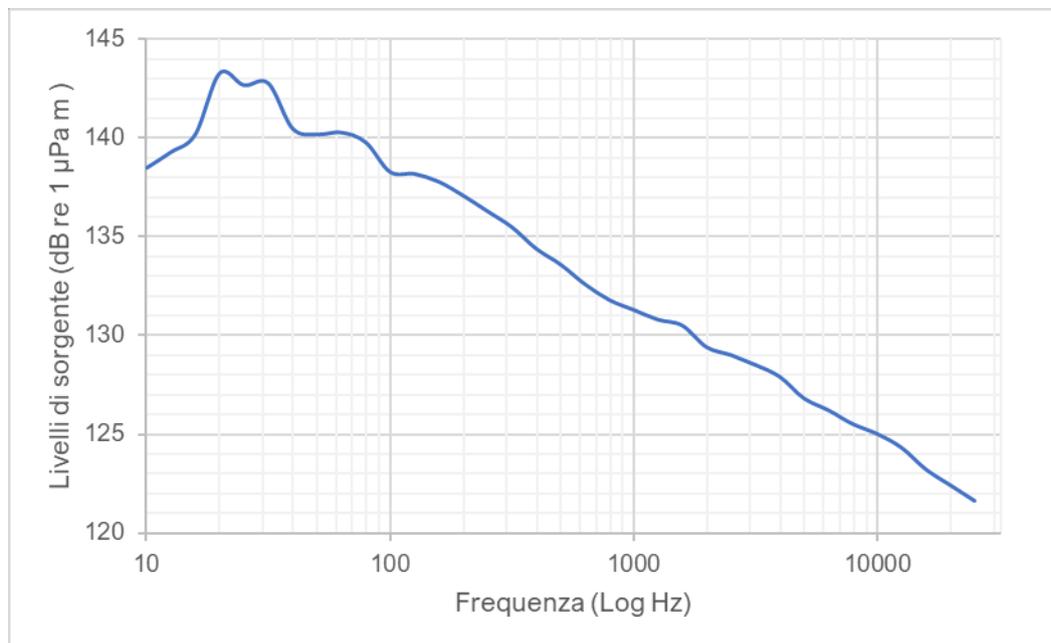


Figura 8. Spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello per una turbina operativa.

Per il Progetto, la modellizzazione per la fase di costruzione è stata effettuata per un punto (sorgente) considerato il caso più cautelativo (maggiore propagazione del suono) in base alla batimetria; per la fase di operazione si è considerato lo stesso punto di cui sopra nonché uno rappresentativo della maggior parte del parco eolico in base alla batimetria; le coordinate di tali sorgenti sono elencate nella Tabella 3 .

Per la stima delle distanze di impatto per i mammiferi marini per il parco eolico operativo, tali sorgenti sono state replicate per rappresentare il numero totale delle turbine, in base alla batimetria di ogni singola turbina. La modellizzazione presuppone che sia la sorgente che il ricevitore (animale esposto al suono) rimangano statici. La stima dei livelli di esposizione al rumore per PTS e TTS considerano che la perforazione abbia una durata di 12 ore su 24 (assumendo che l'attività avvenga solo durante le ore di luce) mentre le turbine in fase di esercizio saranno operative 24 ore su 24.

Tabella 3. Descrizione dei due siti usati come sorgenti per la modellizzazione.

Sito	ID della turbina	Latitude (dd.ddddd) N	Longitude (dd.ddddd)E	Easting utmz 34N	Northing utmz 34N	Profondità della sorgente (m)	Profondità dell'acqua (m)
1	14	40.515335	18.44615	283639	4488089	10	-100
2	20	40.464942	18.529196	290519	4482295	10	-120

## 2.2. Modellizzazione della propagazione del suono

La propagazione del suono è stata modellizzata utilizzando il modello della JASCO MONM-Bellhop, che è descritto in maggiore dettaglio nell'Appendice B.

Questo tipo di modello combina l'utilizzo dell'equazione parabolica per le basse frequenze e il modello Bellhop per le frequenze sopra 2kHz. La scelta è motivata dal fatto che il progetto si trovi in acque relativamente poco profonde (al di sotto di 150m) e quindi questo modello combinato risulta essere il più accurato, come ampiamente discusso nella letteratura scientifica (Etter 2009, Farcas et al. 2016) (Figura 9).

Model Type	Shallow Water				Deep Water					Not applicable
	Low Frequency		High Frequency		Low Frequency		High Frequency			
	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.		
Simple energy spreading	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Limited in accuracy or speed of execution
Ray Theory			■	■	■	■	■	■	■	Accurate and practical
Parabolic equation	■	■			■	■	■	■	■	
Normal mode	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Wave number integration	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

Figura 9. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari ((JASCO Applied Sciences 2019), riadattato da Etter, 2009).

## 2.3. Stima dell'impatto sui mammiferi marini

I contorni di soglia del livello sonoro sono calcolati partendo dai campi tridimensionali di livelli acustici stimati dai modelli di propagazione, assegnando ad ogni posizione geografica nella regione d'interesse il livello massimo su tutte le profondità modellizzate.

Le distanze a cui livelli specifici vengono raggiunti sono calcolate da questi contorni. Per ogni livello sonoro d'interesse sono riportate due distanze relative alla sorgente: (1)  $R_{max}$ , la portata massima di un certo livello sonoro in qualsiasi direzione, e (2)  $R_{95\%}$ , la portata di quel livello sonoro dopo che il 5% dei punti più lontani sono stati esclusi (vedi esempi in Figura 10).

L' $R_{95\%}$  viene utilizzato perché i contorni del livello sonoro sono spesso di forma irregolare. In alcuni casi, un contorno potrebbe presentare piccole sporgenze o frange isolate anomale. Ciò è dimostrato nell'esempio a sinistra in Figura 10. In casi come questo,  $R_{max}$  può sovrastimare incorrettamente l'estesa della regione esposta a tali livelli e  $R_{95\%}$  è considerato più rappresentativo. Al contrario, in casi di forte asimmetria radiale come mostrato a destra nella Figura 10,  $R_{95\%}$  trascura sostanziali sporgenze nella distribuzione del livello sonoro, e  $R_{max}$  può rappresentare meglio la regione di effetto in certe direzioni. Casi come questo sono solitamente associati a proprietà della batimetria che influenzano la propagazione acustica. La differenza tra  $R_{max}$  e  $R_{95\%}$  dipende dalla direttività della sorgente e dalla non uniformità dell'ambiente acustico.

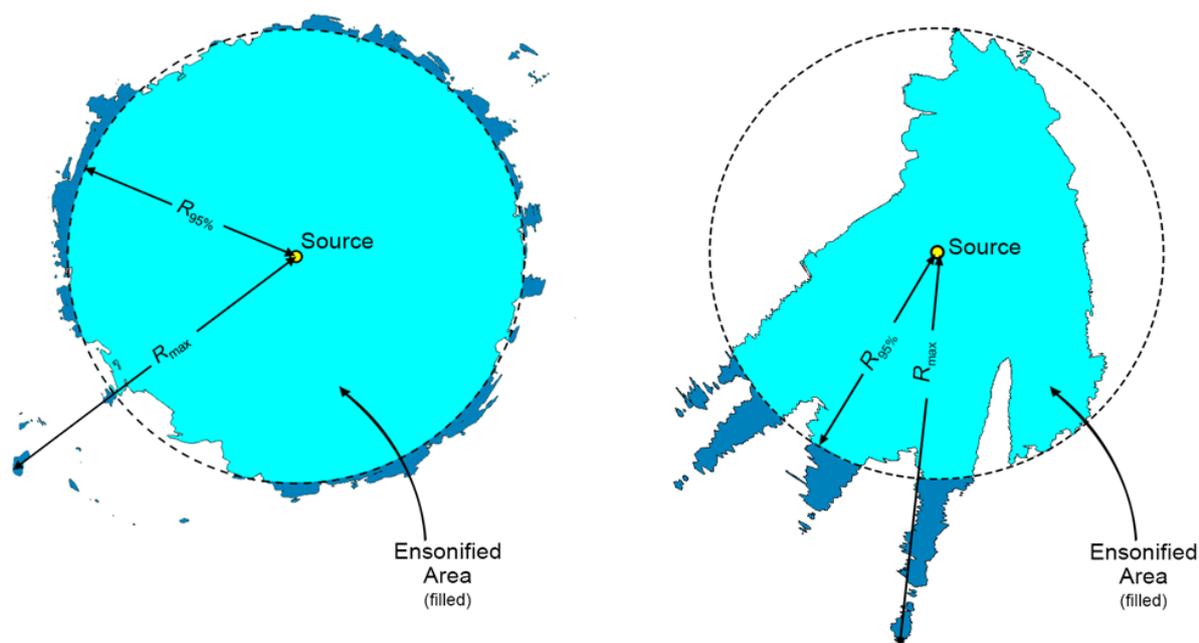


Figura 10. Esempi di aree insonificate a un certo livello sonoro con le distanze  $R_{max}$  e  $R_{95\%}$  dimostrate per due scenari differenti: (sinistra) una distribuzione del livello sonoro radialmente simmetrica con piccole sporgenze, per la quale  $R_{95\%}$  meglio rappresenta l'area insonificata effettiva; e (destra) una distribuzione di livello sonoro fortemente asimmetrica con lunghe sporgenze, per la quale  $R_{max}$  meglio rappresenta le aree insonificate in alcune direzioni. L'azzurro indica le aree insonificate delimitate da  $R_{95\%}$ ; il blu più scuro indica le regioni limitrofe che determinano  $R_{max}$ .

## 2.4. Parametri Ambientali

### 2.4.1. Profilo della velocità del suono

Il profilo di velocità del suono per gli scenari modellizzati è stato derivato dai dati storici di osservazione utilizzando i profili di temperatura e salinità del US Naval Oceanographic Office's *Generalized Digital Environmental Model V 3.0* (GDEM; Teague et al. 1990, Carnes 2009). GDEM fornisce una climatologia oceanica di temperatura e salinità per gli oceani del mondo su una griglia latitudine-longitudine con una risoluzione di  $0,25^\circ$ , con una risoluzione temporale di un mese, basata su osservazioni storiche globali del Master Oceanographic Observational Data Set (MOODS) della Marina degli Stati Uniti. I profili climatologici includono 39 punti di profondità fissi fino a una profondità massima di 2800 m. I profili di temperatura-salinità GDEM sono stati convertiti in profili di velocità del suono secondo la formula di Coppens (1981).

Un profilo medio mensile di velocità del suono è stato analizzato per ogni per determinare quale fosse il profilo che favorisse maggiormente la propagazione del suono sulle lunghe distanze, rappresentativo dello scenario più cautelativo. Tale profilo, corrispondente al mese di febbraio, è stato scelto per la modellizzazione data la velocità quasi isotropa con propagazione leggermente rifrangente verso l'alto (Figura 11).

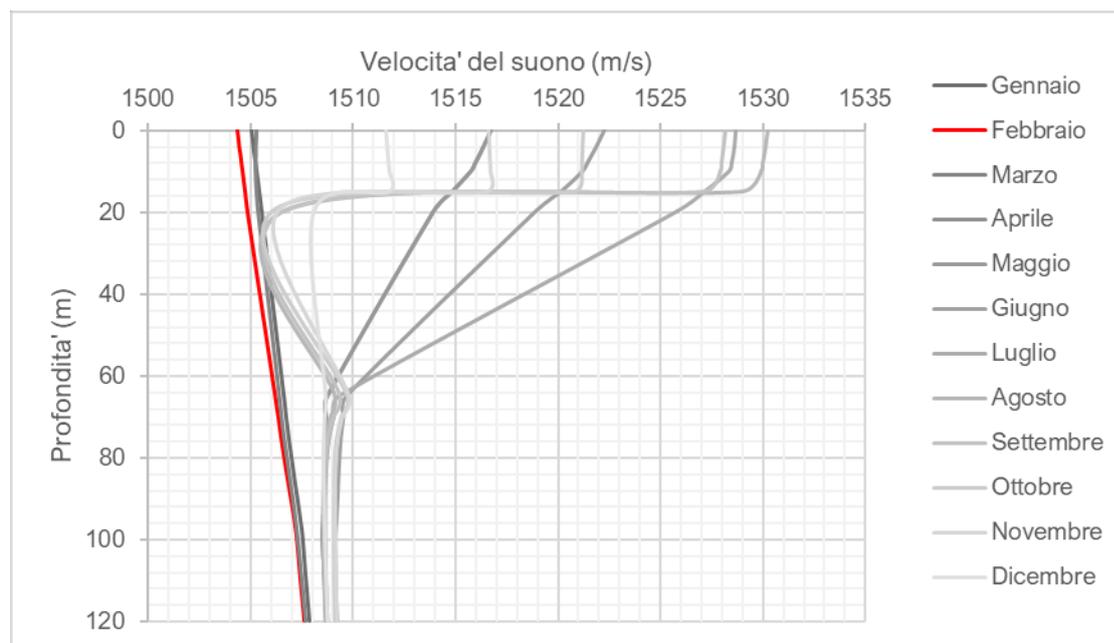


Figura 11. Profilo della velocità del suono utilizzato per la modellizzazione (rosso) e per ogni altro mese dell'anno (grigio).

## 2.4.2. Batimetria

Le profondità dell'acqua in tutta l'area modellizzata sono state estratte dalla griglia batimetrica europea EMODnet (EMODnet Bathymetry Consortium 2020), generata per i bacini marittimi europei con risoluzione di 1/16 d'arco (circa 115 m × 115 m).

I dati di batimetria per un'area di circa 175 × 200 km sono stati estratti e ricampionati, mediante griglia di curvatura minima, su una proiezione di coordinate della zona 33 di Mercatore trasversale universale (UTM) con una spaziatura regolare della griglia di 100 × 100 m.

## 2.4.3. Geoacustica

In un ambiente poco profondo le interazioni tra il campo acustico e il fondale marino sono importanti, e profili geoacustici accurati sono necessari per una corretta modellizzazione acustica. Le interazioni tra campo acustico e fondale marino diventano trascurabili in acque molto più profonde. Profili geoacustici generici sono quindi considerati validi per modellizzare l'intera area circostante al sito di studio. Poiché tale area è ampia e le informazioni geoacustiche sono limitate in definizione spaziale, è stato costruito un profilo geoacustico semplificato per rappresentare le principali caratteristiche della colonna di sedimenti nel sito modellizzato.

Il profilo dei parametri geoacustici in funzione della profondità sotto il suolo è stato calcolato dai valori di Hamilton (1980) ed è presentato nella Tabella 4. Il modello MONM-BELLHOP utilizzato in questo studio considera solo le proprietà delle onde trasversali dello strato superficiale; questi valori sono quindi considerati costanti nel profilo.

Tabella 4. Profilo geoacustico stimato per il sito modellizzato. All'interno di ogni intervallo di profondità, ogni parametro varia linearmente all'interno dell'intervallo indicato. L'onda di compressione (P) è l'onda primaria. L'onda trasversale (S) è l'onda secondaria.

Profondità sotto il suolo (m)	Materiale	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Onda di compressione		Onda trasversale	
			Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)	Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)
0.0-10	Sabbia grossolana	2.03–2.05	1808.85–1825.94	0.85–0.84	300	3.65
10.0-50.0	Sabbia/calcarenite semi-cementata	2.2	2000	0.3		
50+	Calcarenite ben cementata	2.7	2600	0.5		

### 3. Risultati

L'impatto del rumore sui mammiferi marini è stato valutato principalmente con riguardo al disturbo comportamentale; le distanze a cui specifici livelli di  $L_p$  vengono superati sono presentate in Tabella 5 e dalla Figura 12 alla Figura 16. Le mappe di sinistra non danno un senso corretto del contributo acustico delle operazioni in quanto non tengono conto del rumore di sottofondo. È dunque più appropriato presentare gli stessi dati come livelli di eccedenza rispetto al livello di sottofondo, come nelle mappe di destra (Figura 12 e Figura 13). I risultati sono discussi nella Sezione 4 nel contesto delle soglie comportamentali identificate per i diversi gruppi uditivi da Borsani and Farchi (2011) e nel più recente studio di Gomez et al. (2016). Le distanze di impatto sono presentate in termini del livello sonoro massimizzato su tutte le profondità, tanto come distanza massima ( $R_{max}$ ) che come  $R_{95\%}$ ; quest'ultima è generalmente più rappresentativa della distribuzione planare dei livelli.

Le mappe mostrano che la propagazione, sebbene circolarmente simmetrica in prossimità della sorgente, dopo una certa distanza (~20km) avviene in una direzione preferenziale, cioè verso nord-ovest e sud-est seguendo la costa della Puglia. Le sezioni trasversali mostrano una graduale diminuzione del suono con l'incrementare della distanza dalla sorgente, lungo tutta la colonna d'acqua (Figura 13, Figura 15 e Figura 16).

L'attività che presenta le maggiori distanze d'impatto comportamentale appare essere la perforazione, come previsto, dati i livelli di sorgente elevati rispetto a quelli degli aerogeneratori operativi. Inaspettatamente, la modellizzazione eseguita per le turbine operative individuali (sito 1 e 2) mostra che le distanze d'impatto non ponderate sono di qualche metro più lunghe per il sito 1, che è meno profondo (Tabella 5). Inoltre, per il parco eolico in esercizio con tutte le turbine attive, il suono sembra accumularsi particolarmente lungo le file dove sono presenti quattro turbine (Figura 14).

La distanza di impatto comportamentale  $R_{95\%}$  variano dai 37.4 km durante la fase di costruzione ai 50m durante la fase di esercizio del parco eolico intero per  $L_p$  di 120 dB re 1  $\mu$ Pa, soglia di eccedenza per tutti i gruppi uditivi secondo ACCOBAMS (2013). Per  $L_p$  di 110 dB re 1  $\mu$ Pa, limite inferiore della soglia comportamentale per i cetacei a media frequenza secondo Borsani and Farchi (2011), le distanze  $R_{95\%}$  eccedono il dominio della modellizzazione per la fase di costruzione rimangono sotto il km per la fase di esercizio. Per il limite inferiore della soglia dei cetacei a bassa frequenza di Borsani and Farchi (2011), pari a 100dB, le distanze eccedono il dominio della modellizzazione per la fase di costruzione e di conseguenza i valori di  $R_{95\%}$  riportati nella Tabella 5 non sono accurati, mentre rimangono entro i 5km durante la fase di esercizio. Dato che, come verrà discusso nella prossima sezione, il valore di 100-120 dB re 1  $\mu$ Pa di sottofondo, appare inutile estendere la modellizzazione per tracciarne interamente i contorni.

Per completezza, l'impatto cumulativo delle attività di costruzione e operazione con riferimento alle soglie di insorgenza di PTS e TTS in base a Southall et al. (2019) sono state calcolate per determinare le distanze a cui sussiste il rischio di questi danni fisici ai mammiferi marini. I risultati tabulati per queste soglie sono presentati nella Tabella 6 per i gruppi uditivi potenzialmente presenti nell'area di studio. Come spiegato nei metodi, queste soglie sono calcolate sui livelli ponderati per le frequenze a secondo del gruppo uditivo dei cetacei e accumulati per le durate delle operazioni effettive assumendo che i ricevitori (animali esposti al rumore) rimangano statici per la durata delle attività. È stata considerato un periodo di accumulazione di 24 ore in linea con Southall et al. (2019) anche se non è realistico che gli animali rimangano nella zona esposta per un lasso di tempo così lungo.

Dati questi presupposti, i risultati associano i maggiori raggi di impatto ai cetacei di bassa frequenza visto che le frequenze generate sono principalmente basse.

Tabella 5. Distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini. Il simbolo '-' indica che il livello è minore del livello di sorgente, '<0.02' indica che la soglia non viene ecceduta, e '>80' indica che la distanza eccede il dominio del modello.

L <sub>p</sub> non ponderato (dB re 1 µPa)	Costruzione - Perforazione		Operazione - Sito 1		Operazione - Sito 2		Operazione - parco eolico	
	R <sub>max</sub> (km)	R <sub>95</sub> (km)	R <sub>max</sub> (km)	R <sub>95</sub> (km)	R <sub>max</sub> (km)	R <sub>95</sub> (km)	R <sub>max</sub> (km)	R <sub>95</sub> (km)
170	<0.02	<0.02	-	-	-	-	-	-
160	0.06	0.06	-	-	-	-	-	-
150	0.21	0.21	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
140	1.25	1.12	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.02	0.02
130	6.58	6.16	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.02
120 <sup>1</sup>	37.43	29.38	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.05
110 <sup>2</sup>	>80.00 <sup>4</sup>	>80.00 <sup>4</sup>	0.29	0.28	0.29	0.28	0.76	0.67
100 <sup>3</sup>	>80.00 <sup>4</sup>	>80.00 <sup>4</sup>	1.28	1.31	1.21	1.15	5.82	4.72

<sup>1</sup>: soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale per tutti i gruppi uditivi esposti a rumore continuo secondo ACCOBAMS (2013).

<sup>2</sup>: soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di alta frequenza (riferita come media frequenza in (Borsani and Farchi 2011)).

<sup>3</sup>: soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di bassa frequenza (Borsani and Farchi 2011).

<sup>4</sup>: L'isopleta riportata si estende oltre i limiti di modellazione. L'R<sub>max</sub> effettivo potrebbe quindi essere maggiore di quello riportato e l'R<sub>95</sub> riportato potrebbe non essere rappresentativo.

Tabella 6. Distanze corrispondenti alle soglie di PTS e TTS per i diversi gruppi uditivi di mammiferi marini. Il simbolo '-' indica che la soglia non viene raggiunta.

SEL ponderato			Costruzione - Perforazione		Operazione - Sito 1		Operazione - Sito 2		Operazione - parco eolico	
(dB re 1 $\mu\text{Pa}^2\text{s}$ )			$R_{\text{max}}$ (km)	$R_{95}$ (km)	$R_{\text{max}}$ (km)	$R_{95}$ (km)	$R_{\text{max}}$ (km)	$R_{95}$ (km)	$R_{\text{max}}$ (km)	$R_{95}$ (km)
Cetacei LF	PTS	199	0.134	0.134	-	-	-	-	-	-
	TTS	179	5.33	4.85	-	-	-	-	0.028	0.022
Cetacei HF o MF in	PTS	198	-	-	-	-	-	-	-	-
	TTS	178	0.128	0.128	-	-	-	-	-	-
Pinnipedi in acqua	PTS	201	0.04	0.04	-	-	-	-	-	-
	TTS	181	0.753	0.715	-	-	-	-	0.022	0.019

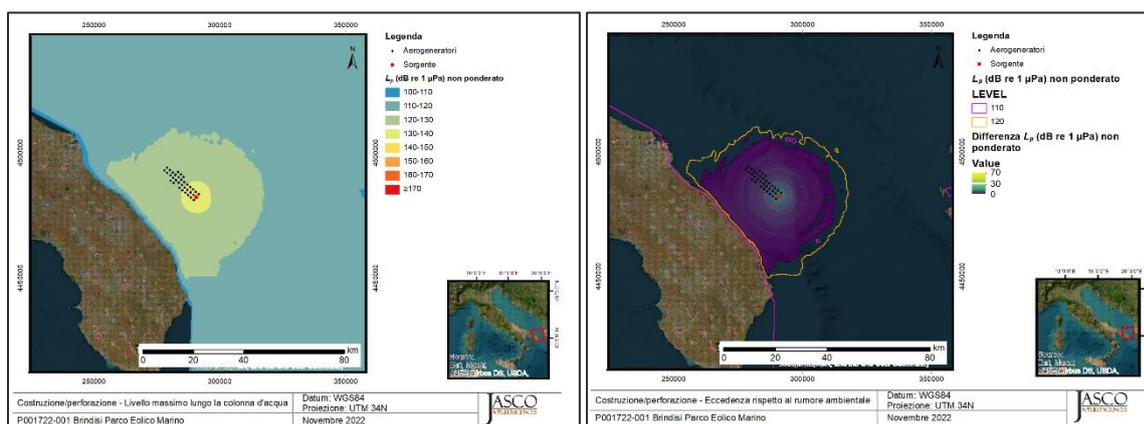


Figura 12. Costruzione: mappa che mostra la distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini (sinistra) e gli stessi dati presentati come eccedenza rispetto al rumore di fondo (a destra).

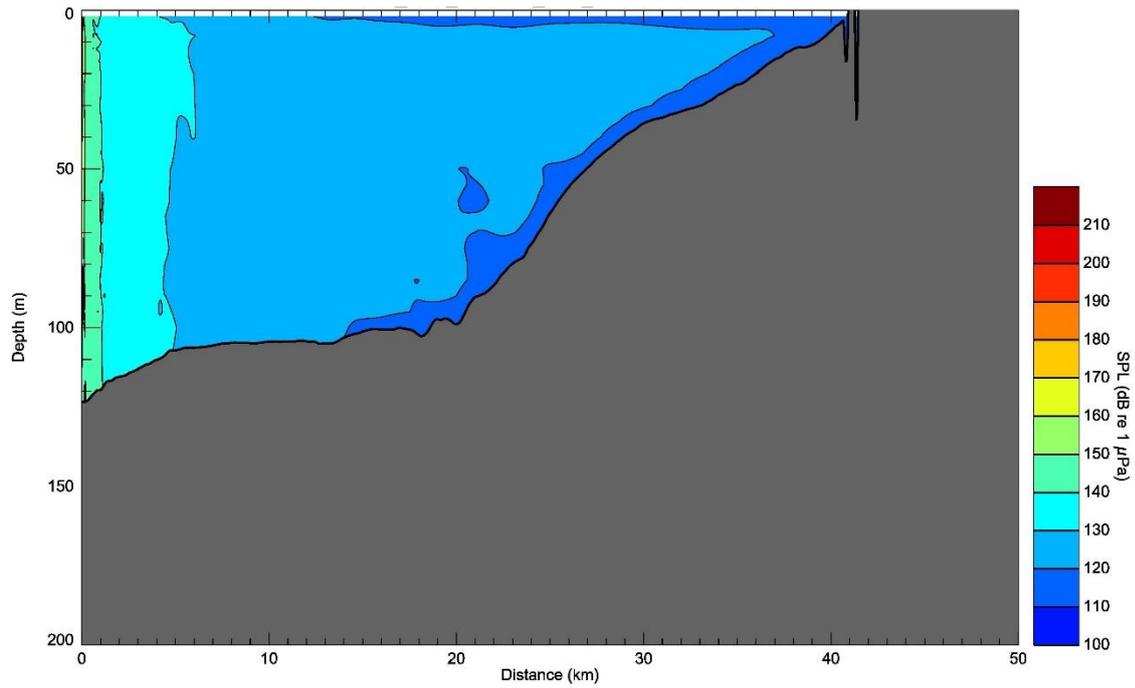


Figura 13. Costruzione: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2).

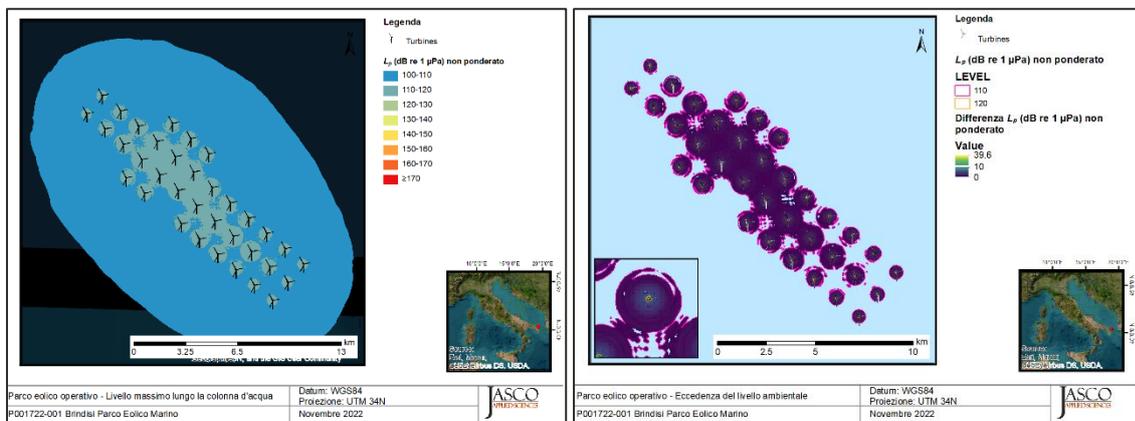


Figura 14. Intero parco operativo: mappa che mostra la distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini (sinistra) e gli stessi dati presentati come eccedenza rispetto al rumore di fondo (a destra).

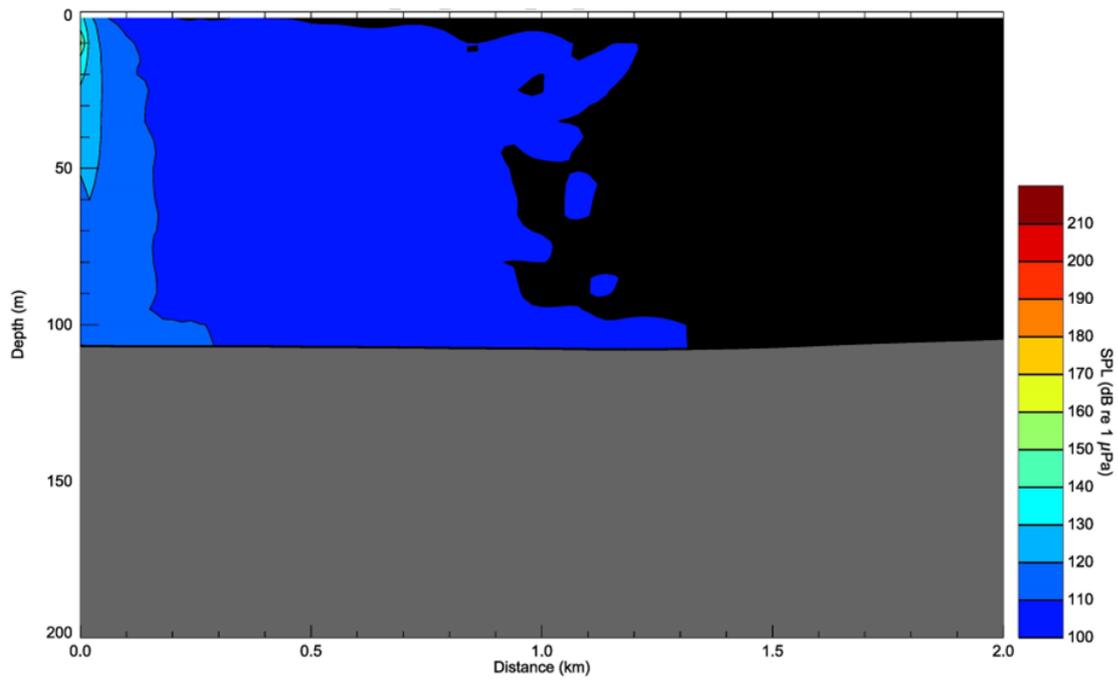


Figura 15. Aerogeneratore operativo - Sito 2: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2).

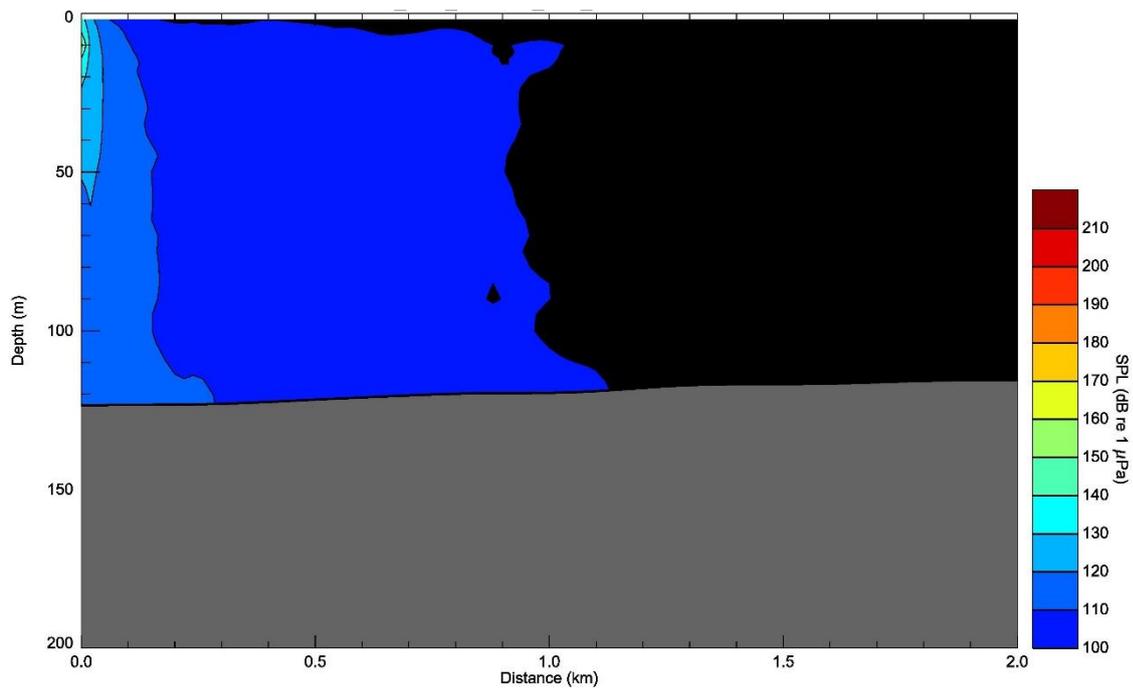


Figura 16. Aerogeneratore operativo - Sito 2: sezione trasversale (azimut 285°) che mostra il livello di pressione sonora ogni 10 dB lungo il transetto di maggiore propagazione del suono subacqueo fino a 50km dalla sorgente (sito 2).

## 4. Discussione e Conclusioni

Lo scopo del presente studio è stato di definire i livelli di sorgente associati con le attività più rumorose previste per le diverse fasi del progetto del parco eolico galleggiate offshore di Brindisi e modellizzare le distanze di potenziale impatto sui mammiferi marini.

Le due attività selezionate per la modellizzazione sono state l'installazione delle ancore degli aerogeneratori (fase di costruzione) e l'operazione regolare degli aerogeneratori durante l'esercizio del parco eolico. La definizione dei livelli di sorgente è stata complessa in quanto la soluzione ingegneristica non è ancora del tutto definita; inoltre, la letteratura disponibile sull'argomento è estremamente limitata a poche misurazioni, la maggior parte delle quali effettuate in acque poco profonde. Pertanto, numerosi presupposti sono stati considerati in questo studio in base alle informazioni attualmente disponibili. La validità della modellizzazione è soggetta alla validità di tali presupposti.

Per quanto riguarda la fase di costruzione, si ritiene che la sorgente selezionata come proxy sia particolarmente cautelativa in quanto fa riferimento a scavi per installazione di ancora di 6m di diametro mentre si presume che le ancore delle turbine galleggianti per questo Progetto siano di diametro inferiore. Non è però possibile scalare i livelli di sorgente per la dimensione delle ancorate selezionate. Il modello inoltre considera che il ricevitore, cioè un animale esposto alla sorgente rumorosa, rimanga statico per 12 ore consecutive nell'area esposta. Questo non è veritiero rispetto al comportamento dei mammiferi marini considerando anche che utilizzano il loro ambiente in tre dimensioni.

Per entrambe le operazioni modellizzate, è stato riscontrato che la perdita di propagazione è congrua alla teoria in quanto i livelli diminuiscono con la distanza della sorgente; si nota però che le distanze d'impatto per il sito 1 che è meno profondo sono leggermente più lunghe rispetto a quelle riscontrate per il sito 2. I due siti sono rappresentati dagli stessi input per quanto riguarda i livelli di sorgente, la geoacustica e la profondità della sorgente. Le uniche variabili sono la profondità dell'acqua e la posizione geografica. Generalmente le basse frequenze si propagano a maggiore distanza in acque più profonde. Sebbene, la differenza fra i due siti sia soltanto di 20 metri di profondità, questo effetto potrebbe essere spiegato dal fatto che il sito 2 è localizzato nella parte sud-est del parco eolico dove la batimetria mostra un aumento di profondità graduale. La maggiore perdita di trasmissione potrebbe essere in parte dovuta al maggiore volume d'acqua in cui l'energia acustica si diffonde nella profondità aumentante, e in parte alla perdita di dispersione nella riflessione sul fondo.

Il rumore sottomarino associato con lo scavo per l'installazione delle ancore ha il potenziale di comportare disturbo a tutte le specie di mammiferi marini presenti nell'area. Questa attività sarà di breve durata rispetto alla vita del parco eolico, incentrata nei mesi previsti per l'installazione. Bisogna inoltre considerare che la modellizzazione è stata effettuata per il mese di febbraio, un profilo particolarmente favorevole alla propagazione del suono rappresentate quindi lo scenario più cautelativo dal punto di vista della stima degli impatti. Un efficace mitigazione per questa attività potrebbe riscontrarsi nell'esecuzione dei lavori in periodi meno favorevoli alla propagazione del suono.

Il rumore sottomarino operativo è leggermente superiore al suono ambientale per le turbine individuali e il parco complessivo; tuttavia, i livelli sonori scendono ai livelli ambientali (cioè al di sotto  $L_p$  di 121 dB re 1 $\mu$ Pa) entro pochi metri dalla sorgente. Inoltre, entro meno di 1 km dalla turbina i livelli scendono ulteriormente di 10 dB. Questi risultati sono coerenti con quanto riportato in altri studi (Kraus et al. 2016, HDR 2019). A causa di questi livelli sonori inferiori, è improbabile che anche altra fauna marina come tartarughe e pesci rilevino i suoni generati dagli aerogeneratori a grandi distanze dal progetto in presenza di suoni ambientali. Pertanto, queste specie corrono un rischio molto basso di esposizione a causa del rumore durante la fase operativa. Eventuali cambiamenti

comportamentali causati dall'esposizione ai suoni subacquei dovrebbero essere a breve termine e localizzati in aree limitrofe agli aerogeneratori. Una limitazione della modellizzazione effettuata è il fatto che i livelli di sorgente non siano stati adattati alle caratteristiche delle turbine; ad esempio, è noto che i toni a basse frequenze siano correlati alle caratteristiche della turbina, come il numero di poli del generatore e il numero di rotazioni, o le caratteristiche delle pompe per le zavorre. Dato che poche misure sono disponibili su questi sistemi galleggianti, nessuna delle quali è esattamente comparabile, e data la presenza di molteplici sorgenti, non è possibile definire con affidabilità uno spettro dei livelli di sorgente basandosi solo sugli input ingegneristici. Pertanto, le misurazioni sul campo di sistemi simili sono state ritenute il proxy migliore per questo tipo di sorgente. Sebbene, la soluzione di ancoraggio possa essere differente, lo studio condotto presso Hywind Scotland (Burns et al. 2022) ha dimostrato che non è possibile predire il segnale caratteristico di un sistema di ancoraggio che invece può variare da turbina a turbina, né il livello assoluto, che comunque è di minore entità rispetto al rumore tonale continuo.

I livelli sonori ambientali possono influenzare il modo in cui i pesci rilevano altri suoni, e un cambiamento nel rumore di fondo potrebbe alterare il modo in cui i pesci percepiscono e reagiscono agli stimoli biologici (Popper and Fay 1993). L'attuale comprensione è che il rumore sottomarino generato dal funzionamento degli aerogeneratori è di importanza limitata per i pesci (Wahlberg and Westerberg 2005, Stenberg et al. 2015). Si prevede che i rischi di rumore sottomarino per i pesci associati al funzionamento del WTG siano bassi. Inoltre, la presenza di aerogeneratori ed un'eventuale restrizione dell'area alla pesca possono comportare effetti positivi per la proliferazione di pesci e altre specie marine (Langhamer 2012, Callahan and Jackson 2015).

## Glossario

Se non diversamente indicato in una voce, queste definizioni sono coerenti con ISO 80000-3 (2017).

### 1/3-ottava

Un terzo di **ottava**. *Nota:* un terzo di ottava è approssimativamente uguale a un **decidecade** ( $1/3 \text{ oct} \approx 1.003 \text{ ddec}$ ).

### 1/3-banda-di-ottava

Banda di **frequenza** la cui **larghezza di banda** è un **1/3-ottava**. *Nota:* la larghezza di banda di una banda di un terzo d'**ottava** aumenta con l'aumento della frequenza centrale.

### 90%-energia nella finestra temporale

L'intervallo di tempo durante il quale l'energia cumulativa aumenta dal 5 al 95% dell'energia totale dell'impulso. Questo intervallo contiene il 90% dell'energia totale dell'impulso. Unità: secondo (s).  
Simbolo:  $T_{90}$ .

### 90% livello di pressione sonora (90% SPL)

Il **livello di pressione sonora** calcolato sulla **90%-energia nella finestra temporale** di un impulso.

### armonica

Componente sonora sinusoidale che ha una **frequenza** che è un multiplo intero della frequenza di un suono a cui è correlato. Ad esempio, la seconda armonica di un suono ha una frequenza doppia della frequenza fondamentale del suono.

### assorbimento

La riduzione dell'ampiezza della **pressione sonora** dovuta all'energia del movimento delle particelle acustiche che si converte in calore nel mezzo di propagazione.

### attenuazione

La graduale perdita di energia acustica per **assorbimento** e diffusione mentre il suono si propaga attraverso un mezzo.

### banda di decidecade

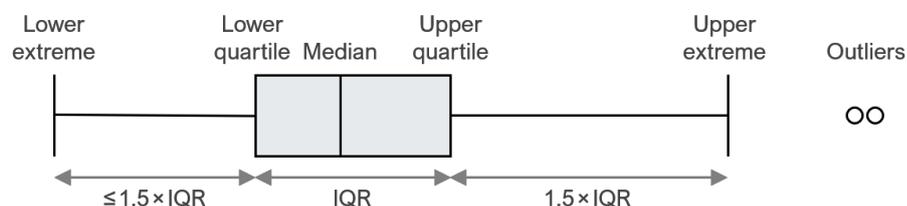
Banda di **frequenza** la cui larghezza è un decimo. *Nota:* la larghezza di una banda di **decidecade** aumenta con l'aumentare della frequenza centrale.

### bar

Unità di pressione pari a 100 kPa, che è approssimativamente uguale alla pressione atmosferica sulla Terra al livello del mare. 1 bar è uguale a 10<sup>5</sup> Pa o 10<sup>11</sup> μPa.

### box-and-whisker grafico

Un grafico di dati statistici che illustra il centro, la diffusione e la gamma complessiva di dati da un riepilogo visivo di 5 numeri. Il riquadro è l'intervallo interquartile (IQR), che mostra il 50% centrale dei dati, dal quartile inferiore (25esimo percentile) al quartile superiore (75esimo percentile). La linea all'interno della casella è la mediana (50° percentile). I baffi mostrano gli estremi inferiore e superiore esclusi i valori anomali, che sono punti dati che cadono più di  $1,5 \times \text{IQR}$  oltre i quartili superiore e inferiore.



### campo sonoro

Regione contenente onde sonore.

### cavitazione

Una rapida formazione e collasso di cavità di vapore (cioè bolle o vuoti) nell'acqua, il più delle volte causati da un rapido cambiamento di pressione. Le eliche delle navi a rotazione rapida in genere causano la cavitazione, che crea molto rumore.

### cetaceo

Un animale nell'ordine Cetacea. Queste sono specie acquatiche e includono balene, delfini e focene.

### conductivity-temperature-depth (CTD)

Dati di misurazione della conduttività, della temperatura e della profondità dell'oceano; utilizzato per calcolare [profilo di velocità del suono](#) e la salinità.

### contorno di uguale volume

Curva che mostra, in funzione della [frequenza](#), il [livello di pressione sonora](#) necessario per produrre un dato volume per un ascoltatore con udito normale, ascoltando un determinato tipo di suono in un modo specificato (ANSI S1.1-2013).

### decade

Intervallo di [frequenza](#) logaritmico il cui limite superiore è dieci volte maggiore del suo limite inferiore (ISO 80000-3:2006).

### decibel (dB)

Unità di [livello](#) utilizzata per esprimere il rapporto tra un valore di una grandezza di potenza e un altro su scala logaritmica.

### decidecade

Un decimo di [decade](#). Una decidecade è approssimativamente uguale a un terzo di [ottava](#) ( $1 \text{ ddec} \approx 0,3322 \text{ ott}$ ) e per questo motivo viene talvolta chiamato "[1/3-ottava](#)".

### energia livello di sorgente

Proprietà di una sorgente sonora ottenuta sommando al [livello di esposizione sonora](#) misurato nel [far field](#) la [propagation loss](#) dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento:  $1 \mu\text{Pa}^2 \text{m}^2 \text{s}$ .

### energie densità spettrale

Rapporto tra energia (quadrato integrato nel tempo di una variabile di campo specificata) e **larghezza di banda** in una banda di **frequenza** specificata da  $f_1$  a  $f_2$ . In forma di equazione, la densità spettrale di energia  $E_f$  è data da:  $E_f = 2 \int_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2 df / f_2 - f_1$ , dove  $X(f)$  è la trasformata di Fourier della variabile  $x(t)$ :  $X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-2\pi i f t) dt$ .

La variabile  $x(t)$  è una quantità scalare, come la **pressione sonora**. Può anche essere la grandezza o un componente specificato di una quantità vettoriale come lo spostamento delle particelle sonore, la velocità delle particelle sonore o l'accelerazione delle particelle sonore. L'unità di densità spettrale di energia dipende dalla natura di  $x$ , come segue:

- Se  $x$  = pressione sonora: Pa<sup>2</sup> s/Hz
- Se  $x$  = spostamento delle particelle sonore: m<sup>2</sup> s/Hz
- Se  $x$  = velocità delle particelle sonore: (m/s)<sup>2</sup> s/Hz
- Se  $x$  = accelerazione delle particelle sonore: (m/s<sup>2</sup>)<sup>2</sup> s/Hz

*Nota:* Il fattore due a destra dell'equazione per  $E_f$  è necessario per esprimere uno **spettro** simmetrico rispetto a  $f = 0$ , solo in termini di frequenze positive. Vedi voce 3.1.3.9 of ISO 18405 (2017).

### esposizione sonora

Integrale temporale della **pressione sonora** al quadrato in un intervallo di tempo stabilito. L'intervallo di tempo può essere una durata specificata (ad es. 24 ore) o dall'inizio alla fine di un evento specificato (ad es. un colpo di palo, un impulso di fucile ad aria compressa, un'operazione di costruzione).

Unità: pascal al quadrato secondo (Pa<sup>2</sup> s). Simbolo:  $E$ .

### far field

La zona in cui, ad un osservatore, il suono proveniente da una serie di sorgenti (o una sorgente distribuita nello spazio) sembra irradiarsi da un singolo punto.

### focidi

Un termine comune usato per descrivere tutti i membri della famiglia Phocidae. Queste foche vere/senza orecchie sono più adatte alla vita in acqua rispetto agli **otaridi**, che hanno adattamenti più terrestri. I focidi usano le pinne posteriori per spingersi. I focidi sono uno dei tre gruppi principali della superfamiglia Pinnipedia; gli altri due gruppi sono **otaridi** e trichechi.

### frequenza

La velocità di oscillazione di una funzione periodica misurata in cicli per unità di tempo. Il reciproco del periodo. Unità: **hertz (Hz)**. Simbolo:  $f$ . 1 Hz è uguale a 1 ciclo al secondo.

### funzione di ponderazione della frequenza

L'ampiezza al quadrato della funzione di trasferimento della **pressione sonora**. Per il suono di una data **frequenza**, la funzione di ponderazione della frequenza è il rapporto tra la potenza in uscita e la potenza in ingresso di un filtro specificato, talvolta espresso in decibel. Gli esempi includono quanto segue:

- *Funzione di ponderazione della frequenza uditiva:* funzione di ponderazione della frequenza compensativa che tiene conto della sensibilità uditiva specifica della frequenza di una specie (o di un **gruppo uditivo** funzionale).
- *Funzione di ponderazione della frequenza del sistema:* funzione di ponderazione della frequenza che descrive la sensibilità di un sistema di acquisizione acustica, tipicamente costituito da un idrofono, uno o più amplificatori e un convertitore analogico-digitale.

### **funzione di ponderazione della frequenza uditiva**

Funzione di ponderazione della frequenza che descrive un approccio compensatorio che tiene conto della sensibilità uditiva specifica della **frequenza** di una specie (o di un **gruppo uditivo** funzionale).

### **geoacustica**

Relativo alle proprietà acustiche del fondale marino.

### **gruppo uditivo**

Categoria di specie animali se classificate in base alla loro sensibilità uditiva e alla suscettibilità al suono. Esempi di mammiferi marini includono cetacei a frequenza molto bassa (VLF), cetacei a bassa frequenza (LF), cetacei a media frequenza (MF), cetacei ad alta frequenza (HF), cetacei ad altissima frequenza (VHF), pinnipedi otaridi in acqua (OPW), pinnipedi focidi in acqua (PPW), sireniani (SI), altri carnivori marini nell'aria (OCA) e altri carnivori marini nell'acqua (OCW) (NMFS 2018, Southall et al. 2019). Vedi **funzione di ponderazione della frequenza**, che sono spesso applicate a questi gruppi. Esempi di pesci includono specie per le quali la vescica natatoria è coinvolta nell'udito, specie per le quali la vescica natatoria non è coinvolta nell'udito e specie senza vescica natatoria (Popper et al. 2014).

### **hertz (Hz)**

Un'unità di **frequenza** definita come un ciclo al secondo.

### **high-frequency (HF) cetaceans**

Vedi **gruppo uditivo**.

### **idrofono**

Un trasduttore di **pressione sonora** subacqueo. Un dispositivo elettronico passivo per la registrazione o l'ascolto del suono subacqueo.

### **impedenza acustica**

Il rapporto tra la **pressione sonora** in un mezzo e la portata in volume del mezzo attraverso una superficie specificata a causa dell'onda sonora.

### **insonificato**

Esposto a un suono.

### **intensità sonora**

Prodotto della **pressione sonora** e della velocità delle particelle sonore. La grandezza dell'intensità sonora è l'energia sonora che fluisce attraverso un'area unitaria perpendicolare alla direzione di propagazione per unità di tempo. Unità: watt per metro quadrato ( $W/m^2$ ). Simbolo: *I*.

### **isopleto**

Una linea tracciata su una mappa attraverso tutti i punti aventi lo stesso valore di una certa quantità.

### **larghezza di banda**

Un intervallo all'interno di una banda continua di frequenze. Unità: **hertz (Hz)**.

### **livello**

Una misura di una quantità espressa come logaritmo del rapporto tra la quantità e un valore di riferimento specificato di quella quantità. Ad esempio, un valore del **livello di pressione sonora** con riferimento a  $1 \mu Pa^2$  può essere scritto nella forma  $x \text{ dB re } 1 \mu Pa^2$ .

**livello a banda larga**

Il **livello** totale misurato su un intervallo di **frequenza** specificato.

**livello di esposizione sonora (SEL)**

Il **livello** ( $L_E$ ) dell'**esposizione sonora** ( $E$ ) in una determinata banda di **frequenza** e finestra temporale:  $L_E = 10 \log_{10}(E/E_0)$ . Unità: decibel (dB). Valore di riferimento ( $E_0$ ) per il suono in acqua:  $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ .

**livello di pressione sonora (SPL), rms sound pressure level**

Il **livello** ( $L_p$ ) della **pressione sonora** quadratica media del tempo ( $p_{\text{rms}}^2$ ) in una determinata banda di **frequenza** e finestra temporale:  $L_p = 10 \log_{10}(p_{\text{rms}}^2/p_0^2) = 20 \log_{10}(p_{\text{rms}}/p_0)$ , dove rms è l'abbreviazione di root-mean-square. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento ( $p_0^2$ ) per il suono in acqua:  $1 \mu\text{Pa}^2$ .

**livello di sorgente di densità spettrale di energia**

Proprietà di una sorgente sonora uguale al **livello** di **energie densità spettrale** della **pressione sonora** misurata nel **far field** più la **propagation loss** dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento:  $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ m}^2 \text{ s/Hz}$ .

**livello di sorgente, source level (SL)**

Proprietà di una sorgente sonora uguale al **livello** di **pressione sonora** misurato nel **far field** più la **propagation loss** dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento:  $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ m}^2$ .

**livello ricevuto**

Il **livello** di una data variabile di campo misurato (o che verrebbe misurato) in una posizione definita.

**low-frequency (LF) cetaceans**

Vedi gruppo uditivo.

**lunghezza d'onda**

Distanza sulla quale un'onda completa un ciclo di oscillazione. Unità: metro (m). Simbolo:  $\lambda$ .

**mascheramento**

Oscuramento di suoni di interesse da suoni a frequenze simili.

**mediana**

Il 50° percentile di una distribuzione statistica.

**mid-frequency (MF) cetaceans**

Vedi gruppo uditivo.

**misticete**

Un sottordine di cetacei che utilizzano fanoni per filtrare il cibo dall'acqua. I membri di questo gruppo includono rorquali (*Balaenopteridae*), balene franche (*Balaenidae*) e balene grigie (*Eschrichtius robustus*).

**M-weighting**

Un insieme di **funzione di ponderazione della frequenza uditiva** proposte da Southall et al. (2007).

**nodo (kn)**

Un miglio nautico all'ora.

**non ponderato**

Termine che indica che non viene applicata alcuna [funzione di ponderazione della frequenza](#).

**odontocete**

La presenza dei denti, anziché dei fanoni, caratterizza queste balene. I membri degli Odontoceti sono un sottordine di cetacei, un gruppo composto da balene, delfini e focene. I crani delle balene dentate sono per lo più asimmetrici, un adattamento per la loro ecolocalizzazione. Questo gruppo comprende capodogli, orche, beluga, narvali, delfini e focene.

**onda compressionale**

Un'onda di vibrazione meccanica in cui la direzione del movimento delle particelle è parallela alla direzione di propagazione. Chiamata anche onda primaria o onda P. Le [onda di taglio](#) nel fondo del mare possono essere convertite in onda compressionale nell'acqua all'interfaccia acqua-fondale.

**onda di taglio**

Un'onda di vibrazione meccanica in cui la direzione del movimento delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione. Chiamata anche onda secondaria o onda S. Le onde di taglio si propagano solo in mezzi solidi, come sedimenti o roccia. Le onde di taglio nel fondo del mare possono essere convertite in [onda compressionale](#) nell'acqua all'interfaccia acqua-fondale.

**otaridi**

Un termine comune usato per descrivere i membri degli Otariidae, foche dalle orecchie, comunemente chiamate leoni marini e otarie da pelliccia. Gli otaridi sono adattati a una vita semiacquatica; usano le loro grandi pinne anteriori per la propulsione. Le loro orecchie li distinguono dai [focidi](#). Gli otaridi sono uno dei tre gruppi principali della superfamiglia Pinnipedia; gli altri due gruppi sono [focidi](#) e trichechi.

**otariid pinnipeds in water (OW)**

Vedi [gruppo uditivo](#).

**other marine carnivores in air (OCA)**

Vedi [gruppo uditivo](#).

**other marine carnivores in water (OCW)**

Vedi [gruppo uditivo](#).

**ottava**

L'intervallo tra un suono e un altro suono con doppia o metà della [frequenza](#). Ad esempio, un'ottava sopra i 200 Hz è 400 Hz e un'ottava sotto i 200 Hz è 100 Hz.

**permanent threshold shift (PTS)**

Una perdita irreversibile della sensibilità uditiva causata da un'eccessiva esposizione al rumore. La PTS è considerata una lesione uditiva. Paragonare a [temporary threshold shift](#).

**phocid pinnipeds in water (PW)**

Vedi [gruppo uditivo](#).

### **pinnipede**

Un termine comune usato per descrivere tutti e tre i gruppi che formano la superfamiglia Pinnipedia: **focidi** (veri foche o foche senza orecchie), **otaridi** (foche dalle orecchie o foche e leoni marini) e **trichechi**.

### **ponderazione della frequenza uditiva**

Il processo di applicazione di una **funzione di ponderazione della frequenza uditiva**. Nell'audiometria umana, la ponderazione C è la funzione più comunemente utilizzata, un esempio per i mammiferi marini sono le funzioni di ponderazione della frequenza uditiva pubblicate da Southall et al. (2007).

### **ponderazione in frequenza**

Il processo di applicazione di una **funzione di ponderazione della frequenza**.

### **pressione sonora**

Il contributo alla pressione totale causato dall'azione del suono. Unità: pascal (Pa). Simbolo: *p*.

### **pressione, acustica**

La deviazione dalla pressione ambiente causata da un'onda sonora. Chiamato anche **pressione sonora**. Unità: pascal (Pa).

### **pressione, idrostatica**

La pressione a una data profondità in un liquido statico che è il risultato del peso del liquido che agisce su un'area unitaria a quella profondità, più qualsiasi pressione che agisce sulla superficie del liquido. Unità: pascal (Pa).

### **profilo di velocità del suono**

La velocità del suono nella colonna d'acqua in funzione della profondità al di sotto della superficie dell'acqua.

### **propagation loss (PL)**

Differenza fra un **livello di sorgente** (SL) e il **livello** in un luogo specificato,  $PL(x) = SL - L(x)$ . Unità: decibel (dB). Vedi anche **transmission loss**.

### **rilevamento automatico**

L'output di un **rilevatore automatizzato**.

### **rilevatore automatizzato**

Un algoritmo che include sia il **rilevamento automatico** di un suono di interesse in base a come si distingue dallo sfondo, sia la sua classificazione automatizzata basata sulle somiglianze con i modelli in una libreria di segnali di riferimento.

### **rumore acustico**

Suono che interferisce con un processo acustico.

### **rumore di sottofondo**

Combinazione di **suono di sottofondo**, self-noise acustico e riverbero del sonar. Il suono di sottofondo rilevato, misurato o registrato con un segnale fa parte del rumore di fondo.

**self-noise acustico**

Suono in un ricevitore causato dall'installazione, dal funzionamento o dal ripristino di un ricevitore specifico e dalla sua piattaforma associata.

**sorgente puntiforme**

Una sorgente che irradia il suono come da un unico punto.

**suono di sottofondo**

Suono che sarebbe presente in assenza di un'attività specifica, di solito un composto di suoni provenienti da molte fonti vicine e lontane, ad esempio navi da trasporto, attività sismica, precipitazioni, movimento del ghiaccio marino, azione delle onde e attività biologica.

**spettro**

Un segnale acustico rappresentato in termini di potenza, energia, **pressione sonora** quadratica media o distribuzione dell'**esposizione sonora** con la **frequenza**.

**spettrogramma**

Una rappresentazione visiva dell'ampiezza acustica rispetto al tempo e alla **frequenza**.

**suono**

Un disturbo variabile nel tempo nella pressione, nella sollecitazione o nello spostamento del materiale di un mezzo propagato dalla compressione e dall'espansione locali del mezzo.

**suono continuo**

Un suono il cui **livello di pressione sonora** rimane al di sopra del **rumore di sottofondo** durante il periodo di osservazione. Un suono che varia gradualmente di intensità nel tempo, ad esempio il suono di una nave marina.

**suono impulsivo**

Termine qualitativo che indica suoni che sono tipicamente transitori, brevi (meno di 1 secondo), a banda larga, con tempi di salita e decadimento rapidi. Possono verificarsi in ripetizione o come un singolo evento. Esempi di sorgenti sonore impulsive includono esplosivi, fucili ad aria compressa sismici e battipalo a impatto.

**suono intermittente**

Un suono il cui **livello** scende bruscamente al di sotto del livello del **rumore di sottofondo** più volte durante un periodo di osservazione.

**suono non impulsivo**

Suono che non è un **suono di sottofondo**. Un suono non impulsivo non è necessariamente un **suono continuo**.

**temporary threshold shift (TTS)**

Perdita reversibile della sensibilità uditiva. Il TTS può essere causato dall'esposizione al rumore. Paragonare a **permanent threshold shift**.

**termoclino**

Un intervallo di profondità vicino alla superficie dell'oceano che subisce gradienti di temperatura maggiori rispetto agli strati sopra e sotto di essa dovuti al riscaldamento o al raffreddamento per conduzione di calore dall'atmosfera e dal riscaldamento dal sole.

**transmission loss (TL)**

La differenza tra un **livello** specificato in una posizione e quello in una posizione diversa:  $TL(x_1, x_2) = L(x_1) - L(x_2)$ . Unità: decibel (dB). Vedi anche **propagation loss**.

**trasforme di Fourier (or sintesi di Fourier)**

Una tecnica matematica che, sebbene abbia svariate applicazioni, viene citata nel contesto di questo rapporto come metodo utilizzato nel processo di derivazione di una stima dello spettro da dati di serie temporali (o il processo inverso, chiamato trasformata di Fourier inversa). Un algoritmo numerico efficiente dal punto di vista computazionale per il calcolo della trasformata di Fourier è noto come trasformata di Fourier veloce (FFT).

**very high-frequency (VHF) cetaceans**

Vedi gruppo uditivo.

**very low-frequency (VLF) cetaceans**

Vedi gruppo uditivo.

## Letteratura Citata

- [ACCOBAMS] Agreement for the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area and [CMS] The Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals. 2013. *Anthropogenic noise and marine mammals: Review of the effort in addressing the impact of anthropogenic underwater noise in the ACCOBAMS and ASCOBANS areas*. Fifth Meeting of the Parties to ACCOBAMS, 5-8 Nov 2013. Document Number 22, Rev 1, Tangier. 61 p.
- [ACCOBAMS] Agreement for the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area. 2020. *Guidelines to Address the Impact of Anthropogenic Noise on Cetaceans in the ACCOBAMS Area*. 12 p. [https://accobams.org/wp-content/uploads/2020/05/GL\\_Impact\\_anthropogenic\\_noise.pdf](https://accobams.org/wp-content/uploads/2020/05/GL_Impact_anthropogenic_noise.pdf).
- [ANSI] American National Standards Institute and [ASA] Acoustical Society of America. S1.1-2013. *American National Standard: Acoustical Terminology*. NY, USA. <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ANSIASAS12013>.
- [ISO] International Organization for Standardization. 2006. *ISO 80000-3:2006 Quantities and units – Part 3: Space and time*. <https://www.iso.org/standard/31888.html>.
- [ISO] International Organization for Standardization. 2017. *ISO 18405:2017. Underwater acoustics – Terminology*. Geneva. <https://www.iso.org/standard/62406.html>.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service (US). 2018. *2018 Revision to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts*. US Department of Commerce, NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59. 167 p. [https://media.fisheries.noaa.gov/dam-migration/tech\\_memo\\_acoustic\\_guidance\\_\(20\)\\_pdf\\_508.pdf](https://media.fisheries.noaa.gov/dam-migration/tech_memo_acoustic_guidance_(20)_pdf_508.pdf).
- [NRC] National Research Council (US). 2003. *Ocean Noise and Marine Mammals*. National Research Council (US), Ocean Studies Board, Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals. The National Academies Press, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.17226/10564>.
- Abrahamsen, K. 2012. The ship as an underwater noise source. *Proceedings of Meetings on Acoustics* 17(1): 070058. <https://doi.org/10.1121/1.4772953>.
- Au, W.W.L., R.A. Kastelein, T. Rippe, and N.M. Schooneman. 1999. Transmission beam pattern and echolocation signals of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*). *Journal of the Acoustical Society of America* 106(6): 3699-3705. <https://doi.org/10.1121/1.428221>.
- Austin, M.E., D.E. Hannay, and K.C. Bröker. 2018. Acoustic characterization of exploration drilling in the Chukchi and Beaufort seas. *Journal of the Acoustical Society of America* 144: 115-123. <https://doi.org/10.1121/1.5044417>.
- Bartol, S.M., J.A. Musick, and M.L. Lenhardt. 1999. Auditory evoked potentials of the loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*). *Copeia* 3: 836-840. <https://doi.org/10.2307/1447625>.
- Bergström, L., L. Kautsky, T. Malm, R. Rosenberg, M. Wahlberg, N.Å. Capetillo, and D. Wilhelmsson. 2014. Effects of offshore wind farms on marine wildlife—A generalized impact assessment. *Environmental Research Letters* 9(3): 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034012>.
- Borsani, J.F. and C. Farchi. 2011. *Linee guida per lo studio e la regolamentazione del rumore di origine antropica introdotto in mare e nelle acque interne:: 2a Parte*. 36 p.
- Burns, R.D.J., S.B. Martin, M.A. Wood, C.C. Wilson, C.E. Lumsden, and F. Pace. 2022. *HYWIND Scotland Floating Offshore Wind Farm: Sound Source Characterisation of Operational Floating Turbines*. Document Number 02521, Version 2.0. Technical report by JASCO Applied Sciences for Equinor Energy AS.
- Callahan, E. and A. Jackson. 2015. Rigs to Reefs: Exploring the future of California's offshore oil and gas platforms. *1st International Conference on the Decommissioning and Offshore and Subsea Structures*. ASRANET limited, Glasgow, UK. pp. 76-88.

- Carnes, M.R. 2009. *Description and Evaluation of GDEM-V 3.0*. US Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS. NRL Memorandum Report 7330-09-9165. 21 p. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a494306.pdf>.
- Clark, C.W. 1990. Acoustic behaviour of mysticete whales. In Thomas, J.A. and R.A. Kastelein (eds.). *Sensory Abilities of Cetaceans*. Springer, Boston, MA. pp. 571-583. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0858-2\\_40](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0858-2_40).
- Coppens, A.B. 1981. Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. *Journal of the Acoustical Society of America* 69(3): 862-863. <https://doi.org/10.1121/1.382038>.
- Deane, G.B. 2000. Long time-base observations of surf noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 107(2): 758-770. <https://doi.org/10.1121/1.428259>.
- Diederichs, A., G. Nehls, M. Dähne, S. Adler, S. Koschinski, and U. Verfuß. 2018. *Methodologies For Measuring And Assessing Potential Changes In Marine Mammal Behaviour, Abundance Or Distribution Arising From The Construction, Operation And Decommissioning Of Offshore Windfarms*. BioConsult SH report to COWRIE Ltd. ISBN: 978-0-9557501-2-0.
- Dow Piniak, W.E., S.A. Eckert, C.A. Harms, and E.M. Stringer. 2012. *Underwater hearing sensitivity of the leatherback sea turtle (Dermochelys coriacea): Assessing the potential effect of anthropogenic noise*. US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. OCS Study BOEM 2012-00156. 35 p.
- Edds-Walton, P.L. 1997. Acoustic communication signals of mysticetes whales. *Bioacoustics* 8(1-2): 47-60. <https://doi.org/10.1080/09524622.1997.9753353>.
- EMODnet Bathymetry Consortium. 2020. *EMODnet Digital Bathymetry (DTM)* (webpage). EMODnet Bathymetry Consortium. <https://doi.org/10.12770/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6>.
- Etter, P.C. 2009. *Review of ocean-acoustic models*. OCEANS 2009, 26-29 Oct. 2009, pp. 1-6.
- European Commission. 2017. Commission Decision 2017/848/EU of 17 May 2017 laying down criteria and methodological standards on good environmental status of marine waters and specifications and standardised methods for monitoring and assessment, and repealing Decision 2010/477/EU. *Official Journal of the European Union* L125/43. <http://data.europa.eu/eli/dec/2017/848/oj>.
- Farcas, A., P.M. Thompson, and N.D. Merchant. 2016. Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>.
- Finneran, J.J. 2015. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for cetaceans and marine carnivores*. Technical report by SSC Pacific, San Diego, CA, USA.
- Finneran, J.J. 2016. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater noise*. Technical Report for Space and Naval Warfare Systems Center Pacific, San Diego, CA, USA. 49 p. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1026445.pdf>.
- Finneran, J.J., E.E. Henderson, D.S. Houser, K. Jenkins, S. Kotecki, and J. Mulsow. 2017. *Criteria and Thresholds for U.S. Navy Acoustic and Explosive Effects Analysis (Phase III)*. Technical report by Space and Naval Warfare Systems Center Pacific (SSC Pacific). 183 p. [https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/technical\\_reports/Criteria\\_and\\_Thresholds\\_for\\_U.S.\\_Navy\\_Acoustic\\_and\\_Explosive\\_Effects\\_Analysis\\_June2017.pdf](https://nwtteis.com/portals/nwtteis/files/technical_reports/Criteria_and_Thresholds_for_U.S._Navy_Acoustic_and_Explosive_Effects_Analysis_June2017.pdf).
- Fisher, F.H. and V.P. Simmons. 1977. Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America* 62(3): 558-564. <https://doi.org/10.1121/1.381574>.
- Fossati, C. 2022. Monitoraggio del rumore ambientale di fondo presso il parco eolico offshore di Brindisi.
- Gomez, C., J.W. Lawson, A.J. Wright, A.D. Buren, D.J. Tollit, and V. Lesage. 2016. A systematic review on the behavioural responses of wild marine mammals to noise: The disparity between science and policy. *Canadian Journal of Zoology* 94(12): 801-819. <https://doi.org/10.1139/cjz-2016-0098>.

- Hall, J.D. and J. Francine. 1991. Measurements of underwater sounds from a concrete island drilling structure located in the Alaskan sector of the Beaufort Sea. *Journal of the Acoustical Society of America* 90(3): 1665-1667. <https://doi.org/10.1121/1.401907>.
- HDR. 2019. *Field Observations during Wind Turbine Operations at the Block Island Wind Farm, Rhode Island*. Final Report to the U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs. OCS Study BOEM 2019-028. 281 p. [https://epis.boem.gov/final%20reports/BOEM\\_2019-028.pdf](https://epis.boem.gov/final%20reports/BOEM_2019-028.pdf).
- Kraus, S.D., S. Leiter, K. Stone, B. Wikgren, C.A. Mayo, P. Hughes, R.D. Kenney, C.W. Clark, A.N. Rice, et al. 2016. *Northeast Large Pelagic Survey Collaborative Aerial and Acoustic Surveys for Large Whales and Sea Turtles*. US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. OCS Study BOEM 2016-054, Sterling, Virginia. 117 + appendices p. <https://www.boem.gov/RI-MA-Whales-Turtles/>.
- Langhamer, O. 2012. Artificial Reef Effect in relation to Offshore Renewable Energy Conversion: State of the Art. *The Scientific World Journal* 2012: 386713. <https://doi.org/10.1100/2012/386713>.
- Lindeboom, H.J., H.J. Kouwenhoven, M.J.N. Bergman, S. Bouma, S. Brasseur, R. Daan, R.C. Fijn, D. de Haan, S. Dirksen, et al. 2011a. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environmental Research Letters* 6(3): 035101. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035101>.
- Lindeboom, H.J., H.J. Kouwenhoven, M.J.N. Bergman, S. Bouma, S. Brasseur, R. Daan, R.C. Fijn, D. de Haan, S. Dirksen, et al. 2011b. Short-term ecological effects of an offshore wind farm in the Dutch coastal zone; a compilation. *Environmental Research Letters* 6(3): 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/3/035101>.
- Madsen, P.T., M. Wahlberg, J. Tougaard, K. Lucke, and P.L. Tyack. 2006. Wind turbine underwater noise and marine mammals: Implications of current knowledge and data needs. *Marine Ecology Progress Series* 309: 279-295. <https://doi.org/10.3354/meps309279>.
- Maglio, A., G. Pavan, M. Castellote, and S. Frey. 2016. *Overview of the Noise Hotspots in the ACCOBAMS Area, Part I - Mediterranean Sea*.
- Martin, B., J. MacDonnell, J. Vallarta, E. Lumsden, and R.D.J. Burns. 2011. *HYWIND Acoustics Measurements Report. Ambient Levels and HYWIND Signature. Ver 1.3*. Document Number 00229. JASCO Applied Sciences (UK) Ltd. <https://static1.squarespace.com/static/52aa2773e4b0f29916f46675/t/5fda3a9324291a0a8b1d0a25/1608137377245/Equinor-Hywind-Acoustic-Measurement-Report-JASCO-00229-December-2011.pdf>.
- McCauley, R.D., J. Fewtrell, A.J. Duncan, C. Jenner, M.-N. Jenner, J.D. Penrose, R.I.T. Prince, A. Adhitya, J. Murdoch, et al. 2000. *Marine seismic surveys: Analysis and propagation of air-gun signals; and effects of air-gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid*. Report Number R99-15. Prepared for Australian Petroleum Production Exploration Association by Centre for Marine Science and Technology, Western Australia. 198 p. <https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/McCauley-et-al-Seismic-effects-2000.pdf>.
- Miller, J.H. and G.R. Potty. 2017. Overview of underwater acoustic and seismic measurements of the construction and operation of the Block Island Wind Farm. *Journal of the Acoustical Society of America* 141(5): 3993-3993. <https://doi.org/10.1121/1.4989144>.
- Nedwell, J.R., J. Langworthy, and D. Howell. 2003. *Assessment of Sub-Sea Acoustic Noise and Vibration from Offshore Wind Turbines and Its Impact on Marine Wildlife; Initial Measurements of Underwater Noise during Construction of Offshore Windfarms, And Comparison with Background Noise*. Document Number 544 R 0424 Report Number 544 R 0424. Report by Subacoustech Ltd. for the Crown Estates Office. 68 p. <http://www.subacoustech.com/wp-content/uploads/544R0424.pdf>.
- Nedwell, J.R. and B. Edwards. 2004. *A review of measurements of underwater man-made noise carried out by Subacoustech Ltd, 1993 – 2003*. Document Number 534R0109. Report by Subacoustech Ltd. for ChevronTexaco Ltd., TotalFinaElf Exploration UK PLC, DSTL, Department of Trade and Industry, and Shell U.K. Exploration and Production Ltd. 131 p. <http://www.subacoustech.com/information/downloads/reports/534R0109.pdf>.

- Nguyen, J.-P. 1996. *Drilling: Oil and gas field development techniques*. Balvet, B.B. (trans.). Editions TECHNIP. Institut Français du Pétrole, Paris. 384 p.
- Nieukirk, S.L., D.K. Mellinger, S.E. Moore, K. Klinck, R.P. Dziak, and J. Goslin. 2012. Sounds from airguns and fin whales recorded in the mid-Atlantic Ocean, 1999–2009. *Journal of the Acoustical Society of America* 131(2): 1102-1112. <https://doi.org/10.1121/1.3672648>.
- Nowacek, D., M. Johnson, and P.L. Tyack. 2004. North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) ignore ships but respond to alarm stimuli. *Proceedings of the Royal Society of London B* 271: 227-231.
- O'Hara, J. and J.R. Wilcox. 1990. Avoidance responses of loggerhead turtles, *Caretta caretta*, to low frequency sound. *Copeia* 2: 564-567. <https://doi.org/10.2307/1446362>.
- Pangerc, T., P.D. Theobald, L.S. Wang, S.P. Robinson, and P.A. Lepper. 2016. Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. 140(4): 2913-2922. <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4964824>.
- Popper, A.N. and R.R. Fay. 1993. Sound detection and processing by Fish: Critical review and major research questions. *Brain, Behavior and Evolution* 41(1): 14-25. <https://doi.org/10.1159/000113821>.
- Popper, A.N., A.D. Hawkins, R.R. Fay, D.A. Mann, S. Bartol, T.J. Carlson, S. Coombs, W.T. Ellison, R.L. Gentry, et al. 2014. *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*. ASA S3/SC1.4 TR-2014. SpringerBriefs in Oceanography. ASA Press and Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>.
- Porter, M.B. and Y.C. Liu. 1994. Finite-element ray tracing. In: Lee, D. and M.H. Schultz (eds.). *International Conference on Theoretical and Computational Acoustics*. Volume 2. World Scientific Publishing Co. pp. 947-956.
- Ridgway, S.H., E.G. Wever, J.G. McCormick, J. Palin, and J.H. Anderson. 1969. Hearing in the giant sea turtle, *Chelonia mydas*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 64(3): 884-890. <https://doi.org/10.1073/pnas.64.3.884>.
- Ross, D. 1976. *Mechanics of Underwater Noise*. Pergamon Press, NY, USA.
- Russell, D.J., G.D. Hastie, D. Thompson, V.M. Janik, P.S. Hammond, L.A. Scott-Hayward, J. Matthiopoulos, E.L. Jones, and B.J. McConnell. 2016. Avoidance of wind farms by harbour seals is limited to pile driving activities. *Journal of Applied Ecology* 53(6): 1642-1652. NLM.
- Scheidat, M., J. Tougaard, S. Brasseur, J. Carstensen, T. van Polanen Petel, J. Teilmann, and P. Reijnders. 2011. Harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) and wind farms: a case study in the Dutch North Sea. *Environmental Research Letters* 6(2): 025102. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/6/2/025102>.
- Simon, M., K.M. Stafford, K. Beedholm, C.M. Lee, and P.T. Madsen. 2010. Singing behavior of fin whales in the Davis Strait with implications for mating, migration and foraging. *Journal of the Acoustical Society of America* 128(5): 3200-3210. <https://doi.org/10.1121/1.3495946>.
- Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, et al. 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33(4): 411-521. <https://doi.org/10.1578/AM.33.4.2007.411>.
- Southall, B.L., J.J. Finneran, C.J. Reichmuth, P.E. Nachtigall, D.R. Ketten, A.E. Bowles, W.T. Ellison, D.P. Nowacek, and P.L. Tyack. 2019. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals* 45(2): 125-232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>.
- Stenberg, C., J.G. Støttrup, M. van Deurs, C.W. Berg, G.E. Dinesen, H. Mosegaard, T.M. Grome, and S.B. Leonhard. 2015. Long-term effects of an offshore wind farm in the North Sea on fish communities. *Marine Ecology Progress Series* 528: 257-265. <https://doi.org/10.3354/meps11261>.

- Stöber, U. and F. Thomsen. 2021. How could operational underwater sound from future offshore wind turbines impact marine life? *Journal of the Acoustical Society of America* 149(3): 1791-1795. <https://doi.org/10.1121/10.0003760>.
- Teague, W.J., M.J. Carron, and P.J. Hogan. 1990. A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies. *Journal of Geophysical Research* 95(C5): 7167-7183. <https://doi.org/10.1029/JC095iC05p07167>.
- Thomsen, F., A.B. Gill, M. Kosecka, M. Andersson, M. André, S. Degraer, T. Folegot, J. Gabriel, A. Judd, et al. 2016. *MaRVEN – Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy. Final study report*. Document Number RTD-KI-NA-27-738-EN-N. Report for European Commission, Directorate General for Research and Innovation.
- Tougaard, J., O.D. Henriksen, and L.A. Miller. 2009. Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *Journal of the Acoustical Society of America* 125(6): 3766-3773. <https://doi.org/10.1121/1.3117444>.
- Tougaard, J., O.D. Henriksen, and L.A. Miller. 2009c. Underwater noise from three types of offshore wind turbines: Estimation of impact zones for harbor porpoises and harbor seals. *J Acoust Soc Am* 125(6): 3766-3773.
- Tougaard, J., L. Hermannsen, and P.T. Madsen. 2020. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *Journal of the Acoustical Society of America* 148(5): 2885-2893. <https://doi.org/10.1121/10.0002453>.
- Tyack, P.L. and C.W. Clark. 2000. Communication and Acoustic Behavior of Dolphins and Whales. (Chapter 4) In Au, W.W.L., R.R. Fay, and A.N. Popper (eds.). *Hearing by Whales and Dolphins*. Springer, New York. pp. 156-224. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1150-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1150-1_4).
- Urick, R.J. 1983. *Principles of Underwater Sound*. 3rd edition. McGraw-Hill, New York, London. 423 p.
- van der Graaf, A.J., M.A. Ainslie, M. André, K. Brensing, J. Dalen, R.P.A. Dekeling, S. Robinson, M.L. Tasker, F. Thomsen, et al. 2012. *European Marine Strategy Framework Directive - Good Environmental Status (MSFD GES)*. Report of the Technical Subgroup on Underwater Noise and Other Forms of Energy, Brussels. [http://ec.europa.eu/environment/marine/pdf/MSFD\\_reportTSG\\_Noise.pdf](http://ec.europa.eu/environment/marine/pdf/MSFD_reportTSG_Noise.pdf).
- Van Geel, N., D. Risch, B. Marmo, S. Benjamins, P. Thompson, A. Wittich, and B. Wilson. 2022. *Characterisation of underwater operational noise of two types of floating offshore wind turbines. Environmental Interactions of Marine Renewables*, Edinburgh, Scotland.
- Wahlberg, M. and H. Westerberg. 2005. Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Marine Ecology Progress Series* 288: 295-309. <https://doi.org/10.3354/meps288295>.
- Wenz, G.M. 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *Journal of the Acoustical Society of America* 34(12): 1936-1956. <https://doi.org/10.1121/1.1909155>.
- Willis, M.R., M. Broudic, M. Bhurosah, and I. Masters. 2010. Noise associated with small scale drilling operations. *3rd International Conference on Ocean Energy*. 6 Oct 2010, Bilbao. pp. 1-5.
- Xu, W., L. Dong, F. Caruso, Z. Gong, and S. Li. 2020. Long-term and large-scale spatiotemporal patterns of soundscape in a tropical habitat of the Indo-Pacific humpback dolphin (*Sousa chinensis*). *PLOS ONE* 15(8): e0236938. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0236938>.

## Appendice A. Terminologia

### A.1. Acustica sottomarina

Il suono è più comunemente descritto utilizzando la metrica del livello di pressione sonora (SPL o  $L_p$ ). I livelli di ampiezza del suono sott'acqua sono comunemente misurati in decibel (dB) rispetto a una pressione di riferimento fissa di  $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$ . L' $L_p$  quadratico medio (root-mean square, rms) viene utilizzato per quantificare i suoni generati dall'attività target.

$L_p$  (dB re  $1 \mu\text{Pa}$ ) è il livello di decibel della pressione rms in una banda di frequenza stabilita entro una finestra temporale ( $T$ , s) contenente l'evento acustico:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt / p_0^2 \right) \quad (\text{A-1})$$

L' $L_p$  è una misura del livello di pressione effettivo per la durata di un evento acustico, come l'emissione di un impulso acustico o di una scansione. Perché la lunghezza della finestra,  $T$ , è il divisore, gli eventi più distribuiti nel tempo hanno un  $L_p$  inferiore anche se possono avere una densità di energia acustica totale simile.

Il livello Power Spectral Density (PSD) è una descrizione di come la potenza acustica è distribuita su diverse frequenze all'interno di uno spettro. Si esprime in dB re  $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ .

Il livello di esposizione sonora (SEL, dB re  $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$ ) è una misura dell'energia acustica totale contenuta in uno o più eventi acustici. Il SEL per un singolo evento viene calcolato dall'integrale temporale della pressione al quadrato sull'intera durata dell'evento ( $T_{100}$ ):

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left( \int_{T_{100}} p^2(t) dt / T_0 p_0^2 \right) \quad (\text{A-2})$$

dove  $T_0$  è un intervallo di tempo di riferimento di 1 s. Il SEL rappresenta l'energia acustica totale ricevuta in un luogo durante un evento acustico; misura l'energia sonora totale a cui sarebbe esposto un organismo in quella posizione.

Poiché  $L_p$  e SEL sono entrambi calcolati dall'integrale della pressione al quadrato, queste metriche sono correlate dalla seguente espressione, che dipende solo dalla durata della finestra temporale dell'energia  $T$ :

$$L_p = \text{SEL} - 10 \log_{10}(T) \quad (\text{A-3})$$

Le statistiche del livello sonoro, ovvero i percentili di superamento, vengono utilizzate per quantificare la distribuzione dei livelli sonori registrati generati dall'attività. Seguendo la pratica acustica standard, il livello  $n$ -esimo percentile ( $L_n$ ) è il livello (per es., PSD level,  $L_p$ , or SEL) ecceduto da  $n\%$  dei dati.  $L_{99}$  è il livello sonoro massimo registrato.  $L_{eq}$  è la media aritmetica lineare della potenza sonora, che può essere sostanzialmente diversa dal livello sonoro mediano  $L_{50}$ .  $L_p$  può anche essere chiamato  $L_{eq}$ , che significa 'livello equivalente'. I due termini sono usati in modo intercambiabile. Il livello mediano, piuttosto che la media, è stato utilizzato per confrontare i livelli sonori più tipici tra registratori, poiché la mediana è meno influenzata da valori anomali di ampiezza elevata (ad esempio, un crostaceo che picchietta sull'idrofono) rispetto al livello sonoro medio.  $L_5$ , il livello ecceduto da solo il 5% dei dati, rappresenta i livelli sonori tipici più alti misurati. I livelli sonori tra  $L_5$  and  $L_{99}$  provengono generalmente da passaggi molto ravvicinati di navi, eventi meteorologici molto intensi e altre condizioni poco frequenti.  $L_{95}$  rappresenta le condizioni tipiche più tranquille.

## A.2. Analisi in bande di un terzo d'ottava

La distribuzione della potenza di un suono con la frequenza è descritta dallo spettro del suono. Lo spettro sonoro può essere suddiviso in una serie di bande di frequenza adiacenti. La suddivisione di uno spettro in bande larghe 1 Hz, chiamate bande passanti, produce la densità spettrale di potenza del suono. Questi valori si confrontano direttamente con le curve di Wenz, che rappresentano i tipici livelli sonori dell'oceano profondo (Wenz 1962). Questa suddivisione dello spettro in bande passanti di ampiezza costante di 1 Hz, tuttavia, non rappresenta il modo in cui gli animali percepiscono il suono.

Poiché gli animali percepiscono aumenti esponenziali della frequenza piuttosto che aumenti lineari, l'analisi di uno spettro sonoro con bande passanti che aumentano esponenzialmente di dimensioni si avvicina meglio agli scenari del mondo reale. Nell'acustica subacquea, uno spettro è comunemente suddiviso in bande di 1/3 di ottava, che sono larghe un decimo di decade (circa un terzo di ottava). Ogni decade rappresenta un fattore 10 nella frequenza del suono. Ogni ottava rappresenta un fattore 2 nella frequenza del suono. La frequenza centrale della  $i$ -esima banda di 1/3 d'ottava,  $f_c(i)$ , is defined as:

$$f_c(i) = 10^{\frac{i}{10}} \text{ kHz} \tag{A-4}$$

e il limite basso ( $f_{lo}$ ) e alto ( $f_{hi}$ ) della frequenza di un  $i$ -esimo 1/3-banda di ottava definita come:

$$f_{lo,i} = 10^{\frac{-1}{20}} f_c(i) \quad \text{and} \quad f_{hi,i} = 10^{\frac{1}{20}} f_c(i) \tag{A-5}$$

Le bande di 1/3 d'ottava si allargano all'aumentare della frequenza, e su scala logaritmica le bande appaiono equidistanti (Figura A-1).

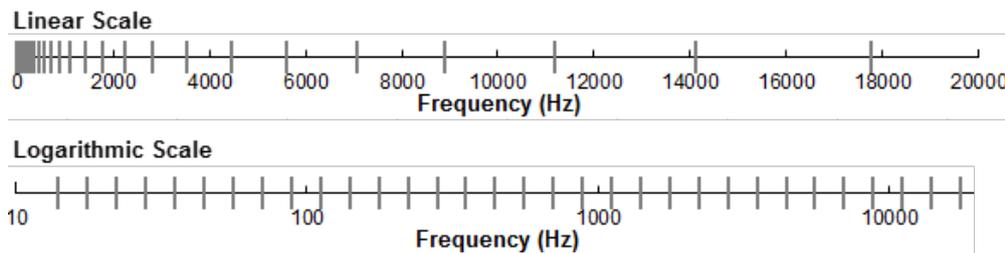


Figura A-1. Bande di frequenza di un terzo d'ottava (linee verticali) mostrate su una scala di frequenza lineare e su una scala logaritmica.

Il livello di pressione sonora nella  $i$ -esima banda ( $L_{p,i}$ ) è calcolato dallo spettro  $S(f)$  tra  $f_{lo,i}$  e  $f_{hi,i}$ :

$$L_{p,i} = 10 \log_{10} \int_{f_{lo,i}}^{f_{hi,i}} S(f) df \text{ dB} \tag{A-1}$$

Sommando il livello di pressione sonora di tutte le bande si ottiene il livello di pressione sonora a banda larga:

$$\text{Broadband } L_p = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \text{ dB} \tag{A-2}$$

La figura A-2 mostra un esempio di come i livelli di pressione sonora in banda di 1/3 d'ottava si confrontano con i livelli di densità spettrale della pressione sonora di un segnale sonoro ambientale. Poiché le bande di 1/3 d'ottava sono più larghe di 1 Hz,  $L_p$  della banda di 1/3 d'ottava è maggiore dei livelli spettrali, specialmente alle frequenze più alte. L'analisi per bande di terzo d'ottava viene

applicata a sorgenti di rumore continue e impulsive. Per le sorgenti impulsive viene tipicamente riportato il SEL in banda di 1/3 d'ottava.

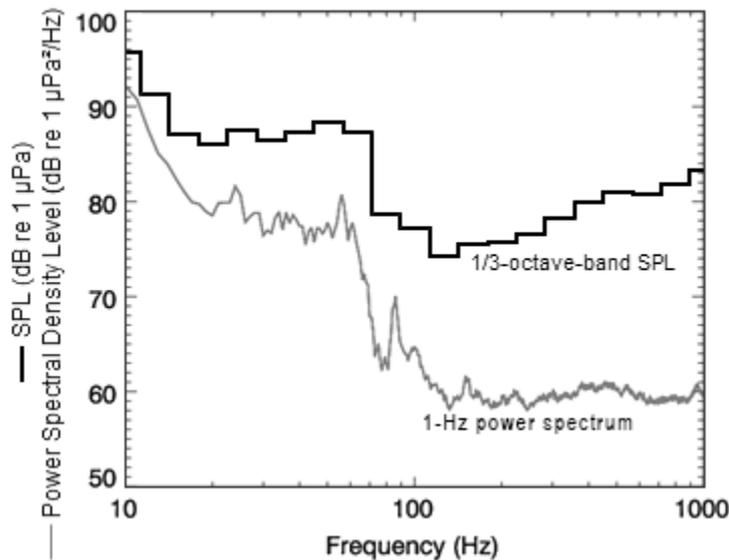


Figura A-2. Livelli di densità spettrale della pressione sonora e i corrispondenti livelli di pressione sonora in banda di 1/3 d'ottava del suono ambientale di esempio mostrati su una scala di frequenza logaritmica. Poiché le bande di 1/3 d'ottava sono più ampie all'aumentare della frequenza, l' $L_p$  della banda di 1/3 d'ottava è maggiore dello spettro di potenza.

### A.3. Southall (2019) Funzioni di ponderazione uditiva

Nel 2015, un rapporto tecnico della Marina degli Stati Uniti di Finneran (2015) raccomandò nuove funzioni di ponderazione uditiva. Le funzioni di ponderazione uditiva per i mammiferi marini vengono applicate in modo simile alla ponderazione A per le valutazioni del livello di rumore per gli esseri umani. Le nuove funzioni di ponderazione in frequenza sono espresse come:

$$G(f) = K + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right\} \quad (\text{A-6})$$

Finneran (2015) ha proposto cinque gruppi uditivi funzionali per i mammiferi marini in acqua: cetacei a bassa, media e alta frequenza (rispettivamente cetacei LF, MF e HF), pinnipedi focidi e pinnipedi otariidi. I parametri per queste funzioni di ponderazione in frequenza sono stati ulteriormente modificati l'anno successivo (Finneran 2016) e sono stati adottati nella guida tecnica del NOAA che valuta gli impatti acustici sui mammiferi marini (NMFS 2018), e nell'ultima guida di Southall (2019). Gli aggiornamenti non hanno interessato i contenuti relativi né alle definizioni delle funzioni di ponderazione della frequenza né ai valori di soglia rispetto ai criteri definiti in Southall et al. (2007). La Tabella A-1 elenca i parametri di ponderazione della frequenza per ciascun gruppo uditivo. La figura A-3 mostra le curve di ponderazione in frequenza risultanti.

Tabella A-1. Parametri per le funzioni di ponderazione uditiva raccomandati da NMFS (2018).

Gruppo uditivo funzionale	$a$	$b$	$f_1$ (Hz)	$f_2$ (Hz)	$K$ (dB)
Low-frequency cetaceans	1.0	2	200	19,000	0.13
High-frequency cetaceans	1.6	2	8,800	110,000	1.20
Very-high-frequency cetaceans	1.8	2	12,000	140,000	1.36
Phocid pinnipeds in water	1.0	2	1,900	30,000	0.75
Otariid pinnipeds in water	2.0	2	940	25,000	0.64

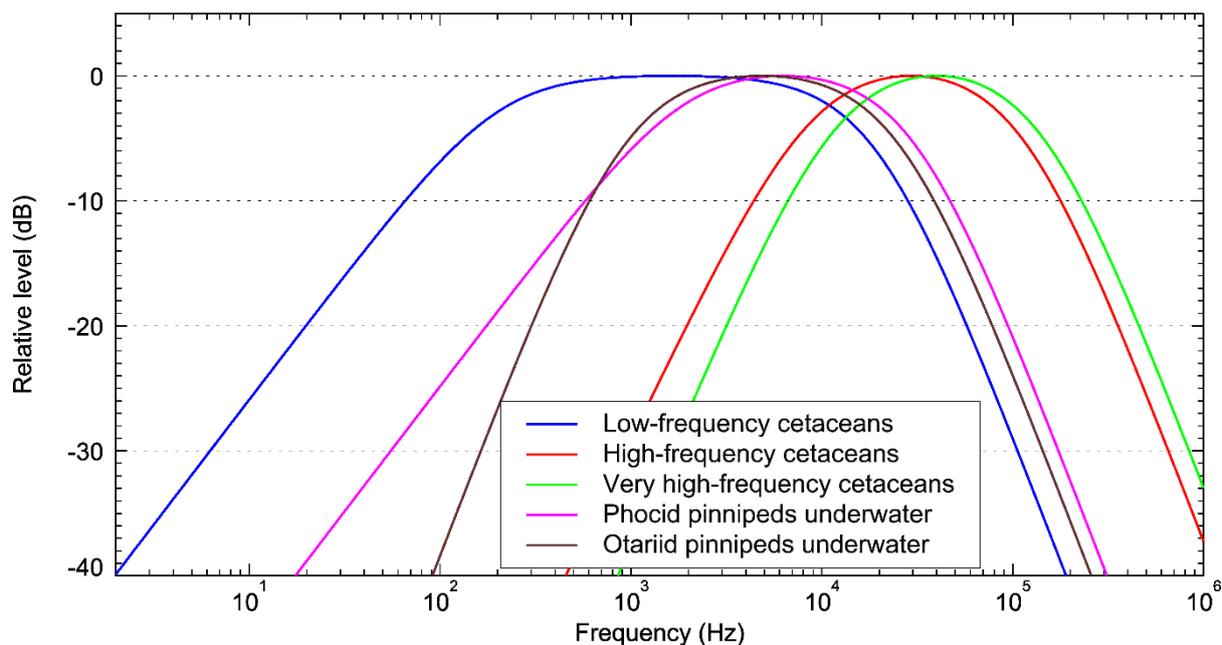


Figura A-3. Funzioni di ponderazione uditiva per i gruppi uditivi funzionali dei mammiferi marini come raccomandato da Southall (2019).

## Appendice B. Propagazione del suono

### B.1. Propagazione del suono col modello MONM-Bellhop

La propagazione del suono sott'acqua (cioè la perdita di trasmissione) è stata modellizzata con il Marine Operations Noise Model (MONM) della JASCO. Questo modello calcola la propagazione del suono da sorgenti acustiche tramite il modello di ray-trace acustico a fascio gaussiano BELLHOP (Porter and Liu 1994). Questa versione di MONM tiene conto dell'attenuazione del suono dovuta all'assorbimento di energia attraverso il rilassamento ionico e la viscosità dell'acqua oltre all'attenuazione acustica dovuta alla riflessione ai bordi del mezzo e agli strati interni (Fisher and Simmons 1977). Il primo tipo di attenuazione del suono è importante per le frequenze superiori a 5 kHz e non può essere trascurato senza influenzare notevolmente i risultati del modello.

MONM calcola i campi acustici in tre dimensioni modellizzando la perdita di trasmissione all'interno di piani verticali bidimensionali (2 D) allineati lungo radiali che coprono un'area di  $360^\circ$  dalla sorgente, un approccio comunemente indicato come  $N \times 2$  D. Questi piani radiali verticali sono separati di un passo angolare di  $\Delta\theta$ , ottenendo  $N = 360^\circ/\Delta\theta$  numero di piani (Figura B-1). La dimensione del gradino angolare dei radiali viene scelta per campionare sufficientemente la configurazione del fascio sorgente. MONM tiene conto della variabilità del livello sonoro dell'impulso emesso con angoli sia di azimut che di depressione secondo lo schema del fascio 3D della sorgente e stima i livelli sonori a varie distanze orizzontali dalla sorgente ea varie profondità.

Il livello sonoro ricevuto in una posizione di campionamento viene preso come il valore massimo che si verifica su tutti i campioni all'interno della colonna d'acqua sottostante, ovvero il livello sonoro ricevuto massimo in profondità (Figura B-1). Questi livelli di massima profondità vengono quindi presentati come contorni di colore attorno alla sorgente (ad esempio, Figura B-2).

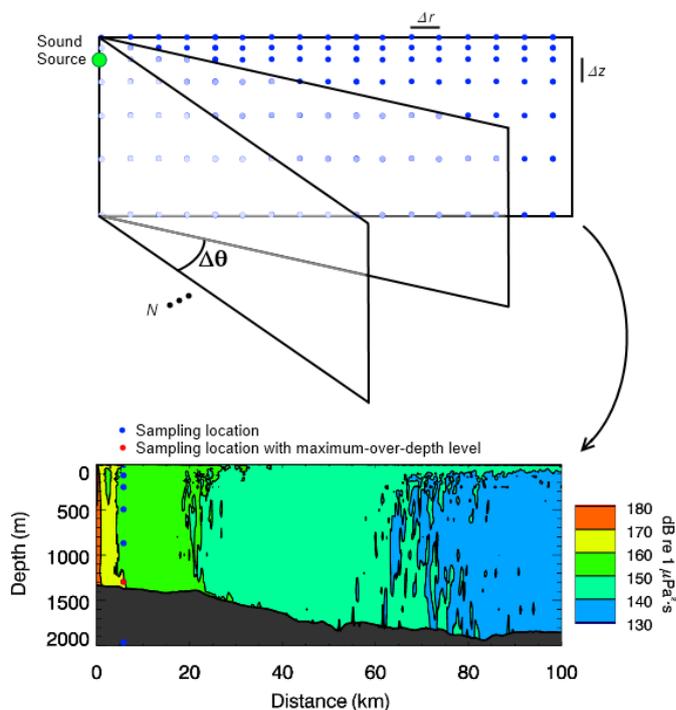


Figura B-1. Rappresentazione degli approcci  $N \times 2$ -D e massimo-sulla-profondità.

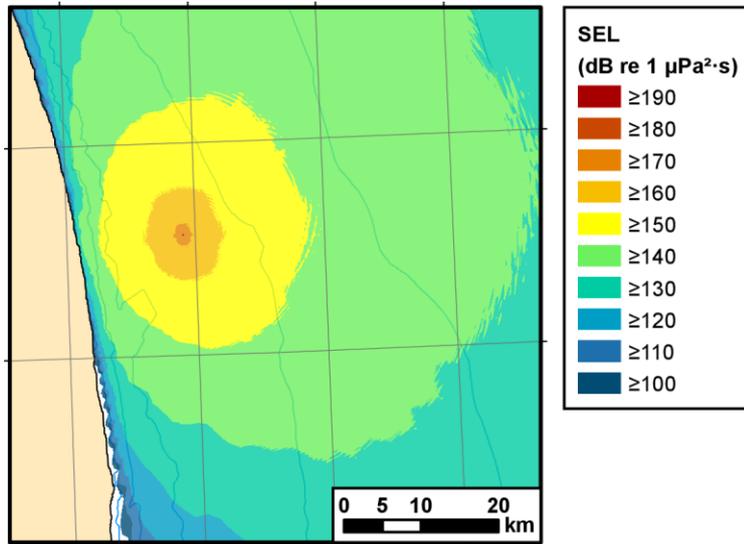


Figura B-2. Esempio di una mappa dell'SEL Massimo sulla profonditàExample of a maximum-over-depth SEL per una sorgente non specificata.