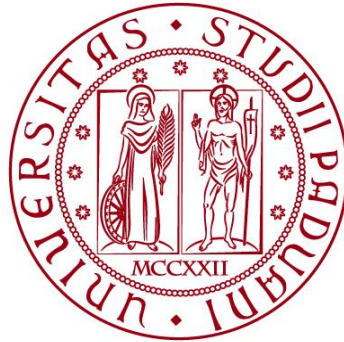


**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA**

**Corso di Laurea in Biologia**



**ELABORATO DI LAUREA**

**Quattro chiacchiere con le balene:  
approcci computazionali e nuove prospettive nella  
comunicazione dei cetacei**

**Tutor: Prof. Lorenzo Zane  
Dipartimento di Biologia**

**Laureanda: Irene Zuccheri**

**ANNO ACCADEMICO 2023/2024**



A Daky, Sander, Phoebe, Kira e Charlie  
prima o poi parlerò anche con voi  
(e potrete dirmi di stare zitta)  
e a Neve, che se n'è andata prima di un ultimo saluto



# Indice

---

<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
<b>1 I cetacei</b>	<b>3</b>
1.1 Il capodoglio . . . . .	7
<b>2 La comunicazione tra i cetacei</b>	<b>9</b>
2.1 Differenze nella comunicazione acustica vocale dei mysticeti e degli odontoceti . .	10
2.1.1 Il canto delle megattere . . . . .	11
2.1.2 I <i>click</i> dei capodogli . . . . .	12
<b>3 Comunicare con le balene</b>	<b>15</b>
3.1 Machine Learning . . . . .	15
3.1.1 Deep Learning . . . . .	16
3.1.2 Applicazioni delle Intelligenze Artificiali ai contesti biologici . . . . .	17
3.2 Progetto CETI . . . . .	17
<b>4 Implicazioni ecologiche e applicazioni</b>	<b>23</b>
<b>Conclusioni</b>	<b>25</b>



# Introduzione

---

Questa tesi vuole analizzare la comunicazione nei cetacei e con i cetacei, attraverso la descrizione di un progetto attualmente in corso nell'isola di Dominica.

Nel 2021 sono venuta a conoscenza del Progetto CETI, C'etacean Translation Initiative. Questo progetto si occupa di usare l'intelligenza artificiale nello sviluppo di un software capace di imparare a parlare il "balenese". L'iniziativa mi ha da subito interessata e coinvolta, spingendomi ad approfondire l'argomento tramite letture di libri e articoli e seguendo assiduamente le notizie pubblicate dagli stessi membri del progetto sui social network o sulle piattaforme di informazione.

L'obiettivo di questa tesi è, perciò, presentare e discutere la possibilità di imparare a comunicare con le balene, grazie allo sviluppo di nuove tecnologie e tecniche di Deep Machine Learning.

Sono stati analizzati diversi articoli prodotti dal gruppo di ricerca del CETI, oltre a pubblicazioni precedenti o contemporanee di autori non coinvolti nel progetto, ma, comunque, importanti per comprendere al meglio il funzionamento degli strumenti necessari e le conoscenze pregresse su cui l'intera iniziativa è stata basata.

La tesi è articolata in quattro capitoli: nel primo viene fornita un'introduzione sulla natura dei cetacei e, in particolare, dei capodogli. Nel secondo capitolo vengono esposti i metodi comunicativi intra-specifici usati nelle diverse specie di cetacei e le differenze comunicative tra una specie e l'altra. Il terzo descrive il progetto CETI e le Intelligenze Artificiali necessarie al suo sviluppo. Infine, il quarto capitolo si occupa di commentare quali siano le implicazioni ecologiche del progetto, con uno sguardo al futuro.

Grazie a questo lavoro di ricerca bibliografica si è potuto analizzare e riunire le informazioni fornite dagli scienziati e dalla bibliografia per descrivere il progetto e le sue applicazioni future.





# 1

## I cetacei

Dal sostantivo greco κῆτος (ketos), che significa “balena”, il termine cetacei descrive un infraordine di mammiferi completamente adattati alla vita acquatica [1].

Conosciamo attualmente 93 specie di cetacei, la maggior parte delle quali sono marine, mentre solamente 5 sono delfini di acqua dolce. Le varie specie sono divise in due sottordini di animali esistenti, mysticeti e odontoceti e uno di specie estinte, gli archeoceti [2].

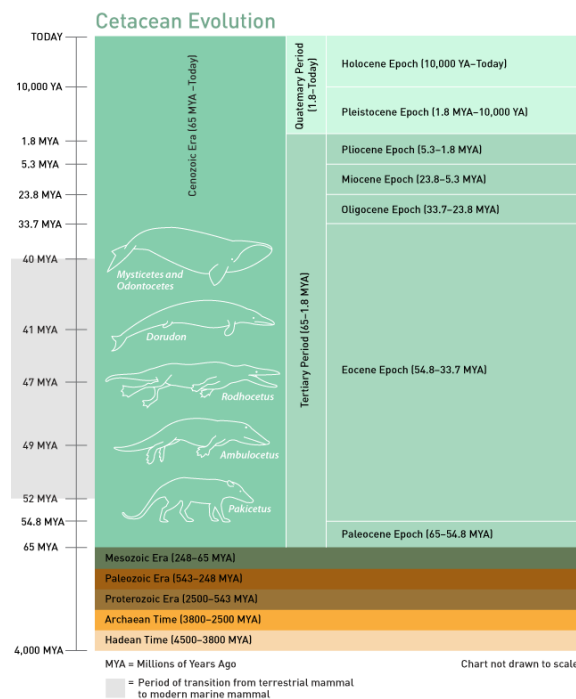


Figura 1.1: Linea evolutiva dei cetacei. In grigio è evidenziato il periodo di transizione da mammiferi terrestri a mammiferi acquatici; MYA = milioni di anni fa [3].

Il sottordine dei misticeti comprende 4 famiglie e un totale di 15 specie. Il sottordine degli odontoceti, invece, comprende 10 famiglie, due delle quali particolarmente ricche in specie. Le specie di odontoceti sono in totale 78. Tra gli odontoceti, le famiglie più numerose sono quelle degli Ziphiidae e degli Delphinidae [2].

I cetacei appartengono a un ordine di mammiferi terrestri, gli artiodattili, di cui fanno parte anche i cammelli e gli ippopotami. I primi cetacei, appartenenti al gruppo degli archeoceti come *Pakicetus*, risalgono all'Eocene, all'incirca 52.5 milioni di anni fa (Figura 1.1). Si ritiene che fossero animali semiacquatici, capaci di muoversi sia sulla terra emersa che in acqua. La dieta era probabilmente incentrata sul consumo di pesce [3].

La radiazione evolutiva che caratterizza la storia di questi animali fu favorita anche dal fatto che, nell'arco di soli 15 milioni di anni, passarono da essere animali terrestri a essere animali acquatici. Al tempo della loro origine, la Tetide, ampio mare tropicale con acque calde e ricche di cibo e nutrienti, costituiva un'importante fonte attrattiva per i progenitori dei cetacei, e ne favorì la diffusione. La distribuzione geografica degli archeoceti, inizialmente limitata a un'area che oggi possiamo identificare vicino al Pakistan e l'India, si allargò prima verso l'Africa e l'America settentrionale, per poi arrivare fino ai continenti australi [4].

### Motivazioni del ritorno all'acqua

La storia evolutiva dei vertebrati descrive i passaggi che portano dai pesci, "nuotatori primari", fino agli anfibi, poi rettili e infine uccelli e mammiferi. Qualunque animale venga oggi considerato marino o acquatico che non sia un pesce è perciò un "nuotatore secondario". Sono animali che si sono riadattati alla vita acquatica, mantenendo però delle tracce della loro origine terrestre. Tra i mammiferi sono parte di questo gruppo i cetacei, ma anche i sirenii (dugonghi) oppure i pinnipedi (foche), ma esistono anche casi di rettili acquatici, come i coccodrilli o le tartarughe marine [5].

Esistono diverse ipotesi sul motivo che possa aver spinto questi animali a tornare all'ambiente acquatico. Tra le più diffuse, vi è l'idea che le estinzioni di massa avvenute durante la storia del mondo abbiano incoraggiato la colonizzazione degli ambienti marini a causa della distruzione ecologica dell'ambiente terrestre. Un'altra ipotesi è che l'intensa competizione per la scarsità di risorse alimentari nell'ecosistema di partenza (terrestre) abbia indotto alcuni gruppi di animali a cercare rifugio nel mare. Queste ipotesi non si escludono e non si può nemmeno presumere che le motivazioni che hanno spinto la colonizzazione dell'ambiente acquatico siano le stesse che hanno poi portato alla colonizzazione degli oceani. Inoltre, per comprendere a fondo i motivi che hanno spinto alcuni animali a tornare agli ambienti marini, servirebbe riuscire a ricostruire il contesto, le interazioni tra gli animali dell'epoca e come si presentava l'ambiente in cui vivevano, cosa che, a oggi, possiamo solo supporre [6].

---

## Adattamenti alla vita acquatica

I cetacei, attualmente, si presentano completamente adattati all'ambiente acquatico in cui vivono, innanzitutto per la forma idrodinamica del corpo, affusolata, per ridurre al minimo la resistenza dell'acqua e muoversi senza eccessivo sforzo. Gli arti anteriori sono modificati in pinne, mentre di quelli posteriori, assenti, restano solo alcune piccole ossa vestigiali. È la pinna caudale, disposta orizzontalmente e divisa in due lobi simmetrici congiunti da una linea centrale, a rappresentare il vero e proprio organo di propulsione nei cetacei ed è essa a permettere i salti, i tuffi e il nuoto rapido in senso verticale [7]. Sono generalmente privi di pelo e isolati termicamente da uno spesso strato di grasso. Lo strato di grasso, oltre a isolare, collabora a rendere idrodinamica la figura dell'animale e ne migliora la galleggiabilità. Per bilanciare la differenza osmotica tra la concentrazione di sali nei liquidi interni e quella dell'ambiente esterno, i cetacei sono dotati di piccoli, ma efficienti reni che concentrano i cataboliti consentendo così il risparmio dell'acqua e l'escrezione dei sali in eccesso [5].

## Morfologia

Dal punto di vista morfologico, i cetacei sono un gruppo molto diversificato, formato sia da animali dalle dimensioni enormi (come la balenottera azzurra, animale più grande esistente, 33m di lunghezza) sia da animali notevolmente più piccoli (come la focena del golfo di California, 1.4m di lunghezza) [1].

La divisione dei cetacei in mysticeti e odontoceti riflette delle differenze legate sia a caratteristiche morfologiche sia al metodo di alimentazione.

I mysticeti si nutrono per filtrazione e hanno di conseguenza una serie di caratteristiche morfologiche che lo rendono possibile. Sono infatti dotati di fanoni, piastre cornee che pendono dai bordi del palato. Sono formati da fibre di cheratina, simili a peli, cementate assieme alla base, ma libere all'estremità distale. Funzionano da filtro attraverso il quale le balene riescono a trattenere il krill o il materiale di cui si nutrono all'interno della bocca, mentre lasciano fuoriuscire l'acqua [5]. Ogni giorno una balenottera azzurra è capace di mangiare fino a tre tonnellate di crostacei, in particolare gli eupasidi, noti come "krill". Gli odontoceti sono invece dotati di denti (da cui il nome, che deriva dal greco ὀδούς, dente) e sono in grado di identificare le prede tramite ecolocalizzazione [8]. Gli odontoceti sono infatti predatori e si alimentano prevalentemente di organismi a crescita veloce, come gamberi, pesci o molluschi cefalopodi, che identificano grazie ai biosonar.

I biosonar funzionano perché i delfini generano dei suoni sotto forma di *click*. La frequenza dei *click* è maggiore rispetto ai suoni usati per la comunicazione. Quando il suono colpisce un oggetto, parte dell'energia dell'onda sonora viene riflessa al "delfino emittente". Nel momento in cui riceve l'onda di ritorno (*eco*), il delfino genera un secondo *click*: il tempo che trascorre tra il *click* e l'*eco* permette all'animale di capire quanto distante è l'oggetto colpito. Inoltre, l'intensità con cui il delfino percepisce l'onda di ritorno da una parte o dall'altra del capo, permette al cetaceo di capire la direzione [9].

Possiamo trovare altre differenze tra misticeti e odontoceti nella forma dello sfiatatoio, che è doppio nei primi e singolo nei secondi, ma anche nella forma del capo. Il capo dei misticeti è, infatti, molto simmetrico, diversamente da quello degli odontoceti, i quali hanno ossa mascellari e premaxillari allungate anteriormente ed espanse posteriormente. Essi hanno anche il melone, che contribuisce notevolmente all'asimmetria del loro capo. Da un punto di vista dimensionale, i misticeti sono tipicamente più grandi rispetto agli odontoceti, che sono invece di dimensioni medio-piccole, fatta eccezione per il capodoglio e alcune specie di zifii [5].

Troviamo differenze nei due sottordini anche nel dimorfismo sessuale. Nel caso dei misticeti, sono le femmine ad avere dimensioni maggiori e raggiungono lunghezze tipicamente attorno al 5% maggiori rispetto ai maschi. La maggior dimensione può essere legata alla necessità di depositare maggiori risorse per sostenere le loro richieste riproduttive. Nel caso degli odontoceti, i maschi sono più grandi delle femmine e il dimorfismo più evidente si riscontra nei capodogli, nelle orche, negli iperodonti, nei beluga, nei narvali e nei globicefali. Si evidenziano differenze tra i sessi anche nella forma e taglia della testa, dei denti, delle pinne. Si riscontrano spesso anche pattern di cicatrici diversi nei due sessi, a dimostrazione del fatto che i maschi usano il rostro e i denti durante le lotte con altri maschi [10].

### Conservazione

I cetacei, in particolare balene e capodogli, sono particolarmente noti perché sono stati vittime della cosiddetta “caccia alle balene”. Si stima che negli anni Sessanta, momento apice della caccia, ne furono uccisi più di 600.000 esemplari. È solamente nel 1982 che viene firmata una moratoria dalla *International Whaling Commission* (IWC), che vieta, finalmente, la caccia alla balena e al capodoglio [11].

È interessante osservare che un importante punto di svolta nel rapporto uomo-balene, che ha poi portato, qualche anno dopo, alla firma della moratoria, è stata la pubblicazione nell'agosto del 1970 del disco “*Songs of the Humpback Whale*” (Figura 1.2) di Roger Payne, che racchiude le registrazioni dei canti delle balene che il biologo americano sentì per la prima volta alla fine degli anni 60 [12]. Il disco vendette più di 125.000 copie, diventando l'album naturale più venduto nella storia. Il suo successo fu di notevole aiuto al programma “*Save the Whales*”, e portò le nazioni unite a stabilire una moratoria di almeno 10 anni sulla caccia alla balena.

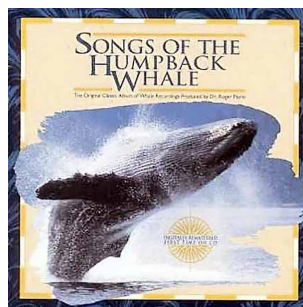


Figura 1.2: Copertina del CD "Songs of the Humpback Whale" [12].

## 1.1 Il capodoglio

Il capodoglio (*Physeter macrocephalus* Linnaeus 1758) è un cetaceo odontoceto della famiglia dei Fiseteridi. È l'unico rappresentante del suo genere, mentre è una delle tre specie ancora esistenti della famiglia dei Physeteroidea, assieme a *Kogia breviceps* e *Kogia sima* [1].

Secondo lo IUCN (*International Union for Conservation of Nature*), il capodoglio è classificato come “vulnerabile” a livello globale, mentre nel Mediterraneo è “in pericolo”, con una popolazione che conta meno di 2500 esemplari [13].

Il capodoglio è il più grande tra gli odontoceti, tanto da essere facilmente scambiato per una balena, mysticete. Il tratto anatomico che più lo distingue dagli altri cetacei è l'organo dello spermaceti, situato all'interno della testa, che contiene sostanze lipidiche in quantità che arrivano a rappresentare oltre il 10% del peso dell'animale (Figura 1.3) [14].

Il nome è dovuto al fatto che in passato si pensava che quest'organo contenesse lo sperma dell'animale [1]. La funzione principale dello spermaceti e delle strutture a esso associate è quella di creare ed esprimere il caratteristico *click* [8].

È caratterizzato da un marcato dimorfismo sessuale in termini dimensionali, con femmine che raggiungono i 12 metri e le 25 tonnellate in età adulta e maschi che arrivano ai 18 metri e le 60 tonnellate [10].

È risaputo che nei capodogli si ha dimorfismo anche nelle vocalizzazioni e nell'emissione di *click*. Sono infatti i maschi a possedere un complesso nasale particolarmente grande, che può raggiungere dimensioni pari a un quarto o un terzo la lunghezza totale dell'animale. Per sostenere l'enorme massa corporea (15.000 kg per le femmine, 45.000 kg i maschi) devono mangiare circa il 3% del loro peso corporeo ogni giorno. I capodogli si nutrono, principalmente, di ingenti quantità pesci di fondo e di cefalopodi, come i calamari. Si è visto che l'emissione di *click* è notevole durante eventi di immersione e ricerca di cibo, a dimostrazione della loro utilità nell'ecolocalizzazione delle prede [15].

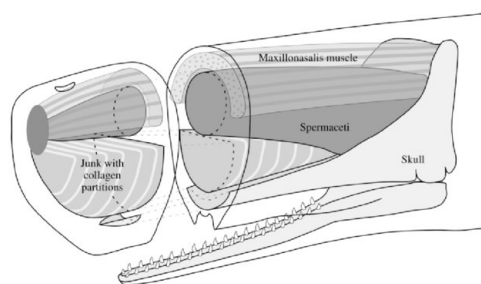


Figura 1.3: Diagramma dell'anatomia della testa di capodoglio (*Physeter macrocephalus*). Si notano la grandezza e posizione dell'organo spermaceti rispetto allo scheletro del cranio [16].

La differenza tra maschi e femmine è evidente anche nei comportamenti e nelle abitudini. La struttura sociale dei capodogli è matrilineare, con famiglie formate da femmine non necessariamente imparentate tra loro e i loro piccoli. Le femmine prendono le decisioni quando viaggiano,

trovano cibo e foraggiano assieme. La famiglia protegge tutti i cuccioli e l'allattamento è in comune. I gruppi, formati da femmine e cuccioli, stazionano prevalentemente in mari caldi e tropicali, mentre i maschi prediligono i mari dei poli, per spostarsi durante la stagione riproduttiva. Il ciclo vitale di un capodoglio si aggira sui 60-70 anni, forse anche di più. Le femmine raggiungono la maturità sessuale attorno ai 9 anni, mentre nei maschi la raggiungono ai 20 anni. Le femmine partoriscono ogni 4-6 anni un cucciolo, con gestazione di 14-16 mesi. Il tempo che intercorre tra un parto e l'altro si modifica, aumentando, con l'età. I cuccioli vengono poi allattati per almeno due anni, anche se attorno all'anno di età iniziano a integrare il latte con alimenti solidi. Si tratta dunque di una strategia K, caratterizzata da tempi di crescita lenti, tasso riproduttivo basso e raggiungimento della maturità sessuale dopo numerosi anni [17].

Il capodoglio è una specie che possiamo definire cosmopolita. I maschi giovani accompagnano le femmine e i piccoli nelle acque tropicali e subtropicali, per poi separarsi tra i 4 e 21 anni per andare a latitudini maggiori. I maschi tornano nelle aree tropicali al momento della riproduzione (Figura 1.4) [1].

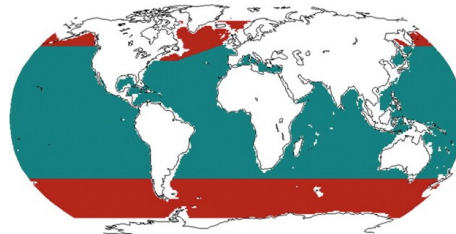


Figura 1.4: Distribuzione mondiale di capodogli (*Physeter macrocephalus*): il colore verde indica l'area in cui si trovano sia maschi sia femmine, mentre il colore rosso indica l'area in cui si trovano solamente individui maschi [17].

# 2

## La comunicazione tra i cetacei

---

Bradbury e Vehrencamp [18] definiscono la comunicazione dicendo che: “*La comunicazione coinvolge lo scambio di informazioni (tramite dei segnali) da un mittente a un destinatario, e di conseguenza l’uso di questa informazione da parte del destinatario nel decidere se e come rispondere*”.

Negli animali la comunicazione può essere di diversi tipi: chimica, visiva, tattile o acustica (divisa in vocale o non vocale).

Per quanto riguarda la comunicazione chimica, essa è nota tra i mammiferi terrestri, ma si sa poco su come funzionino i segnali chimici in acqua. Il sistema olfattivo e l’anatomia dei cetacei non sono ottimali per questo genere di comunicazione, che non è conciliabile con gli adattamenti alla vita acquatica. L’idea prevalente è che la chemiocezione sia paragonabile a una forma di gusto più che di olfatto [19].

Si parla di comunicazione visiva nei cetacei, quando si considerano comportamenti, colorazioni e tratti morfologici. Molte specie possiedono caratteristiche morfologiche particolari che a volte possono anche essere considerate caratteri sessuali secondari. Si è osservato come modifiche della posizione del corpo nell’acqua della postura o del comportamento possano rappresentare una forma di segnalazione della presenza di conspecifici, di predatori o di prede [19].

La comunicazione tattile invece coinvolge episodi di sfregamenti, tocchi che avvengono in momenti come il gioco, il rapporto madre-figli, contesto sessuale o sociale, tramite l’uso del naso o del rostro, delle pinne, dell’addome o del corpo intero. Sono stati registrati molti casi negli ultimi anni in cui alcune balene grigie (*Eschrichtius robustus*) in Messico approcciano le barche e le toccano e, inoltre, hanno mostrato alta tolleranza al tocco umano dei turisti. Si sa anche che gli odontoceti tenuti in cattività cercano il contatto con i loro addestratori, che lo usano spesso come rinforzo durante l’addestramento [19].

Tra questi quattro tipi di comunicazione i cetacei però prediligono quella acustica, dal momento che in acqua la visibilità è limitata spesso a pochi metri. L'udito è quindi il senso privilegiato per la comunicazione e per la comprensione dell'ambiente circostante. I suoni vengono usati dai cetacei per vari scopi: dalla comunicazione alla selezione riproduttiva, l'orientamento e la ricerca del cibo [19].

Registrare e analizzare i suoni dei mammiferi marini è relativamente semplice, ciò che è invece complesso è determinare il contesto e la funzione di questi suoni [19].

La comunicazione acustica è divisa a sua volta in comunicazione vocale e non vocale.

La comunicazione acustica non vocale riguarda principalmente suoni percussivi prodotti con i denti o le mascelle, o anche l'emissione di bolle. Anche i fenomeni di *breaching*, in cui i cetacei escono dall'acqua con salti più o meno vigorosi, producono dei suoni che si ripercuotono per vari chilometri sott'acqua [19].

Prendiamo, quindi, in considerazione la comunicazione acustica vocale, che presenta numerose e importanti differenze tra mysticeti e odontoceti.

## 2.1 Differenze nella comunicazione acustica vocale dei mysticeti e degli odontoceti

Nelle diverse specie di mysticeti e odontoceti il suono è usato su scale geografiche diverse, da poche decine di metri per alcune specie fino a decine di km per alcuni mysticeti. Le frequenze dei suoni dipendono dalla dimensione dell'animale (Figura 2.1): infatti maggiore è la dimensione, minori sono le frequenze dei suoni prodotti [20].

Partendo dai mysticeti, si osserva come essi, in quanto filtratori, non necessitano di metodi di ecolocalizzazione per identificare le prede, come invece succede negli odontoceti. I suoni più comuni sono invece suoni a basse frequenze. Producono diversi tipi di suoni: ci sono i cosiddetti lamenti a bassa frequenza (suoni che durano da 1 a 30 secondi, ideali per la comunicazione a lunga percorrenza), i *thump* o *knock* (con durata inferiore al secondo, probabilmente con un uso di richiamo), i fischi o *chirp* (suoni con frequenza maggiore a 1kHz, molto brevi) e infine i canti [19].

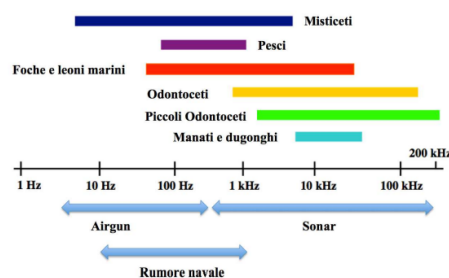


Figura 2.1: Frequenze di emissione di Odontoceti e Mysticeti, messa a paragone alle frequenze di altri animali e di oggetti di origine antropica [21].



I suoni emessi dagli odontoceti sono invece divisi in suoni pulsati e suoni tonali a banda stretta.

I suoni a banda stretta sono suoni continui, come i *whistle*. Recenti sviluppi tecnologici hanno permesso di capire che questi suoni coprono bande dai 5kHz agli 85kHz. La ricerca sulla comunicazione nei delfini fino a oggi si è concentrata maggiormente sui *whistle*, in primis per questioni di comodità: il range dei *whistle* è infatti facile da registrare e, successivamente, da analizzare. Inoltre questi suoni sono prodotti dalle specie più comuni e più facili da mantenere in cattività e pare che non abbiano alcun altro scopo se non quello della comunicazione. Ciononostante, esistono molte specie, anche tra gli stessi delfini, che non producono *whistle*: perciò non si può ritenere che questa sia la tecnica di comunicazione principale tra gli odontoceti. Nel caso delle orche e dei capodogli si è registrato il caso di richiami ripetuti e stereotipici, prodotto da alcuni membri di gruppi sociali stabiliti. Questi richiami vengono detti "dialetti". Nelle orche i dialetti sono tipici e diversi nei vari gruppi. Nei capodogli si parla di coda, sequenze stereotipiche di 3-40 *click* della durata di circa 3 secondi in totale [19].

I suoni pulsati vengono invece prodotti da tutte le specie di odontoceti registrate e sono usati principalmente per l'ecolocalizzazione, ma anche per la comunicazione e la socialità.

Vengono divisi in *pulse trains* e *burst-pulse sounds*.

1. ***Pulse trains***: sequenze acustiche ripetute nel tempo; i singoli pulse sono di 50  $\mu$ sec, con varianza di frequenza da 5 kHz a 150 kHz. La loro funzione primaria è l'ecolocalizzazione.
2. ***Burst-pulse***: sequenze di *pulse train* altamente ripetute dove l'intervallo tra i pulse è di 5  $\mu$ sec; data la loro vicinanza nel tempo, dall'orecchio umano vengono percepiti come un suono continuo. La frequenza varia da 20 kHz a oltre 100 kHz. La loro funzione primaria si ritiene sia quella di comunicazione [19].

### 2.1.1 Il canto delle megattere

Come precedentemente descritto, i misticeti producono suoni a frequenze molto basse (tra i 20 e i 200 Hz). Questi suoni vengono prodotti da vibrazioni della laringe che si propagano lungo la gola e, successivamente, nelle acque circostanti sotto forma di onde sonore [20].

Riescono a produrre vocalizzazioni anche molto complesse divise in unità che prendono il nome di frasi che a loro volta vanno a formare dei temi. Quando i temi vengono disposti in un ordine specifico, si forma un canto. Uno dei canti più noti è quello della megattera (*Megaptera novaeangliae*) (Figura 2.2), con una durata dai 7 ai 30 minuti, lento e rumoroso. I canti sono diversi nelle varie popolazioni, con temi che possono anche cambiare nel tempo [22].

Gli individui, unicamente maschi che cantano vengono comunemente chiamati *singer*.

Il ruolo sociale di questi canti resta ipotetico. Le idee oggi proposte sono di vario tipo, dal voler esprimere il proprio status nelle relazioni ad attrarre compagni o, addirittura, sincronizzare il periodo riproduttivo. Alcuni studi acustici hanno anche mostrato come la competizione tra maschi *singer* vada a influenzare il repertorio vocale [23].

In particolare, uno studio [25] ha proposto una teoria per caratterizzare le canzoni delle megattere, la cosiddetta "*4Ls theory*":



Figura 2.2: Foto di Paul Nicklen di due individui di *Megaptera novaeangliae* [24].

1. **Low**: la frequenza dev'essere il più profonda possibile; basse frequenze sono probabilmente legate a una grandezza maggiore del generatore di suono e potenzialmente anche alla grandezza del corpo, perciò vanno a indicare una buona salute e maturità sessuale. Le basse frequenze, inoltre, si propagano lungo grandi distanze con minor dispersione, permettendo la diffusione su un territorio più vasto rispetto a frequenze meno basse.
2. **Loud**: l'intensità acustica maggiore possibile; suoni forti vengono trasmessi su distanze maggiori e quindi possono essere sentiti da zone più distanti.
3. **Long**: il suono deve durare il più possibile; la durata dell'unità sonora può indicare lo stato fisico del *singer*, motivo per cui un suono più lungo dimostra buona salute, grandi dimensioni e maturità.
4. **Loquacious**: canti ripetuti; se un *singer* occupa lo spazio acustico a lungo e ripetutamente, è più facile che riesca ad attrarre l'attenzione.

Il canto delle megattere diventa noto attorno agli anni Settanta del Novecento, quando i coniugi Roger e Katy Payne pubblicano il noto disco "*Songs of The Humpback Whale*", come anticipato nel Capitolo 1 (Figura 2.3) [12].



Figura 2.3: Songs of the Humpback Whale - link all'audio [12].

### 2.1.2 I *click* dei capodogli

Per quanto riguarda i *click* nei capodogli (*Physeter macrocephalus*) (Figura 2.4), sappiamo che possono essere prodotti con diversi tassi di ripetizione, perciò possiamo identificare quattro categorie principali di suoni:

1. **Usual clicks:** emessi durante le immersioni che i capodogli compiono per alimentarsi, caratterizzati da un intervallo tra i *click* (ICI) pari a 0.5-1 s.
2. **Creak clicks:** serie di *click* molto rapidi, fino a 220 clicks/sec emessi dai capodogli quando si trovano molto vicini alla preda.
3. **Slow clicks:** ripetizione ogni 6-8 secondi di *click* la cui funzione non è chiara, ma si ipotizza siano emessi per attrarre le femmine o respingere altri maschi.
4. **Coda:** serie stereotipate di 3-20 *click* di durata tra gli 0.2 e i 2 secondi che vengono prodotti dalle femmine durante interazioni sociali interspecifiche. Ogni gruppo di femmine ha un distinto repertorio di coda; i *coda*, apparentemente, portano informazioni riguardo l'identità dell'animale che comunica e si sa qualcosa della diversità dei tipi di *coda* esistenti e del loro uso. Oltre a ciò, la funzione comunicativa precisa di particolari *coda* resta un enigma [26].

Lo scambio di *coda* è, in ogni caso, la forma di comunicazione più evidente nei capodogli. Si sono trovati metodi per classificarli e separarli in categorie in base al loro pattern temporale e il numero di *click* che contengono. Si è anche visto, analizzando scambi comunicativi tra più individui, che ci sono delle strutture nell'ordine dell'arrangiamento sequenziale dei *coda* usati nella comunicazione: per esempio, gli scambi sono spesso iniziati da *coda* di cinque *click* spaziate regolarmente, mentre *coda* di 7 *click* spesso seguono *coda* di 8 *click* e raramente accade il contrario [27].

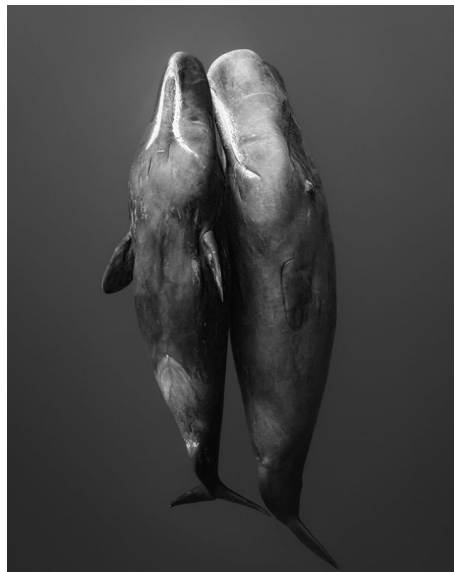


Figura 2.4: Foto di Paul Nicklen di due esemplari di *Physeter macrocephalus* [24].



# 3

## Comunicare con le balene

---

L'uomo ha sempre voluto comunicare con gli animali. Ne sono dimostrazione gli innumerevoli libri e storie che propongono animali parlanti, coscienti e intelligenti, capaci di dare consigli e in possesso di soluzioni corrette a dilemmi che l'uomo da solo non riesce a risolvere, ma anche i diversi esperimenti fatti nel tempo con animali di ogni tipo, dagli uccelli alle scimmie ai delfini.

Attualmente, i tentativi si stanno specializzando sempre di più, grazie anche all'avvento di nuove e sviluppate tecnologie, specialmente le Intelligenze Artificiali.

### 3.1 Machine Learning

Le IA, o Intelligenze Artificiali, sono software capaci di simulare l'intelligenza umana. Sono capaci di analizzare grandi quantità di dati in tempi molto minori rispetto a quelli richiesti a un essere umano, a volte con prestazioni migliori.

Alla base dell'intelligenza artificiale vi sono diverse tecnologie, tra le quali il Machine Learning (o Apprendimento Automatico) [28].

Dal punto di vista pratico, il Machine Learning (ML) sfrutta algoritmi che permettono l'apprendimento automatico dei parametri necessari a elaborare i dati. Questo genere di apprendimento può essere di tre tipi: supervisionato, non supervisionato e con rinforzo. Nel caso del ML supervisionato, il software impara e applica ciò che ha imparato per similitudine. Un esempio può essere quello degli assistenti vocali che, con il tempo, imparano a riconoscere sempre meglio e sempre più rapidamente la voce dell'utente. Nel caso del ML non supervisionato, al sistema vengono inviati una serie di input che deve rielaborare autonomamente sulla base di caratteristiche comuni per fare previsioni sugli input successivi. In questo caso un esempio può essere la sezione "consigliati" di una piattaforma di vendita, dove si trovano prodotti simili a quelli acquistati precedentemente. Infine, il ML con rinforzo è simile al ML supervisionato, ma per raggiungere l'obiettivo il software deve imparare a interagire con l'ambiente circostante. Per esempio le auto a guida autonoma sono basate su questa tecnologia [28].

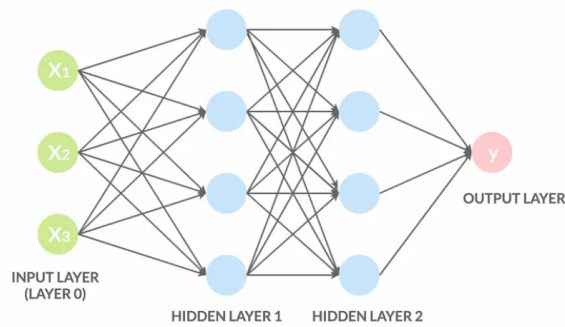


Figura 3.1: Esempio di rete neurale profonda, ossia contenente due o più strati nascosti [29].

### 3.1.1 Deep Learning

Il Deep Learning (DL), ovvero l'Apprendimento Profondo, è una sottocategoria del Machine Learning. A differenza del ML, il DL sfrutta l'impiego di reti neurali artificiali (Figura 3.1) per elaborare le informazioni ed eseguire attività in totale autonomia. Le reti neurali artificiali (Artificial Neural Network), ispirate alle connessioni neurali, sono suddivise in vari livelli formati da nodi. Ogni nodo riceve informazioni, le rielabora sulla base dei parametri appresi e le trasmette ai nodi del livello successivo, con un meccanismo a cascata. Una rete può avere vari livelli, a partire da un livello di input (in entrata) e uno di output (in uscita) e altri livelli nascosti [28].

I livelli inferiori, vicini all'input, elaborano dati grezzi, mentre livelli superiori elaborano dati sempre più complessi derivati dai livelli inferiori. Di conseguenza, se una rete con un solo livello è comunque in grado di fare previsioni approssimative, ulteriori livelli possono aiutare a migliorare la precisione [30].

Perciò si va a formare un'architettura gerarchica che permette di analizzare ed estrarre informazioni utili da grandi quantità di dati provenienti da fonti diverse. È anche importante sottolineare che architetture con maggiori livelli permettono alle reti neurali profonde di estrarre informazioni rilevanti da dati in input molto complessi che possono poi essere usate per svolgere accuratamente compiti che richiedono discriminazione, classificazione e riconoscimento.

Esistono vari tipi di architetture, le più diffuse e conosciute sono le Convolutional Neural Networks (CNN), le Long Short Term Memory networks (LSTM) e le Gated Recurrent Units (GRU).

Le CNN sono un sottotipo di Neural Networks particolarmente efficace nel campo delle immagini e dei linguaggio o input sonori. Le LSTM e le GRU sono, invece, sottotipi di Recurrent Neural Networks (RNN). Le RNN sono un tipo di rete neurale che usa dati sequenziali. Il rischio che può insorgere è che, in sequenze molto lunghe, le RNN tralascino alcune informazioni presenti all'inizio della sequenza. Le LSTM e le GRU rappresentano perciò una soluzione a questo problema di dispersione dei dati. Esse, infatti, conservano le informazioni importanti, a prescindere da dove siano localizzate nella sequenza di dati e dimenticano i dati non importanti [30].

### 3.1.2 Applicazioni delle Intelligenze Artificiali ai contesti biologici

I contesti di applicazione del Machine Learning nella biologia marina, in particolare nella ricerca sui cetacei, sono numerosi. Viene usato nel campo della foto-identificazione [31][32], in metodi predittivi dell'abbondanza di animali nei diversi mari [33] o anche per determinare e classificare la presenza di animali grazie ai *click* di ecolocalizzazione [34].

I metodi basati sul ML vengono anche applicati alle vocalizzazioni dei mammiferi marini, incluso l'uso di reti che categorizzano il repertorio bioacustico delle vocalizzazioni di *Pseudorca crassidens* [35] o altri progetti che sono riusciti nella identificazione di singoli esemplari di *Orcinus orca* [36] grazie a particolari modelli di machine learning.

A partire dal 2019, alcuni membri del gruppo di scienziati coinvolti nel progetto CETI (si veda paragrafo 3.2) hanno implementato delle tecniche di Machine Learning per migliorare lo studio bioacustico dei capodogli. Nell'articolo "*Deep Machine Learning Techniques for the Detection and Classification of Sperm Whale Bioacoustics*" [37], viene descritto l'utilizzo delle Convolutional Neural Networks (CNN) per costruire un click detector.

Il click detector è un algoritmo ML che riconosce automaticamente gli spettrogrammi, ossia una rappresentazione grafica dell'intensità di un suono in funzione del tempo e della frequenza, come "*click*" o "*no click*". Il click detector ha mostrato un'accuratezza del 99,5% nella classificazione di 650 spettrogrammi. Per ottenere questo risultato, i ricercatori si sono anche avvalsi dell'uso di LSTM e GRU, che vengono usate allo scopo di classificare i tipi di *coda* e provare a riconoscere i vocal clan e gli individui all'interno del dataset. La scelta preferenziale di queste architetture è legata al fatto che le LSTM e RNN sono migliori nel tenere in considerazione i principi di classificazione più importanti (tipo di *coda*, vocal clan, classificazione degli individui), mentre le CNN sono più efficaci nel caso di immagini o, in generale, input visivi.

I risultati, largamente positivi, dimostrano la possibilità di applicare il ML alla bioacustica dei capodogli e dimostrano la validità del costruire neural networks per imparare delle rappresentazioni significative delle vocalizzazioni dei capodogli [37].

## 3.2 Progetto CETI

Il progetto CETI, CEtacean Translation Initiative [38], si propone di applicare tecniche di robotica e Deep Learning per ascoltare e tradurre la comunicazione tra capodogli. In particolare, il progetto prevede un approccio integrato che coinvolga biologia, robotica, Machine Learning e linguistica (Figura 3.2). La ricerca, iniziata ufficialmente nel 2020 con la costituzione dell'omonima organizzazione no profit e tuttora in corso, si svolge principalmente a Dominica, isola nella zona est del mare dei Caraibi.

È un progetto originale, interdisciplinare e scientifico, che coinvolge ricercatori provenienti dai più diversi campi di studio.

Secondo quanto riportato nel sito web del CETI, la missione dell'organizzazione si può riassumere nei tre punti sottostanti.

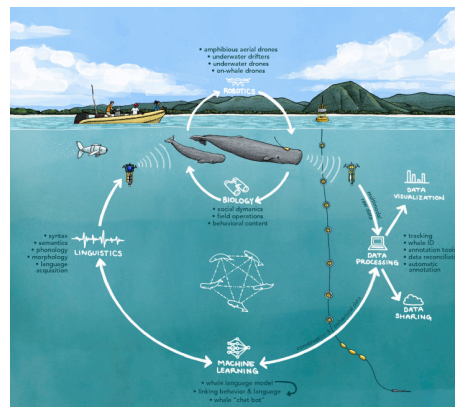


Figura 3.2: Approccio integrato del progetto CETI: biologia, robotica, machine learning e linguistica [26].

1. Avanzare con la ricerca nella comunicazione interspecifica.
2. Trasformare la connessione e comprensione umana nei confronti dei cetacei.
3. Condividere i risultati con il mondo intero.

Il protagonista degli studi e delle ricerche del CETI è il capodoglio, animale dotato di caratteristiche neuroanatomiche altamente sviluppate e capacità cognitive notevoli, il cui linguaggio, come precedentemente visto nel capitolo 2, è costituito da *click*, eccellente modello per gli strumenti avanzati utilizzati dal gruppo di ricerca.

Il progetto è suddiviso in quattro fasi, che vengono espone e spiegate sia nel sito del gruppo di ricerca [38] sia nell'articolo "*Toward understanding the communication in sperm whales*" [26].

### Fase 1

La *Fase 1* è il primo step della ricerca, in cui si cerca di costruire un dataset acustico e comportamentale per poter successivamente insegnare alla tecnologia CETI come osservare la comunicazione dei capodogli nel contesto in cui essi si trovano e, di conseguenza, come tradurre la loro lingua. L'obiettivo è monitorare i movimenti, le abitudini e i suoni emessi dai capodogli, per acquisirne dati importanti e necessari alla ricerca [38].

Attualmente i ricercatori sono impegnati in questa fase.

Il processo di acquisizione dei dati è lungo e ampio, dal momento che avviene nel corso di diversi anni di osservazioni e registrazioni. Vengono usati strumenti autonomi o semiautonomi che operano in continuazione attorno, sotto e sulle balene. Si tratta di attrezzatura non invasiva, in modo da minimizzare l'impatto sugli animali, sia per rispetto del loro valore intrinseco sia per ottenere dati più affidabili.

Questi strumenti (Figura 3.3) sono, per esempio, droni (aerei o acquatici), capaci di registrare audio e video di diversi animali in contemporanea per osservarne i comportamenti e i metodi di comunicazione in gruppo. Vengono anche usati microfoni, registratori subacquei e particolari marcatori che procurano informazioni estremamente dettagliate sulle attività e le interazioni dei



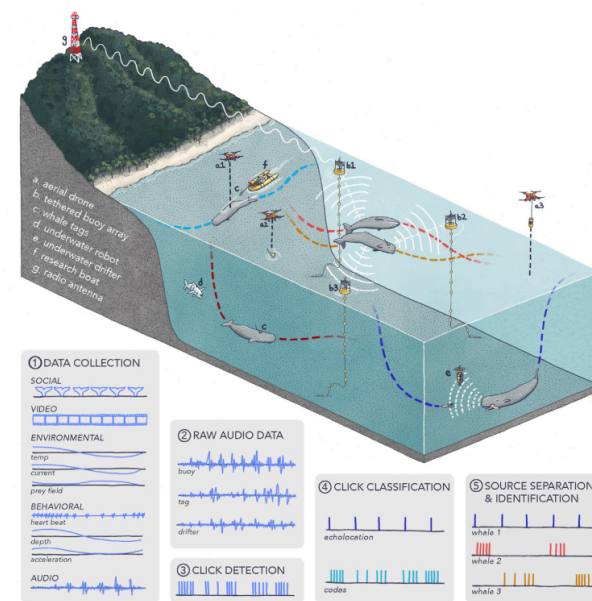


Figura 3.3: Schema della raccolta di dati bioacustici dei capodogli [26].

soggetti dello studio. In particolare vengono usati marcatori ispirati dai tentacoli dei cefalopodi, con dei meccanismi di adesione "a ventosa" [26].

## Fase 2

La *fase 2* prevede l'elaborazione di dati grezzi, come registrazioni di conversazioni, dati sulle abitudini, annotazioni comportamentali [38].

Per quanto riguarda il passaggio di decodifica vero e proprio, gli autori descrivono come il primo passo sia costruire delle unità acustiche di base. È uno step importante, durante il quale non si può rischiare un approccio antropocentrico, perché il linguaggio umano e quello dei capodogli non è uguale. Bisogna, perciò, affrontare il caso con uno studio attento e obiettivo.

Il problema fondamentale è che costruire un inventario di unità fonetiche, lessicali o grammaticali risulta molto più difficile per la comunicazione nelle balene rispetto che per le lingue umane, poiché non sappiamo quali caratteristiche siano significative, come varino o quali unità siano correlate al comportamento. Un modo per far fronte a questo rischio è introdurre, contemporaneamente, dati contesto-specifici, modelli acustici e dati comportamentali dei soggetti di studio. Questo procurerà delle informazioni specifiche per le balene.

Per capire effettivamente cosa significhino le vocalizzazioni, è utile anche riuscire a identificare le unità più brevi e semplici ma significative. Sappiamo che singoli *coda* (che ricordiamo essere serie stereotipate di *click* caratteristici della comunicazione nei capodogli, come precedentemente spiegato al paragrafo 2.1.2) portano informazioni riguardo l'individuo, la famiglia o il clan, ma non conosciamo la funzione di molti di questi *coda*. I dataset bioacustici attualmente a disposizione

sono ancora troppi piccoli per raggiungere questi scopi, perciò l'obiettivo più attuale è quello di acquisire un dataset significativamente maggiore e dettagliato.

#### **Fase 3**

La *fase 3* prevede l'insegnamento ai computer della comunicazione dei capodogli per creare un modello linguistico e collegare i comportamenti al linguaggio, grazie al Machine Learning [38].

Negli ultimi decenni, il ML ha fatto notevoli passi avanti e ha prodotto degli strumenti potenti capaci di manipolare il linguaggio, rendendo perciò possibile la costruzione di modelli di linguaggio umano non supervisionati, capaci di catturare accuratamente molti aspetti fonetici e fonologici, sintassi, struttura della frasi e semantica. La testimonianza del funzionamento del Machine Learning ci è data proprio da parte dei ricercatori del gruppo CETI, nell'articolo "*Deep Machine Learning Techniques for the Detection and Classification of Sperm Whale Bioacoustics*" [37], come descritto nel paragrafo 3.1.2.

Sappiamo che la comunicazione avviene in contesti sociali: questo succede anche nel caso delle balene, il che suggerisce che questo genere di struttura discorsiva sia importante per comprenderne la comunicazione. Per questo, descrivere i protocolli di conversazione delle balene, ossia le regole che decidono quale individuo può parlare e in che momento, è un punto chiave nel comprenderne i discorsi. Inoltre comprenderne i pattern di conversazione significa imparare a costruire un modello predittivo, capace di generare probabili vocalizzazioni quando fornito di dati come conversazioni passate, individui coinvolti, comportamenti e contesto. Questi modelli possono poi essere usati per esprimere intenti comunicativi e permettere studi di playback interattivo. L'uso del linguaggio all'interno di un contesto sociale richiede di considerare la presenza potenziale di una componente pragmatica, il cui significato può derivare dal contesto [26][37].

#### **Fase 4**

La *fase 4*, infine, prevede la validazione di ciò che i computer apprendono. Questo avviene grazie all'utilizzo di studi di playback basati sulla linguistica, l'acquisizione di nuovi linguaggi, la morfologia e la fonologia [38].

Questa fase introduce tre problematiche principali: bisogna capire *cosa* produrre in playback, assicurarsi che ciò che viene prodotto sia *simile ai segnali naturali* e infine non siamo ancora sicuri di poter *comprendere eventuali risposte*.

Gli studi di playback rappresentano un modo attivo per interagire con gli animali e, di conseguenza, possono avere impatti sui comportamenti dei soggetti di studio per minuti, ma anche per ore. Perciò bisogna prevedere dei protocolli di mitigazione dei suoni prodotti o di minimizzazione dell'impatto potenziale sugli individui. Gli scienziati coinvolti nel progetto CETI stanno ancora valutando come attuare questa fase, ma si sa per certo che il primo passo è amplificare il dataset acustico di base. Gli autori, inoltre, sottolineano come sia effettivamente complesso proporre un'analogia tra il linguaggio umano e le vocalizzazioni dei capodogli, dal momento che il linguaggio umano è più facile da analizzare poiché è tipicamente pre-analizzato (ossia già presente sotto

forma di parole o lettere) ed è possibile verificarne l'accuratezza, mentre questo non è possibile nel caso dei capodogli. Perciò dichiarano di aspettarsi che con dataset più grandi sarà più facile scoprire unità di linguaggio significative [26].

L'obiettivo finale di un progetto di questo tipo è di migliorare la comprensione della comunicazione delle balene che, in futuro, potrà essere ulteriormente sviluppata come modello per decifrare altre forme di comunicazione animale non umana.

Attualmente non sono ancora noti esempi particolari che ci dimostrino l'efficacia degli sforzi del progetto (per esempio come si dica "ciao" in balenese), ma sappiamo che il gruppo di ricerca è già stato in grado di classificare i diversi gruppi sociali di capodogli a seconda del loro modo di esprimersi. Si è scoperto che le diverse famiglie condividono un set di *coda* non identificativi che probabilmente sono quelli che vengono usati nel caso di necessità di comunicare tra gruppi distinti. Oltre a questi *coda* condivisi, si sa che ogni gruppo possiede dei *coda* identificativi che vengono usati solamente all'interno di individui appartenenti allo stesso gruppo. Ciò che i ricercatori hanno visto è che, quando diversi gruppi si trovano a distanze relativamente brevi, gli individui iniziano a utilizzare i *coda* identificativi in modo più diffuso, come per evidenziare la propria appartenenza all'uno o all'altro. Allo stesso tempo, se necessario condividere informazioni agli altri gruppi, fanno uso di *coda* non identificativi [39].



# 4

## Implicazioni ecologiche e applicazioni

---

L'utilità di un simile progetto è spiegata dagli stessi componenti del progetto CETI.

Gli sforzi per costruire un metodo comunicativo con i capodogli sono in vista di un'applicazione più vasta, verso altri campi o altri tipi di animali. Uno studio integrale, interdisciplinare e su larga scala della comunicazione dei cetacei porterà necessariamente anche ad avanzamenti nel design di sensori acustici sottomarini, di robot il meno invasivi possibile, di metodi di elaborazione di segnali bioacustici complessi e porterà a migliorare i metodi di Machine Learning per modelli linguistici.

Gli avanzamenti che si otterranno grazie a questo e altri studi porteranno all'apertura di nuove frontiere per la comunicazione interspecifica e porterà a un maggiore apprezzamento e comprensione della complessità e diversità di metodi comunicativi nel mondo naturale [26]. Quello che sembra uno studio "balena-centrico" è in realtà il passo iniziale verso una più vasta comprensione del mondo attorno a noi, una pietra angolare di un palazzo di conoscenza e condivisione, tramite altri progetti già attivi o che potranno in futuro attivarsi grazie alle scoperte del progetto CETI.

È noto che i cetacei soffrono a causa della presenza di suoni sottomarini di origine antropica, specialmente quelli prodotti dal mercato globale via nave. Questo [26] e altri studi, quindi, non hanno il solo obiettivo di comprendere il linguaggio delle balene, ma al contempo studiano come l'inquinamento sonoro ne vada a impattare i comportamenti e la comunicazione. Sono informazioni cruciali nel momento in cui si andranno a sviluppare leggi per la protezione e conservazione delle balene e di altre specie.

Inoltre, nonostante gli oceani e i mari sembrino abbastanza grandi da permettere una convivenza serena fra uomo e animali, sono moltissimi gli animali che, ogni anno, vengono colpiti dalle navi. Di conseguenza, un algoritmo capace di apprendere i suoni e la comunicazione dei cetacei, integrato alla possibilità di riprodurli in modo mirato, potrebbe permettere alle navi di evitare

le loro rotte oppure comunicare agli animali la direzione della barca e il pericolo che corrono avvicinandosi [40].

Vi sono stati altri progetti che si sono occupati di idee simili, come, per esempio, il progetto WHALESAFE nel Mediterraneo, che aveva sviluppato un sistema capace di identificare e tracciare i capodogli con lo scopo di evitare collisioni e altri rischi, mandando segnali di pericolo alle barche circolanti nei paraggi della zona coperta dal progetto [41]. Il progetto purtroppo ha visto la sua fine nel 2018, dopo che una mareggiata ha danneggiato irreparabilmente il sistema a mare che permetteva l'identificazione degli individui.

L'attenzione mediatica che progetti di questo tipo portano al campo della ricerca bioacustica e alla vita marina in generale può essere un modo innovativo per coinvolgere la gente nel mondo della ricerca scientifica che sembra così lontano dalla conoscenza comune, ma che ha bisogno del sostegno di tutti (Figura 4.1).

È, inoltre, importante evidenziare come il progetto CETI, apparentemente fondato sul solo scopo di "*imparare il balenese*", stia in realtà ottenendo una serie di risultati estremamente significativi anche molti altri campi, come per esempio il fatto che il gruppo di ricerca sia riuscito a filmare per la prima volta il parto integrale di un capodoglio.

Il progetto ha dato modo di iniziare uno studio profondo dei capodogli, partendo dalla decodifica del loro linguaggio, ma di conseguenza anche prestando un'attenzione focalizzata sul loro comportamento e le loro abitudini che in passato non erano state approfondite.

Per ora si è solo all'inizio, i ricercatori sono nella cosiddetta *Fase 1*, ma in futuro ci si aspettano molte novità da quest'iniziativa.



Figura 4.1: "Capodoglio ad Andenes", foto di Federico Zuccheri

# Conclusioni

---

Questa tesi si poneva l'obiettivo di spiegare il funzionamento del progetto CETI.

Concludendo, il progetto è attualmente in corso nell'isola di Dominica. La ricerca si basa sull'uso di tecniche di Machine Learning e Deep Learning, che lo stesso gruppo di ricerca ha dimostrato essere funzionali all'obiettivo, ossia decifrare il linguaggio dei capodogli.

Per raggiungere l'obiettivo mancano ancora tempo e ricerca, in primis per il fatto che è necessario, come spiegato precedentemente, allargare il dataset di registrazioni. La ricerca procede giorno dopo giorno, come testimoniato dai costanti aggiornamenti pubblicati dai ricercatori sul sito ufficiale [38] e sui canali social.

Ogni anno, il progetto accoglie studenti da tutto il mondo per fare esperienza e avere aiuto nella ricerca. Spero, un giorno, di poterne avere l'opportunità.

L'iniziativa portata avanti dal CETI è interessante anche per il pubblico: i giornali di tutto il mondo, i canali social e diversi articoli web hanno menzionato il progetto e come questa idea possa veramente rappresentare il punto di svolta nel rapporto uomo-natura.

Per ora sono solamente alla fase 1, ma le prospettive sono altamente positive.





Una delle grandi domande che sorgono da un progetto come questo può essere *cosa si voglia chiedere ai capodogli*, nel momento in cui sarà possibile parlare con loro.

Forse, se riuscissimo a comunicare, la prima cosa che dovremmo dire sarebbe "*scusa*".

Forse, se le balene sapessero parlare, si lamenterebbero del rumore o del traffico, oppure molto più semplicemente direbbero che hanno fame o si sentono sole.

Ma il fatto è che sanno parlare, siamo noi che, per ora, non sappiamo ascoltare.



# Bibliografia

---

- [1] A Berta. *Balene, delfini e focene*. Roma: Nutrimenti, 2021.
- [2] Whale e Dolphin Conservation (WDC). *Whale and dolphin species guide*. URL: <https://uk.whales.org/whales-dolphins/species-guide/>.
- [3] M Uhen. *Going Aquatic: Cetacean Evolution*. URL: <https://www.pbs.org/wnet/nature/ocean-giants-going-aquatic-cetacean-evolution/7577/>.
- [4] G Bianucci e C Sorbini. «La scalinata dell'origine dei cetacei». In: *PLUS-Pisa University Press* (2009), pp. 65–68. DOI: 10.1400/177188.
- [5] KF Liem et al. *Anatomia comparata dei Vertebrati - Una visione funzionale ed evolutiva*. Roma: EdiSES edizioni, 2012.
- [6] GJ Vermeij e R Motani. «Land to sea transitions in vertebrates: the dynamics of colonization». In: *Paleobiology* 44.2 (2018), pp. 237–250. DOI: 10.1017/pab.2017.37.
- [7] C Rovati. *Caratteristiche generali*. URL: <http://www-9.unipv.it/cibra/WEBMUSEOPV/caratteristiche.htm>.
- [8] RE Fordyce. «Neoceti». In: *Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition)*. A cura di WF Perrin, B Würsig e JGM Thewissen. Second Edition. London: Academic Press, 2009, pp. 758–763. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00178-4>.
- [9] A Kaveh e N Farhoudi. «A new optimization method: Dolphin echolocation». In: *Advances in Engineering Software* 59 (2013), pp. 53–70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.03.004>.
- [10] K Ralls e S Mesnick. «Sexual Dimorphism». In: *Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition)*. A cura di WF Perrin, B Würsig e JGM Thewissen. Second Edition. London: Academic Press, 2009, pp. 1005–1011. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00233-9>.
- [11] Ambiente Mare Italia. *Le Balene, patrimonio di diversità*. Ver. 13 marzo 2023. URL: <https://ambientemareitalia.org/le-balene-patrimonio-di-diversita/>.
- [12] R Payne e K Payne. *Songs of the Humpback Whale*. 1970. URL: [https://open.spotify.com/intl-it/album/5h96FX0FTdfJxanqdzoczd?si=WSuIie80Rta4h\\_AR2D11QQ](https://open.spotify.com/intl-it/album/5h96FX0FTdfJxanqdzoczd?si=WSuIie80Rta4h_AR2D11QQ).

- [13] R. Reeves e G. Notarbartolo di Sciara. «The status and distribution of cetaceans in the Black Sea and Mediterranean Sea IUCN Centre for Mediterranean Cooperation». In: *J. Mol. Med.* 78 (2000), pp. 74–80. DOI: 10.1007/s001090000086.
- [14] A. A. Berzin. *The sperm whale*. Moskva: Jerusalem, Israel Program for Scientific Translation, 1972.
- [15] SL Watwood et al. «Deep-diving foraging behaviour of sperm whales (*Physeter macrocephalus*)». In: *Journal of Animal Ecology* 75.3 (), pp. 814–825. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2006.01101.x>.
- [16] D Scandura. «RILEVAZIONE DI PRESENZE DI CAPODOGLI (*PHYSETER MACROCEPHALUS* L. 1758) NEL MAR IONIO». Tesi di dott. 2013.
- [17] Hal Whitehead. «Sperm Whale: *Physeter macrocephalus*». In: *Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition)*. A cura di William F. Perrin, Bernd Würsig e J.G.M. Thewissen. Second Edition. London: Academic Press, 2009, pp. 1091–1097. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00248-0>.
- [18] JW Bradbury, SL Vehrencamp et al. *Principles of animal communication*. Sinauer Associates Sunderland, MA, 1998.
- [19] KM Dudzinski, JA Thomas e JD Gregg. «Communication in Marine Mammals». In: *Encyclopedia of Marine Mammals (Second Edition)*. A cura di William F. Perrin, Bernd Würsig e J.G.M. Thewissen. Second Edition. London: Academic Press, 2009, pp. 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X>.
- [20] WA Watkins et al. «The 20-Hz signals of finback whales (*Balaenoptera physalus*)». In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 82 (1987), pp. 1901–1912. DOI: 10.1121/1.395685.
- [21] G Pavan. «MONITORAGGIO DEL RUMORE SUBACQUEO PER LA PROTEZIONE DEI CETACEI». In: 2014.
- [22] E Garland, A Goldizen e M Rekdahl et al. «Dynamic Horizontal Cultural Transmission of Humpback Whale Song at the Ocean Basin Scale». In: *Current Biology* 21 (2011), pp. 687–691. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.03.019>.
- [23] GK Silber. «The relationship of social vocalizations to surface behavior and aggression in the Hawaiian humpback whale (*Megaptera novaeangliae*)». In: *Canadian Journal of Zoology* 64 (1986), pp. 2075–2080. DOI: 10.1139/z86-316.
- [24] P Nicklen. *Paul Nicklen Photography*. URL: [%7Bhttps://paulnicklen.com/fine-art/%7D](https://paulnicklen.com/fine-art/).
- [25] O Adam, D Cazau e N Gandilhon et al. «New acoustic model for humpback whale sound production». In: *Applied Acoustics* 74 (2013), pp. 1182–1190. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.04.007>.
- [26] J Andreas et al. «Toward understanding the communication in sperm whales». In: *iScience* 25 (2022), p. 104393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104393>.

- 
- [27] J Mann, RC Connor e PL Tyack et al. *Cetacean societies: field studies of dolphins and whales*. Milano: The University of Chicago Press, 2000.
- [28] S Aranzulla. *Come funziona l'intelligenza artificiale*. URL: <https://www.aranzulla.it/come-funziona-lintelligenza-artificiale-1499915.html>.
- [29] G Gullo. *Deep Learning svelato: ecco come funzionano le Reti Neurali Artificiali*. URL: <https://medium.com/professionai/deep-learning-svelato-ecco-come-funzionano-le-reti-neurali-artificiali-f7dced217135>.
- [30] IBM. *Cos'è il deep learning?* URL: <https://www.ibm.com/it-it/topics/deep-learning>.
- [31] Maglietta R et al. «Machine Learning and Image Processing Methods for Cetacean Photo Identification: A Systematic Review». In: *IEEE Access* 10 (2022), pp. 80195–80207. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3195218.
- [32] T Cheeseman e K Southerland. *HappyWhale*. Ver. 2024. URL: <https://happywhale.com/home>.
- [33] Maglietta R, Saccotelli L e Fanizza C et al. «Environmental variables and machine learning models to predict cetacean abundance in the Central-eastern Mediterranean Sea». In: *Sci Rep* 13 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29681-y>.
- [34] KE Frasier. «A machine learning pipeline for classification of cetacean echolocation clicks in large underwater acoustic datasets». In: *PLOS Computational Biology* 17 (2021), pp. 1–26. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1009613.
- [35] AE Nester, JA Thomas e A Acevedo-Guterrez. «The underwater whistle repertoire of wild false killer whales (*Pseudorca crassidens*)». In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 109 (2001), pp. 2390–2390. DOI: 10.1121/1.4744430.
- [36] S Palmero, C Guidi e V Kulikovskiy et al. «Towards automatic detection and classification of orca (*Orcinus orca*) calls using cross-correlation methods». In: *Marine Mammal Science* 39 (2022). DOI: 10.1111/mms.12990.
- [37] PC Bermant, MM Bronstein e RJ Wood et al. «Deep Machine Learning Techniques for the Detection and Classification of Sperm Whale Bioacoustics». In: *Sci Rep* 9 (2019). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48909-4>.
- [38] Project CETI. *Project CETI*. Ver. 2024. URL: <https://www.projectceti.org/>.
- [39] TA Hersh et al. «Evidence from sperm whale clans of symbolic marking in non-human cultures». In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 119 (2022), e2201692119. DOI: 10.1073/pnas.2201692119.
- [40] L Massaron e JP Mueller. *Machine Learning for dummies*. Milano: Hoepli Editore, 2019.

- [41] M Sanguinetti et al. «An automated passive acoustic monitoring system for real time sperm whale (*Physeter macrocephalus*) threat prevention in the Mediterranean Sea». In: *Applied Acoustics* 172 (2021), p. 107650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2020.107650>.