

**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE DIPARTIMENTO**

**SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE**

Corso di Laurea Magistrale

Biologia marina

**Il segnale dell'Antropocene in Artico: la risposta dei Foraminiferi bentonici e l'accumulo di Particelle Sferoidali Carboniose (SCP's).**

The Anthropocene signal in the Arctic: the response of benthic Foraminifera and the accumulation of Carbonaceous Spheroidal Particles (SCP's).

Tesi di Laurea Magistrale di:

**Anna Lisa Vesprini**

Primo relatore: Chiar.mo

**Prof. Anna Sabbatini**

Secondo relatore: Chiar.mo

**Prof. Alessandra Negri**

Correlatore:

**Dott.ssa Francesca Caridi**

Sessione Straordinaria

Anno accademico 2021-2022

# INDICE

## **1. Introduzione**

### 1.1 Antropocene

## **1.2 Antropocene in Artico**

### 1.2.1 Il Mare di Barents: contesto geologico ambientale

### 1.2.2 Arcipelago delle Svalbard

### 1.2.3 Caratteristiche climatiche delle Svalbard

### 1.2.4 Le Caratteristiche storico-economiche delle Svalbard

### 1.2.5 Le Svalbard entrano nell'Antropocene?

### 1.2.6 Il canale di Kveithola

## **1.3 Le particelle Sferoidali Carboniose**

### 1.3.1 Generalità

### 1.3.2 Applicazioni

### 1.3.3 Stato dell'arte dello studio delle particelle sferoidali carboniose e loro applicazioni

## **1.4 Foraminiferi**

### 1.4.1 La tassonomia dei foraminiferi

### 1.4.2 Morfologia

### 1.4.3 Ciclo vitale

### 1.4.4 Studi pregressi dei foraminiferi bentonici nell'area di studio

## **2 Materiali e Metodi**

2.1 Area di campionamento

2.2 Trattamento campioni

2.3 Analisi quantitative della fauna a foraminiferi bentonici

2.4 Protocollo di preparazione e analisi delle particelle sferoidali carboniose  
(SCP's)

2.5 Riconoscimento delle particelle sferoidali carboniose

### **Scopo tesi**

## **3 Risultati**

3.1 Densità e distribuzione verticale nel sedimento delle particelle sferoidali  
carboniose (SCP's)

3.2 Biodiversità e composizione tassonomica dei foraminiferi bentonici

3.3 Abbondanza assoluta e relativa dei foraminiferi bentonici

3.4 Distribuzione dei principali gruppi ecologici

## **4 Discussioni**

## **5 Conclusioni**

## **6 Bibliografia**

## **7 Sitografia**

## **8 Plates**

8.1 Particelle sferoidali carboniose

## 8.2 Foraminiferi bentonici

### **9 Allegati delle matrici**

*Allegato 1:* Dato standardizzato del numero delle sferette totali presenti nella carota 21-5.

*Allegato 2:* Dato standardizzato del numero dei foraminiferi bentonici presenti nella carota 21-5.

*Allegato 3:* Dato in percentuale del numero dei foraminiferi bentonici presenti nella carota 21-5.

# 1. INTRODUZIONE

## *1.1 Antropocene*

Con “Antropocene” ci si riferisce alla particolare epoca geologica in cui stiamo vivendo, nella quale l’uomo è in grado di modificare gli equilibri climatici, geologici, biologici e chimici del pianeta. Il termine, già utilizzato dal biologo Eugene Stoermer a partire dagli anni ’80, iniziò a diffondersi sino a divenire patrimonio comune del lessico geologico (e non solo) grazie a Paul Crutzen, chimico e premio Nobel, che quasi per gioco lo introdusse commentando una comunicazione scientifica durante un convegno nell’ambito del programma internazionale Geosfera-Biosfera in Messico nel febbraio del 2000. D’altronde, risalgono al secolo XIX espressioni quali “Epoca dell’uomo” (Buffon) ed “Era Antropozoica” (Stoppani, Jenkyn e Haughton), utilizzate per evidenziare come il crescente impatto della specie umana potesse essere in grado di definire una vera e propria nuova epoca geologica, con caratteristiche proprie differenti da quelle dell’Olocene. In seguito al successo riscontrato tra gli studiosi presenti al convegno messicano, Crutzen contattò Stoermer e insieme pubblicarono sulla newsletter dell’*International Geosphere-Biosphere Programme* una breve nota (Crutzen e Stoermer, 2000). Nel 2002, poi, l’articolo di una sola pagina sulla rivista *Nature* per spiegare i motivi che rendevano necessaria

l'introduzione di questo termine consacrò e fornì dignità scientifica alla grande popolarità nel frattempo acquisita in tutta la comunità degli studiosi di Scienze della Terra (Crutzen, 2002a).

Tuttavia, da un punto di vista formale la definizione della divisione del tempo geologico è di pertinenza della *International Commission on Stratigraphy* (ICS), la quale sarà chiamata proprio nel marzo di quest'anno (2023) ad esprimersi circa la possibilità di datare a metà del secolo XX l'inizio dell'Antropocene. Precisare il concetto temporale di questa possibile nuova epoca è dunque una questione di grande attualità, e va riconosciuto il merito agli studi geologici pionieristici per aver posto il tema di come potesse essere caratterizzato e definito l'Antropocene (Zalasiewicz et al., 2015). L'umanità, essendo diventata una forza geofisica globale simile ad altre "grandi forze della Natura", ha influito sul funzionamento del Sistema Terra (Steffen et al., 2011) e qualsiasi formale riconoscimento di un'epoca antropocenica nella scala temporale geologica dipende dal fatto che gli esseri umani hanno cambiato sufficientemente il sistema Terra da produrre una firma stratigrafica nel record sedimentario, che è distinta da quella dell'epoca dell'Olocene (Waters et al., 2016). Il numero complessivo di persone presenti sulla terra sta aumentando considerevolmente ogni anno. Più uomini significa un maggiore impatto sull'ambiente: si consumano più risorse, si liberano più sostanze inquinanti e si

aumenta la pressione sul pianeta. Se all'inizio del XXI secolo non vi erano più di 2 miliardi di uomini sul pianeta, oggi, poco più di cento anni dopo, si è passati a oltre 8 miliardi (<https://www.worldometers.info/world-population/>). Riconoscere la presenza di questo "impatto" significa avanzare l'ipotesi di una periodizzazione geologica: mai, nella storia del pianeta Terra, lunga 4,567 miliardi di anni, una sola specie è stata in grado di influenzare da sola le principali dinamiche del pianeta.

Il numero assoluto di uomini è certamente un fattore importante, ma non l'unico utile a determinare l'impatto, ovvero la capacità di influenzare l'equilibrio globale, dell'uomo sulla Terra. Un altro elemento da tenere in considerazione è quello della tecnologia, ovvero, per esempio, l'utilizzo del motore a scoppio, la combustione su larga scala di petrolio, metano, carbone o l'utilizzo di armi da caccia per ciò che concerne la biodiversità.

Secondo l'equazione proposta da Paul Ehrlich e John Holdren, la misura dell'impatto dell'uomo sulla Terra è ricavabile da una moltiplicazione a tre fattori, il celebre modello IPAT:  $I=P \times A \times T$ , dove I sta per Impatto, P per Popolazione, A per Affluenza (ovvero l'uso pro capite delle risorse terrestri), T per Tecnologia (Ehrlich e Holdren, 1971).

Per comprendere meglio la storia dell'Antropocene può essere utile ricordare brevemente il processo evolutivo, cominciato circa sei milioni di anni fa, che

ha portato alla comparsa di *Homo sapiens* circa 200.000 anni fa. Per ben oltre il 90% dei suoi anni di storia (Pleistocene), è esistito solamente come cacciatore-raccoglitore e già durante questo periodo la sua presenza ha avuto un impatto sull'ambiente attraverso l'utilizzo del fuoco e la caccia di megafauna (Steffen et al., 2011). L'acquisizione della posizione eretta (circa 4,4 milioni di anni fa) ha permesso ai nostri antenati di spostarsi su lunghe distanze e dopo un lungo processo di migrazioni, *Homo sapiens* giunse già poco dopo l'inizio dell'Olocene (10.000 anni fa circa) a colonizzare tutti i continenti tranne l'Antartide e le isole a sud del Pacifico, raggiungendo una popolazione stimata intorno alle 2 milioni di unità (Waters et al., 2016).

Ci si è chiesti, e su questo il dibattito è ancora aperto, a quale preciso momento dell'evoluzione dell'uomo si debba far risalire l'inizio dell'Antropocene. Alcuni hanno proposto le estinzioni dei grandi mammiferi (come il mammut) e degli uccelli inetti al volo, verificatesi tra i 50.000 e i 10.000 anni fa a causa dell'azione dei cacciatori pleistocenici (Sandom et al., 2014); altri l'avvento dell'agricoltura e dell'allevamento (dagli 11.000 ai 3.000 anni fa circa) (Diamond, 2004); altri ancora la scoperta dell'America da parte di Cristoforo Colombo (1492) (Mann, 2011); l'avvio della rivoluzione in generale (XVIII-XIX secc.) e l'invenzione della macchina a vapore da parte di James Watt nel 1784 in particolare (Crutzen, 2002b); l'inizio della costruzione della



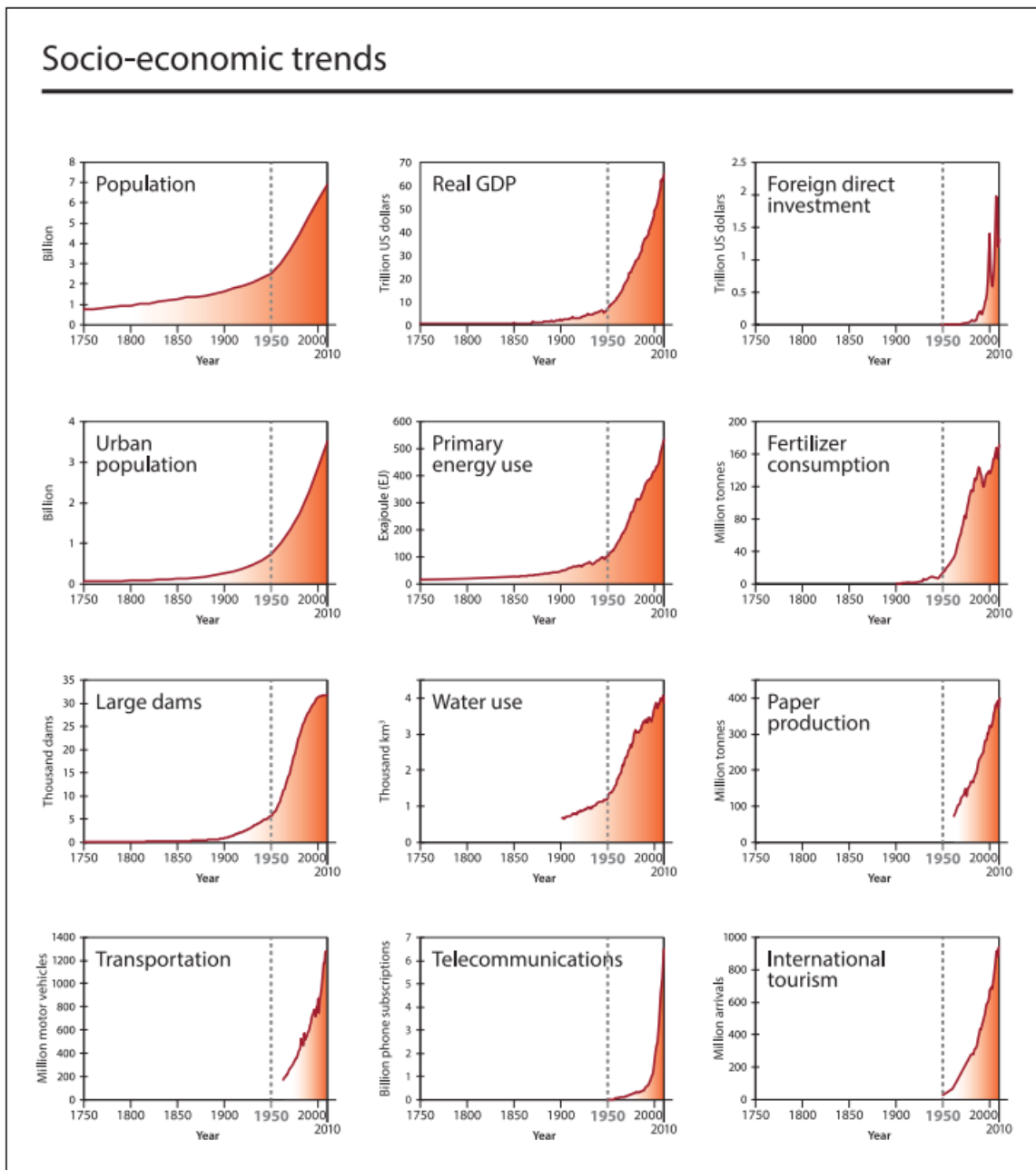
Metropolitana di Londra nel 1863 e il conseguente sviluppo dei centri urbani (Williams et al., 2013); e, infine, la Grande Accelerazione (*Great Acceleration*), ovvero quel processo di allargamento indefinito dell'influenza dell'uomo sulla natura e sull'ambiente attraverso l'esplosione dei processi di accumulazione di risorse, di crescita della popolazione, di crescita dell'utilizzo energetico, di distruzione di ecosistemi e forme di vita, di espansione abnorme dei complessi urbani avvenuto a partire dal 1945 circa (Steffen et al., 2015; McNeill e Engelke, 2016), in coincidenza anche con lo scoppio della prima bomba nucleare, avvenuto il 16 luglio 1945 presso Alamogordo, New Mexico (Zalasiewicz et al., 2015).

I criteri per valutare l'esattezza o meno delle varie ipotesi sono giustamente demandati alla geologia, e in particolare allo studio della stratigrafia. Così come per definire il passaggio da un qualsiasi intervallo geologico ad un altro, c'è bisogno di individuare un marker presente nei sedimenti che sia correlabile ad altri sedimenti nel resto del mondo.

L'ipotesi al momento più accreditata tra gli studiosi è quella dell'Antropocene "recente", facendo risalire il suo inizio nella seconda metà del XX secolo. Alcune evidenze sembrano deporre a favore di questa proposta.

In primo luogo, i 12 indicatori "per l'impresa umana" descritti da Steffen et al., nel 2015 (Figura 1) registrano un aumento esponenziale della popolazione

umana, del consumo di risorse, dell'emissione di gas a effetto serra e di rifiuti di vario tipo a partire dagli anni '50 del Novecento.



**Figura 1:** Andamento degli indicatori di “impresa umana”. Ogni elemento considerato mostra un incremento repentino dopo il 1950. (Steffen et al., 2015)

Sembra inoltre iniziare proprio in questo periodo la sesta estinzione di massa con la scomparsa di migliaia di specie animali e vegetali ogni anno: una perdita di biodiversità dalle dimensioni impressionanti e che ha luogo in un tempo molto breve da un punto di vista geologico (Kolbert, 2014; Dirzo et al., 2014).

Come marker stratigrafici di inizio di questa nuova epoca, sono stati proposti vari possibili candidati (Figura 2). Tre, in particolare, sembrano quelli più convincenti: il fallout nucleare, che, a seguito dello sgancio di numerose bombe atomiche a partire dal 1945, può essere facilmente registrato e misurato con precisioni negli anelli degli alberi e nei sedimenti marini grazie alla presenza di radionuclidi artificiali (Zalasiewicz et al., 2015; Waters et al., 2015); le plastiche e microplastiche, rilevabili nei sedimenti e onnipresenti nei mari e negli oceani (Zalasiewicz et al., 2015; Ivar do Sul e Labrenz, 2021); le particelle sferoidali carboniose (SCP's), generate dalla combustione incompleta di combustibili fossili a temperature superiori ai 1000°C (Rose, 2015; Swindles et al., 2015).

I marker stratigrafici significativi vengono definiti anche “*golden spike*”. Andando più nello specifico, il sistema stratigrafico è un sistema gerarchico nel quale la suddivisione principale è quella degli eoni, al cui interno si suddividono le ere, dentro a queste i periodi e all'interno dei periodi le epoche.

I geologi hanno proposto un criterio secondo il quale la transizione da un'epoca all'altra è osservabile attraverso un marcatore presente nei sedimenti che sia correlabile ad altri sedimenti nel resto del mondo. Essendo rintracciabile ovunque, questo particolare tipo di marcatore viene chiamato “chiodo d'oro” (*golden spike*). Un chiodo d'oro deve avere una serie di caratteristiche:

- essere facilmente accessibile,
- deve essere consentita la ricerca scientifica nell'area in cui si trova,
- essere sufficientemente ampio per poter ipotizzare un accesso futuro (non deve essere a rischio seppellimento),
- essere correlabile stratigraficamente con altre località del mondo,
- avere un orizzonte databile radiometricamente al suo limite,
- mostrare caratteristiche tali che permettano di identificarne il limite in qualunque parte del mondo.

Naturalmente non sempre si riesce a soddisfare tutte queste condizioni, e il riconoscimento di un chiodo d'oro rispetto all'altro è ancora oggi oggetto di dibattito tra i geologi che se ne occupano. (Waters, 2018; Padoa-Schioppa, 2021). Oltre ai tre possibili markers citati, molti altri ne sono stati proposti negli ultimi anni per l'inizio dell'Antropocene. Le ipotesi sono numerose e per ragioni di spazio non possono essere tutte elencate e discusse in questa sede. Ad ogni modo, possono essere individuate tre macro-categorie:

1. Nuovi materiali, ovvero recenti depositi antropici che contengono nuovi minerali e nuove tipologie di roccia e che riflettono la rapida diffusione globale di “tecnofossili” come appunto radionuclidi, plastica, ma anche alluminio elementare, cemento, fibre sintetiche (Waters et al., 2016).

2. Markers geochimici: solfati, piombo, metalli pesanti, metano, azoto, fosforo e biossido di carbonio (la CO<sub>2</sub>) sono tutti segnali significativi dell’impatto dell’uomo, capaci di evidenziare il passaggio all’Antropocene (Lewis e Maslin, 2015). Un ruolo particolarmente rilevante è quello della CO<sub>2</sub> e del metano, considerati dalla comunità scientifica tra i principali fattori del cambiamento climatico in quanto gas serra. I gas serra sono sia di natura antropogenica che naturale. I gas serra naturali comprendono il biossido di carbonio (CO<sub>2</sub>), il vapore acqueo (H<sub>2</sub>O), l’ossido nitroso (N<sub>2</sub>O), il metano (CH<sub>4</sub>) e l’ozono (O<sub>3</sub>). Alcune attività dell’uomo, oltre ad aumentare il livello di tutti questi gas, liberano nell’aria anche altri gas serra quali l’esafluoruro di zolfo (SF<sub>6</sub>), gli idro-fluoro-carburi (HFC) e i per-fluoro-carburi (PFC). La combinazione di questi gas in atmosfera accelera il cambiamento climatico, che di per sé è un processo naturale e inevitabile. La concentrazione della CO<sub>2</sub> in atmosfera ora supera i 400 ppm ed è stata emessa tra il 1999 e il 2010 ad una velocità 100 volte maggiore rispetto all’ultima fase glaciale, dove le emissioni erano state pure molto rapide. Le concentrazioni hanno superato i livelli

naturali dell'Olocene almeno a partire dal 1850 d.C. (Waters et al., 2016). Concentrazioni che hanno superato l'optimum riguardano anche un altro composto chimico, il metano (CH<sub>4</sub>). Il CH<sub>4</sub> antropico deriva principalmente dall'agricoltura (coltivazioni umide di riso e ruminanti) con una frazione minore derivante da combustione di biomassa e di combustibili fossili. Anche alcuni grandi depositi antropici terrestri, come le discariche, ne emettono notevoli quantità. A differenza della CO<sub>2</sub>, il metano (CH<sub>4</sub>) è chimicamente reattivo in atmosfera ed ha come serbatoio dominante l'ossidazione da parte dei radicali OH. Questo processo rimuove circa il 90% di tutte le emissioni di metano ogni anno, circa il 9% del carico totale. Il CH<sub>4</sub> ha una vita atmosferica che va dai 7 agli 11 anni. Entrambi, sia la CO<sub>2</sub> che il CH<sub>4</sub>, forniscono un marker stratigrafico diretto nel momento in cui vengono preservati all'interno delle bolle d'aria nel ghiaccio glaciale e un record indiretto attraverso le variazioni dell'isotopo del carbonio (<sup>13</sup>C) (Lewis e Maslin, 2015).

3. Markers biotici: includono microplancton come foraminiferi, coccoliti, dinoflagellati e radiolari nel regno marino. Questi organismi, così come i macroinvertebrati (per esempio i molluschi), i vertebrati e le piante (sia resti di macropianta che polline) possono essere utili strumenti biostratigrafici per la correlazione in quanto preservano geologicamente parti dure come scheletri, frustuli, conchiglie o fitoliti (Waters et al., 2018).

Lo sviluppo dell'agricoltura e dell'allevamento ha portato ad un massiccio aumento della quantità di resti faunistici di specie addomesticate depositate in discariche e altri contesti stratigrafici terrestri dalla metà del XX secolo in poi (Waters et al., 2018).

Evento	Data	Estensione geografica	Marcatore stratigrafico primario	Data potenziale GSSP*	Potenziati stratotipi ausiliari
Estinzione della megafauna	50.000–10.000 anni BP	Quasi globale	Megafauna fossile	Nessuno, diacronico oltre ~ 40.000 anni	Carbone in depositi lacustri
Origine dell'agricoltura	~ 11.000 anni BP	Sud-ovest asiatico, diventando globale	Polline fossile o fitoliti	Nessuno, diacronico oltre ~ 5.000 anni	Polline di colture fossili, fitoliti, carbone
Agricoltura estensiva	~ 8.000 anni A PARTIRE da oggi	Evento eurasiatico, impatto globale	Inflessione di CO <sub>2</sub> nel ghiaccio del ghiacciaio	Nessuno, inflessione troppo diffusa	Polline di colture fossili, fitoliti, carbone, minerali ceramici
Produzione di riso	6.500 anni BP ad oggi	Evento del sud-est asiatico, impatto globale	Inflessione CH <sub>4</sub> nel ghiaccio del ghiacciaio	5.020 anni BP CH <sub>4</sub> minimi	Asce di pietra, resti fossili di ruminanti domestici
Suoli antropogenici	~ 3.000–500 anni BP	Evento locale, impatto locale, ma diffuso	Terreno scuro e ricco di sostanza organica	Nessuno, diacronico, non ben conservato	Polline di colture fossili
Collisione tra Nuovo e Vecchio Mondo	1492–1800	Evento eurasiatico-americano, impatto globale	Punto basso di CO <sub>2</sub> nel ghiaccio del ghiacciaio	1610 Minimi di CO <sub>2</sub>	Polline fossile, fitoliti, carbone, CH <sub>4</sub> , speleotemi δ <sup>18</sup> O, tefrat
Rivoluzione industriale	1760 ad oggi	Evento dell'Europa nord-occidentale, impatto locale, che diventa globale	Ceneri volanti dalla combustione del carbone	~ 1900 (rif. 94); diacronico oltre ~ 200 anni	Rapporto <sup>14</sup> N: <sup>15</sup> N e composizione di diatomee nei sedimenti lacustri
Detonazione di armi nucleari	1945 ad oggi	Eventi locali, impatto globale	Radionuclidi ( <sup>14</sup> C) negli anelli degli alberi	1964 <sup>14</sup> C picco§	<sup>240</sup> Pu: rapporto <sup>239</sup> Pu, composti da cemento, plastica, piombo e altri metalli
Prodotti chimici industriali persistenti	~ 1950 ad oggi	Eventi locali, impatto globale	Ad esempio, SF <sub>6</sub> picco nel ghiaccio del ghiacciaio	Picchi spesso molto recenti, quindi difficili da datare con precisione§	Composti da cemento, plastica, piombo e altri metalli

**Figura 2:** Potenziali date di inizio dell'Antropocene. (Lewis e Maslin, 2015)

### 1.2 L'Antropocene in Artico

Il Mar Glaciale Artico è considerato dagli studiosi un “laboratorio dell'Antropocene” (Finger, 2016), in quanto le temperature in questo areale sono aumentate negli ultimi decenni molto più rapidamente che altrove (Rantanen et al., 2022).

L'area di studio d'interesse per questo lavoro di ricerca è il Mare di Barents, da dove è stata prelevata la carota PS99.1/21-05 (74° 52.40'N; 17° 21.60'E) - Multicorer-305.4 oggetto delle analisi svolte.

### ***1.2.1 Il Mare di Barents: contesto geologico-ambientale***

Il Mare di Barents è la parte del Mar Glaciale Artico localizzata a nord della Norvegia e della Russia, delimitato a ovest dal mare di Norvegia, a nord-ovest dalle isole Svalbard, a nord-est dalle isole della Terra di Francesco Giuseppe e a est dalle isole della Novaja Zemlja e Vajgač. Si estende su un'area con una superficie di 1,4 milioni di chilometri quadrati e misura 1300 chilometri di lunghezza da nord a sud. Prima di assumere questa denominazione nel 1653 in onore dell'esploratore Willem Barents (protagonista dei primi viaggi moderni nelle latitudini più settentrionali), era conosciuto in età medievale come "mare di Murman".

Ha una profondità media di soli 230 metri. Un mare, dunque, generalmente molto basso, anche se in alcune zone la profondità raggiunge i 600 metri.

Il mare di Barents è noto per l'abbondanza di specie di flora e fauna e per il suo interesse economico. La salinità varia da un massimo di 35 psu (nella parte sudoccidentale), a un minimo di 32 psu (nella parte settentrionale).



Per quanto riguarda il clima, quello predominante nella regione è di tipo subartico. Essendo nelle zone prossime al polo nord, le temperature medie in inverno sono di  $-25^{\circ}\text{C}$  nella zona più settentrionale e di  $-8^{\circ}\text{C}$  nelle zone più vicine al continente. Anche in estate si hanno temperature molto basse, che si aggirano intorno a  $0^{\circ}\text{C}$  nella zona settentrionale e  $10^{\circ}\text{C}$  nella parte più vicina al continente. Le zone più settentrionali sono permanentemente ghiacciate, con la presenza di ghiaccio pluriennale. Le aree costiere meridionali e occidentali, invece, sono interessate dalla corrente del Golfo, la quale, trasportando masse di acqua calda da ovest, mantiene una temperatura tale da evitare la glaciazione delle acque.

In generale, le condizioni fisiche sono determinate da tre principali masse d'acqua: acqua costiera, acqua atlantica (settentrionale) e acqua artica. Queste tre masse d'acqua sono collegate a tre diversi sistemi di corrente: la corrente costiera norvegese, la corrente atlantica e la corrente artica. (Loeng, 1991).

È un mare interessato da evidenti problemi ecologici:

- 1) l'intensa navigazione commerciale che comprende un forte traffico di petroliere;
- 2) l'attività di pesca è molto intensa in quanto le acque del Mare di Barents sono tra le più ricche di fitoplancton, alla base della catena alimentare marina;

3) i rischi riguardanti la contaminazione radioattiva data dalla presenza nelle acque costiere di numerosi sommergibili nucleari in disarmo o semiaffondati. Si tratta di problemi ecologici che derivano dal forte impatto antropico e sono pressioni che portano inevitabilmente ad uno sbilanciamento dei fragili equilibri di questo mare. (Klungsoyr et al., 1995).

### ***1.2.2 L'arcipelago delle Svalbard***

Le Svalbard rappresentano un campo di studio estremamente interessante per gli aspetti geologici-ambientali, dal momento che tutte le principali ere e sistemi, dal precambriano al quaternario, vi sono rappresentate, compresi vulcani estinti e sorgenti di acqua calda. L'arcipelago, situato nel Mare di Barents tra i 74° e gli 81° di latitudine, è composto da una moltitudine di isole e isolette estese per poco più di 61.000 kmq (la maggiore, Spitsbergen, ha una superficie di circa 39.000 kmq). Sono state scoperte casualmente nel 1596 dall'esploratore olandese Willem Barents nel tentativo di trovare un percorso che permettesse di raggiungere l'Estremo Oriente passando a nord dell'Europa e dell'Asia, il cosiddetto passaggio a nord-est (De Veer, 1598).

### ***1.2.3 Le caratteristiche climatiche delle Svalbard***

Le caratteristiche climatiche dell'intero arcipelago delle Svalbard sono strettamente connesse alla corrente di Spitsbergen occidentale (CSO), una corrente oceanica facente parte di una diramazione nord della corrente Nord-Atlantica. La corrente di Spitsbergen occidentale convoglia acqua proveniente dall'Atlantico ( $3^{\circ}\text{C}$  e salinità  $> 34,6$  psu; Svendsen et al., 2002) che fluisce verso nord attraverso la sezione orientale dello stretto di Fram, favorendo l'incremento nella regione delle temperature e dell'umidità. Sulla piattaforma continentale, l'acqua artica, fredda e con minore salinità ( $<0^{\circ}\text{C}$ , e salinità  $< 34,4$  psu; Loeng, 1991), derivante dalla fusione dei ghiacciai, scorre lungo i margini esterni dell'arcipelago delle Svalbard attraverso la corrente costiera fino a raggiungere l'estremo sud dell'isola di Spitsbergen per poi fluire verso nord.

Le acque polari provenienti dall'Oceano Artico raggiungono il nord Atlantico subpolare attraverso due percorsi: corrente della Groenlandia orientale (CGO) e corrente del Labrador (CL). La corrente del Labrador scorre verso sud lungo il lato ovest del Mare del Labrador, corrente della Groenlandia orientale scorre attraverso lo stretto di Fram verso sud lungo la piattaforma della Groenlandia orientale e infine attraverso lo stretto di Danimarca nel subpolare Atlantico settentrionale. Queste correnti fungono da importante rotta per il trasporto verso sud di acqua fredda e dolce tra l'Artico e il Nord Atlantico subpolare (Majewski et al., 2009).

#### ***1.2.4 Le caratteristiche storico-economiche delle Svalbard***

Già dagli anni immediatamente successivi alla scoperta (1596), le Svalbard divennero un'importante base per la caccia ai trichechi e alle balene. L'isola più meridionale, Bjørnøya ("Isola degli Orsi"), fu interessata sin dal 1604 da spedizioni venatorie che portarono nel giro di alcuni decenni all'estinzione locale dei trichechi. Più continuo e cospicuo fu invece lo sfruttamento delle balene artiche, da cui si ricavava carne, grasso, ossa e fenoni. Oltre che come alimento, le balene erano ricercate per l'utilizzo del grasso come olio da combustione, mentre fenoni e ossa venivano impiegati nel settore tessile.

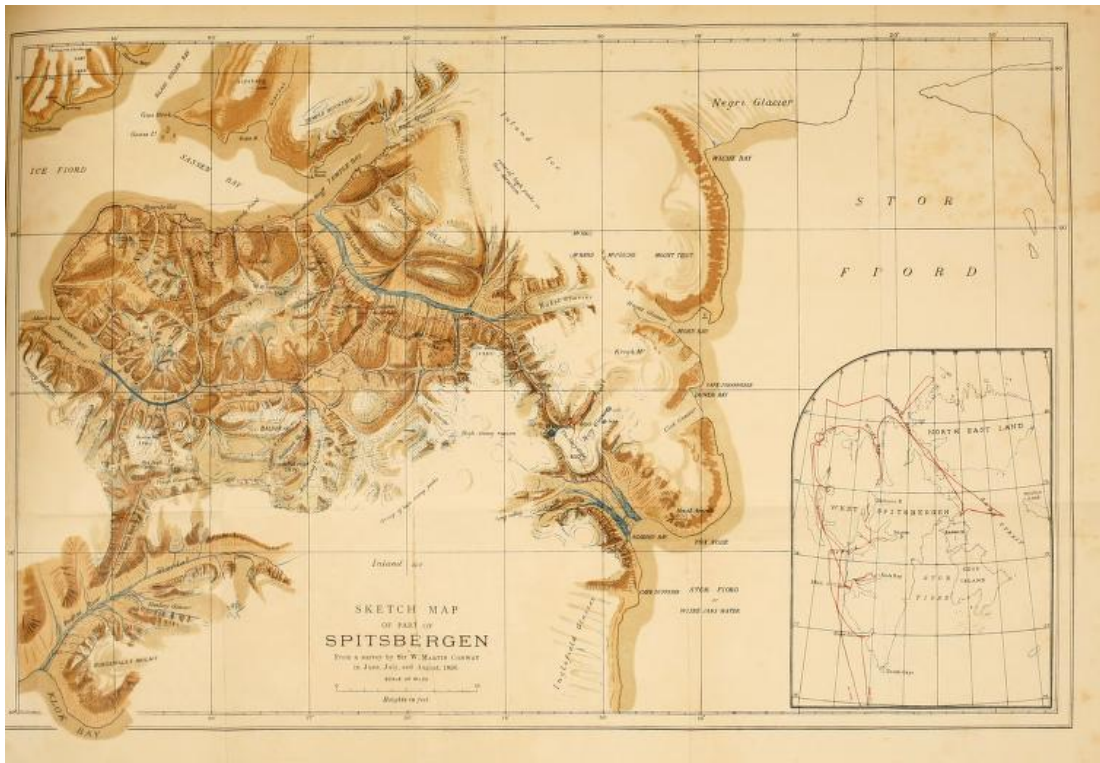
A partire dal 1611 fino alle ultime decadi del secolo XVIII frequenti spedizioni di baleniere di vari Paesi solcarono i mari delle Svalbard in cerca di questo mammifero commercialmente prezioso. Lo sfruttamento delle risorse nei secoli non si limita tuttavia solo a quelle marine: parallelamente alle baleniere, con crescente intensità a partire dal XIX secolo e per buona parte del XX, l'arcipelago diventa terreno di caccia anche per ciò che concerne gli animali terrestri che avevano e hanno il loro habitat nelle isole.

Orsi polari, foche, volpi artiche: le Svalbard diventano una sorta di *far-west* dove, in assenza di ogni regola e di ogni autorità statale intenzionata a limitare

i prelievi, viene messa in atto una caccia indiscriminata, spinta dalle alte quotazioni delle pellicce.

Ad ogni modo, nonostante le spedizioni venatorie, fino al XX secolo non si dà luogo a una vera e propria colonizzazione delle Svalbard. Non ci sono città, al massimo piccoli insediamenti temporanei, stazioni o villaggi come quello di Smeerenburg, forse il più celebre dell'epoca preindustriale. Inoltre, la navigazione a motore, inventata a cavallo tra il XVIII e il XIX secolo, interessa in modo significativo l'arcipelago solo a partire dal Novecento. Ancora durante tutto il secolo XIX, infatti, le Svalbard, specialmente nelle aree più interne, sono ancora sostanzialmente inesplorate. Le prime spedizioni scientifiche capaci di produrre rilievi topografici e informazioni più certe risalgono alla seconda metà del Settecento. In particolare, va ricordata la spedizione russa Čičagov avvenuta tra il 1764 e 1766, cui fecero seguito altre condotte da esploratori scandinavi e britannici. Se, infatti, le frequenti navigazioni delle baleniere e delle imbarcazioni di cacciatori permettevano di approfondire la conoscenza della costa, portando già attorno al 1650 alla chiara definizione di Spitsbergen come isola (inizialmente la si riteneva una mera propaggine della Groenlandia), per quanto riguarda l'entroterra saranno solo le ricognizioni avvenute tra la fine del XVIII e il XIX secolo a sostituire i numerosi "*hic sunt leones*" con nozioni più precise relative alla geomorfologia dei luoghi.

Basti pensare che la prima descrizione a poter essere considerata come davvero sistematica e dettagliata dell'isola principale non è anteriore al 1897, data di pubblicazione del volume “*The first crossing of Spitsbergen*” di Sir William Martin Conway, libro nel quale confluiscono le osservazioni emerse dalla spedizione guidata dallo stesso Conway tra 1896 e 1897 e che contiene la prima mappa completa delle Svalbard (Figura 3). Nonostante siano certamente numerose le spedizioni scientifiche ottocentesche (solo la Svezia ne inviò circa una decina), tra le quali vanno ricordate quelle di Mathias Baltazar Keilhau (1827) e Sven Lovén (1837), il testo di Conway, particolarmente articolato, può rappresentare una fotografia sufficientemente nitida delle Svalbard alle soglie del Novecento.



**Figura 3:** Prima mappa delle Svalbard, contenuta nel volume “*The first crossing of Spitsbergen*” di Sir William Martin Conway (1897)

Un arcipelago che risulta ancora sostanzialmente disabitato, fatta eccezione per alcuni cacciatori russi semi-stanziali. Una “*no-man’s land*”, non annessa a nessuno Stato e non governata da nessuna legge, che per questa anarchia derivante dallo status di *terra nullius* risultava già all’epoca svuotata delle proprie risorse ittiche da un secolare *overfishing*. (Conway, 1897)

Dunque, a fine secolo, seppur non si registrino ancora significative tracce di inquinamento derivanti da attività umane, troviamo già quelle condizioni di fragilità “politica” che avrebbero poi permesso uno sfruttamento selvaggio del

territorio, allo stesso modo in cui era stato precedentemente eroso e quasi svuotato il patrimonio di ricchezza marina in termini di stock ittici (Kruse, 2016). Non essendo ancora popolato da insediamenti umani di una qualche rilevanza, non essendo ancora transitato da rotte commerciali, risultando al contrario poco visitato e poco attraversato dai percorsi più battuti della incipiente navigazione a motore, l'arcipelago viveva in una sostanziale estraneità rispetto alle dinamiche produttive dei continenti eurasiatico e nordamericano, dove era già da tempo avviata e anzi ormai in fase matura l'epoca della rivoluzione industriale.

Il vero cambiamento, la vera accelerazione dell'attività antropica, con tutto il portato di inquinamento connesso, va situata all'inizio del XX secolo ed è legata all'estrazione mineraria, che diventa, a partire dai primi decenni del Novecento, la principale fonte di ricchezza economica delle isole, attirando lavoratori, operai, persone in cerca di fortuna e facendo delle Svalbard il terminale di un intenso traffico merci via mare incentrato sul trasporto del carbone (e non solo).

Già nella seconda metà del secolo XIX erano stati attuati i primi tentativi di insediamento industriale, ma con scarso successo e incisività. La presenza di carbone era stata rilevata già nel XVIII secolo; d'altronde, i giacimenti erano a volte addirittura visibili in quanto affioranti sulla terraferma.



Oltre a filoni di carbone, erano noti anche quelli di altri minerali, quali la galena o la fosforite, che fu oggetto di un primo tentativo di sfruttamento, presto abortito, da parte dello svedese Alfred Gabriel Nathorst sull'Isfjorden (isola di Spitsbergen) nel 1872.

Nel contesto della elevata e sempre crescente domanda internazionale di energia generata dalla rivoluzione industriale per sostenere le attività produttive, i trasporti, la produzione di energia e calore, il carbone era certamente il materiale più redditizio e con più mercato.

I giacimenti presenti sull'arcipelago cominciarono ad essere sfruttati tramite cavature artigianali su scala molto ridotta già dai balenieri e cacciatori durante le loro permanenze temporanee, senza tuttavia inizialmente dare vita a un vero e proprio uso commerciale.

Nell'isola di Bjørnøya, il primo tentativo di cavare carbone risale al 1898, quando l'ingegnere tedesco Theodor Lerner provò senza successo a sondare la zona intorno a Kvalrossbukta. Una piccola miniera, la "Bjørnøen A/S", venne installata presso il primo (e unico) vero insediamento dell'isola, il villaggio di Tunheim. Questa impresa ebbe però vita breve: fondata nel 1916, la miniera cessò ogni attività già nel 1925. Nel 1941, infine, a causa del conflitto bellico, il villaggio venne distrutto dall'esercito alleato (<https://www.npolar.no/en/themes/bjornoya/>).

Con l'avvento del XX secolo, le attività estrattive andarono intensificandosi e l'estrazione del carbone assunse un carattere schiettamente industriale, inserito nel circuito del commercio internazionale.

Pioniere in questo senso fu il norvegese Søren Zachariassen, il quale, nel 1903, anche grazie a finanziamenti da parte di compagnie statunitensi, riuscì a trasformare l'estrazione artigianale praticata già da alcuni anni in una vera e propria miniera con tecnologie industriali ad elevata capacità situata a Hotellneset, sull'Isfjorden.

Zachariassen aveva potuto constatare l'abbondanza e il valore del carbone cavando nel 1899 a Bohemanneset circa 600 kg di materiale, prontamente trasportato e rivenduto in patria a Tromsø (<https://polarhistorie.no/personer/Zachariassen,%20Soren.html>).

A seguito di queste prime esperienze imprenditoriali, che mostrarono un discreto successo, si moltiplicarono ben presto tentativi simili: alcuni, con scarsi o comunque non duraturi esiti; altri, destinati a segnare per decenni l'economia e la società dell'arcipelago.

In assenza di una giurisdizione univoca nella “*no-man's land*” delle Svalbard, gli Stati interessati allo sfruttamento minerario suddivisero autonomamente alcune “sfere di influenza”: i britannici, per esempio, iniziarono ad estrarre in

quella che sarebbe poi diventata Advent City; gli olandesi nella odierna Barentsburg; i russi a Grumant; gli statunitensi sul territorio di Longyearbyen, città così denominata in onore dell'imprenditore americano John Munro Longyear; i norvegesi sull'isola di Bjørnøya nel periodo 1916-1925, con il piccolo villaggio di Tunheim, che tuttavia non superò mai il numero massimo di 250 abitanti, per rimanere poi per sempre disabitato (come il resto dell'isola, fatta eccezioni per i pochissimi lavoratori della stazione metereologica) e infine distrutto nel 1941

(<https://placenames.npolar.no/Bj%C3%B8rn%C3%B8ya/Svalbard>).

La compagnia "Arctic Coal" iniziò ad operare a Longyear City nel 1906, dando impulso a quello che sarebbe divenuto ben presto, ed è tuttora, il centro abitato più popoloso dell'isola, con tutte le caratteristiche di una città.

In questi anni viene fondata anche la città di Pyramiden, oggi semi-abbandonata e celebre come esempio di architettura sovietica: dopo essere stata una colonia svedese dalla sua creazione (1910) fino al 1926, passò infatti ad una compagnia mineraria russa che costruì alloggi e strutture per i lavoratori lì impiegati. L'insediamento di Pyramiden è stato dismesso dalla Russia nel 1998, ma fino ad allora arrivava ad ospitare oltre 1.500 persone, costituendo il principale polo abitativo della comunità russa, oggi ridotta a poche centinaia di unità, ma per molti decenni prevalente nell'arcipelago, giungendo a toccare quota 2407 nel

1990 (<https://www.thearcticinstitute.org/changing-nature-russia-arctic-presence-case-study-pyramiden/>).

La rapida antropizzazione causò il transito sempre più frequente di imbarcazioni a motore e tutti i fenomeni tipici dell'impatto umano.

Questa sregolata e vorticosa crescita comportava un numero sempre maggiore di rivendicazioni proprietarie su questo o quel territorio dell'arcipelago da parte di privati e Stati. Parallelamente, con l'acuirsi delle tensioni internazionali sfociate nel primo conflitto bellico mondiale (1914-1918), emergeva con sempre più forza la necessità di un quadro più chiaro che chiarisse di chi fossero infine le Svalbard e quali norme ne dovessero regolare le complesse dinamiche economico-sociali.

Il Trattato delle Svalbard, firmato a Parigi il 9 febbraio 1920 nel contesto degli accordi di pace di Versailles, giunse finalmente a dichiarare la sovranità norvegese (pur con limitazioni) sull'arcipelago, che rimase sì un crocevia di popoli e potenze, ma con una identità più definita.

A questi anni vanno fatte risalire anche le prime esplorazioni per ricercare gas e petrolio nell'arcipelago, nessuna delle quali ebbe tuttavia esito positivo.

Nel 1925 il Trattato divenne operativo e la Norvegia prese possesso delle Svalbard, proseguendo sulla strada dello sviluppo industriale di un territorio sempre più strategico anche per la ricerca scientifica, per l'esplorazione polare,

per le infrastrutture civili e militari, per le direttrici del commercio internazionale.

### ***1.2.5 Le Svalbard entrano nell'Antropocene?***

Viste le considerazioni precedenti risulta evidente una pressione antropica nella zona artica. Con l'inizio dello sfruttamento delle miniere, ovvero a partire dai primi anni del XX secolo, possiamo affermare che le Svalbard entrano a pieno titolo in quel processo di cambiamento economico e sociale in cui l'Europa continentale si trovava immersa già da oltre un secolo.

Come mostrato, questo territorio ancora sostanzialmente vergine, inesplorato, con una bassissima interazione rispetto all'elemento antropico, diviene in un tempo relativamente breve sede di attività estrattive, insediamenti umani, città, porti commerciali. I mari attorno alle isole iniziano a essere solcati sempre più frequentemente da navi passeggeri, ma soprattutto imbarcazioni cargo deputate al trasporto del carbone verso le industrie energivore dell'Europa, della Russia e degli USA.

Il dato che più ci interessa rilevare è proprio quello dei traffici marittimi, in quanto sono gli scarichi dei combustibili fossili impiegati dalle imbarcazioni

ad inquinare potenzialmente i sedimenti marini e a rimanervi nel tempo. Si tratta di imbarcazioni inizialmente alimentate a carbone e in seguito a diesel.

C'è un aumento significativo dei traffici marittimi, direttamente proporzionale alla crescita della popolazione e all'aumento del volume dei beni commerciati, da, per o attraverso l'arcipelago. Basti pensare che negli anni successivi al 1906 vengono inaugurate ben 9 miniere di carbone, con una forte accelerazione negli anni della Prima Guerra Mondiale, quando divenne essenziale per le potenze in conflitto individuare linee sicure di approvvigionamento energetico.

Un interessante caso di studio per comprendere il ruolo, i volumi estrattivi e il numero delle maestranze impiegate può essere ricavato dall'unica miniera di carbone ancora operativa nelle Svalbard, la Store Norske Spitsbergen Kulkompani, ubicata nei pressi dell'insediamento oggi abbandonato di Sveagruva, 60 km a sud dalla capitale Longyearbyen. (Figura 4)

Fondata nel 1916 dalla compagnia svedese AB SpetsbergenSvenskaKolfält, la miniera entrò in funzione l'anno successivo, con l'arrivo dei primi lavoratori dal Paese scandinavo. A pieno regime, in 8 anni di proprietà svedese, la miniera arrivò ad impiegare quasi 2000 minatori, servendosi tra l'altro di un nastro trasportatore lungo ben 13 km. Nel 1925 un devastante incendio provocò la chiusura del sito, che venne acquistato nel 1934 dalla compagnia norvegese Store Norske e infine nazionalizzato nel 1976.

Ad oggi, la miniera impiega circa 400 operai residenti sull'isola, estraendo 4 milioni di tonnellate di carbone all'anno, movimentando ogni anno circa 70 navi cargo con stazza fino a 70.000 tonnellate ciascuna.

Un dato già di per sé significativo per comprendere i volumi di emissioni di combustibili fossili. Tenendo presente che nell'isola erano operative 9 miniere, considerando il traffico di navi passeggeri, di navi cargo che trasportano tutto ciò che è necessario per la vita dei circa 2500 abitanti ( per la precisione 2504 secondo il dato del Servizio Statistico norvegese <https://www.ssb.no/en/befolkning/folketall/statistikk/befolkningen-pa-svalbard>), di navi militari e navi civili che transitano nell'area, è facile dedurre come tutto ciò abbia avuto nel XX secolo ed abbia attualmente un impatto significativo su questo ambiente artico, così come su tutto il Mar di Barents in generale (Raut et al., 2022).



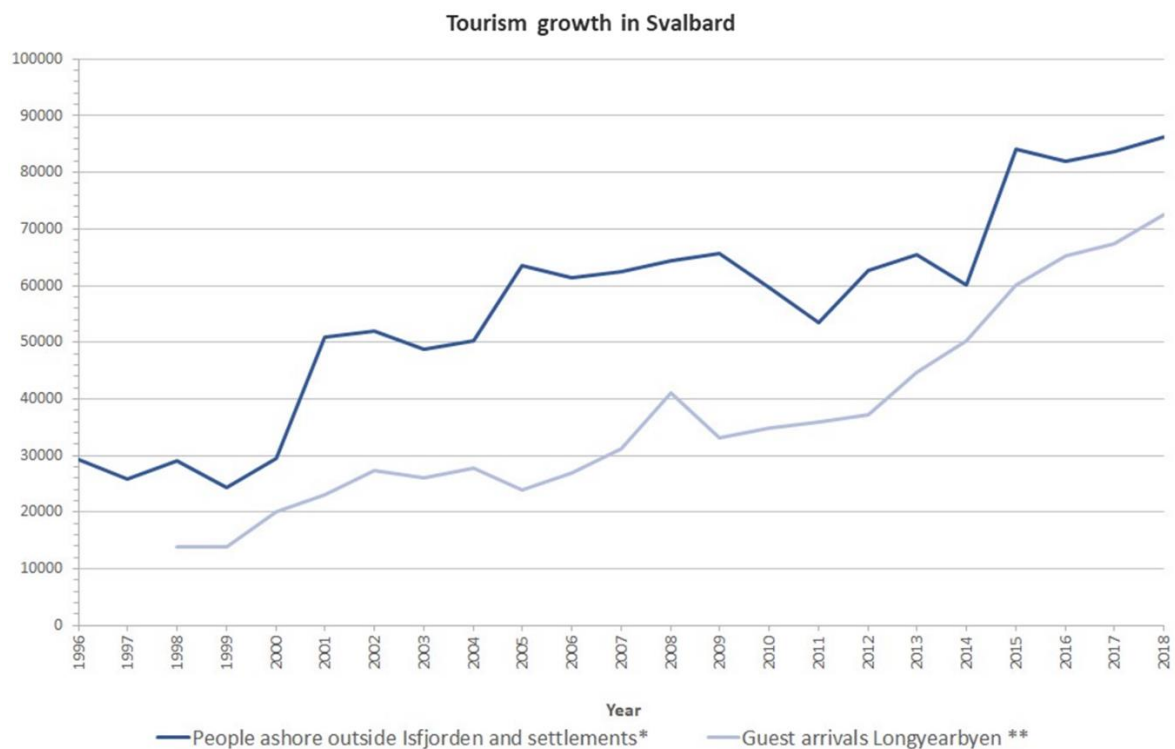
**Figura 4:** “La miniera Svea. La flotta materiale a Spitsbergen nel 1918.” ©

Tekniskamuseet

Un altro dato che è interessante rilevare è quello a proposito del turismo. Mentre la pesca, da sempre praticata nelle Svalbard, grazie alle limitazioni e regolamentazioni introdotte nella legislazione negli ultimi decenni, si è ridotta in volumi di cattura e in numero di imbarcazioni da pesca (Kruse, 2016), si registra un vero e proprio boom di arrivi nelle Svalbard. Dal 2000 in poi, infatti, il turismo internazionale ha mostrato un interesse crescente verso l'arcipelago (Figura 5). La capitale Longyearbyen rimane certamente l'*hub* principale per l'*accomodation* dei turisti, ma le visite non si limitano certo alla città principale.



Attività come l'osservazione dell'aurora boreale, i safari naturalistici, le crociere, il turismo geologico, il birdwatching hanno comportato un aumento dell'impatto antropico. Nella sola Bjørnøya, il numero annuale di visitatori nei primi due decenni del XXI secolo a viene stimato attorno alle 200-300 unità ogni anno. (<https://snl.no/Bj%C3%B8rn%C3%B8ya>).



\*Source: The Governor of Svalbard (2020). These numbers largely account for expedition cruise passengers but likely exclude many of the larger cruise vessel passengers.

\*\* Tourists staying at guest houses and hotels (excludes camping, Air BnB and other accommodations). Source: 1998–2007 - Sysselmannen på Svalbard (2006) cited in Hall and Saarinen (2010); 2008–2018 – Visit Svalbard (2018)

**Figura 5:** Grafico relativo all'articolo “*Valuing time: Tourism transitions in Svalbard*” di Samantha M. Saville, 2022.

### ***1.2.6 Il canale di Kveithola***

In questo contesto, l'area di studio oggetto del presente lavoro si trova a sud delle Svalbard: si tratta del trogolo glaciale di Kveithola, localizzato nel Mare di Barents Nord-Occidentale. Esso corrisponde ad un complesso ambiente geomorfologico situato al limite del ghiaccio marino e influenzato dall'interazione di masse d'acqua diverse (acque Atlantiche e Artiche). (Aagaard, 1989; Loeng, 1991; Vinje e Kvambekk, 1991; Loeng et al., 1997; Orvik e Niiler, 2002; Maslowski et al., 2004; Smedsrud et al., 2013). “Trogolo” è sinonimo di valle glaciale o doccia glaciale: è causato dall'azione di esarazione del ghiacciaio durante la sua avanzata ed è caratterizzato da un profilo ad U con fondo piatto, essendo costituito da una brusca inclinazione della piattaforma continentale. Nello specifico, il Kveithola è lungo circa 100 km e largo 13 km, con una profondità marina compresa tra 100 e 400 m (Fohrmann et al., 1998; R  ther et al., 2012). Il profilo longitudinale del trogolo   marcatamente scalinato, composto da cinque creste trasversali situate a circa 15 km di distanza l'una dall'altra, e interpretate come Grounding Zone Wedges (*sensu* Dowdeswell e Fugelli, 2012). Esse testimoniano il ritiro episodico degli ex flussi di ghiaccio dopo l'ultimo massimo glaciale (Rebesco et al., 2011;

Bjarnadóttir et al., 2013). Il fondale marino presenta, associato al solco glaciale, due depocentri montuosi con un fossato associato che si sviluppa lungo il margine settentrionale della depressione glaciale, che sono stati interpretati come due derive sedimentarie collegate (Rebesco et al., 2016; Lantzsich et al., 2017).

Le acque artiche, relativamente fredde, entrano in stretta comunicazione con le acque atlantiche, decisamente più calde, delineando un rimescolamento all'interno del trogolo delle due masse d'acqua. Le acque artiche influenzano la parte Nord-Orientale del trogolo, mentre la corrente Spitsbergen Occidentale (CSO), un ramo della corrente del Nord Atlantico che scorre da sud, trasporta l'acqua atlantica più calda. Il trasporto dell'acqua calda da parte della CSO ha determinato negli ultimi cento anni un significativo decremento della calotta polare artica causando significativi cambiamenti ambientali.

### ***1.3 Le particelle sferoidali carboniose***

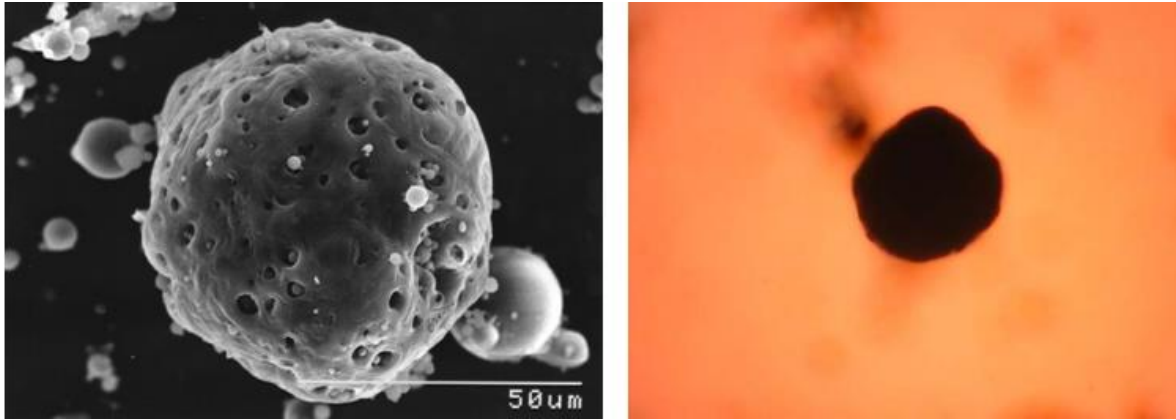
Visto il carico antropico della regione artica e il traffico marittimo descritto nel paragrafo 1.2.5, il dato interessante è quello degli scarichi dei combustibili fossili impiegati dalle imbarcazioni che potrebbero potenzialmente inquinare i sedimenti marini e rimanervi nel tempo. Gli scarichi dei combustibili fossili producono le particelle sferoidali carboniose (SCP's): esse, come già detto

(Introduzione) possono fungere da come markers stratigrafici dell'inizio dell'Antropocene. Nei paragrafi che seguiranno sarà presentato uno stato dell'arte riguardante le generalità di queste particelle (SCP's) e le loro applicazioni.

### ***1.3.1 Generalità***

La combustione di combustibili fossili ha disseminato carbone, sfere di cenere inorganica e particelle sferoidali carboniose in tutto il mondo, con un aumento globale quasi sincrono intorno al 1950 (Waters et al., 2016). Le ceneri disperse (*flyashes*) vengono rilasciate in atmosfera con i fumi. Si suddividono in tre componenti (Rose, 2017):

1. le ceneri inorganiche o IAS (*Inorganic Ash Spheres*), composte da inclusioni minerali presenti all'interno del carburante. Hanno un aspetto superficiale che va dal chiaro e vetroso al nero e metallico (Larsen, 2003) e vengono prodotte dalla fusione di qualsiasi materiale non combustibile presente nel carburante;
2. le ceneri organiche o OAS (*Organic Ash Spheres*)
3. le particelle sferoidali carboniose o SCP's (*Spheroidal Carbonaceous Particles*).



**Figura 6:** Fotografie al microscopio elettronico a scansione (SEM) e al microscopio ottico di SCP's. L'immagine SEM mostra una barra della scala di 50  $\mu\text{m}$ . (Neil Rose, University College London, 1994)

Le particelle sferoidali carboniose sono prodotte dalla combustione incompleta di combustibili fossili. Il loro aspetto varia da sfere perforate a sfere spugnose con un'area superficiale variabile (Larsen, 2003) (Figura 6). Vengono prodotte soltanto per combustione ad elevate temperature ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ) (Swindles et al., 2015). Si formano come prodotto di condensazione durante la combustione e comprendono agglomerati amorfi di sfere di carbonio nanometriche note come “fuliggine”, “carbonio nero” o “carbonio elementare”.

### ***1.3.2 Stato dell'arte dello studio delle particelle sferoidali carboniose e loro applicazioni***

Le SCP's non hanno sorgenti naturali e sono morfologicamente distinguibili: questo le rende markers univoci della contaminazione da emissioni industriali (Rose, 2017).

Invano si troveranno SCP's nel Quaternario. Sono conosciute soltanto due evidenze pre-Oloceniche nei record sedimentari dovuti a fenomeni non antropici, entrambi correlati a significativi eventi geologici ed estinzioni di massa: la prima, è la combustione di carbone derivante da fuoriuscite di magmi basaltici nell'ultima estinzione Permiana; la seconda, è la combustione di materia organica fossile in seguito all'impatto meteorite al passaggio Cretaceo-Paleogene. La differenza con le moderne SCP's sta nelle temperature di combustione (basse in entrambi gli eventi) e nella differenza di colorazione. Il colore delle SCP's oloceniche è, infatti, più scuro rispetto alle particelle pre-Oloceniche, che tendono ad essere più chiare (Swindles et al., 2015).

Le SCP's, quindi, forniscono una registrazione fedele delle emissioni e dei depositi industriali. Esse sono infatti prodotte solo da fonti industriali che impiegano processi ad alta temperatura, riscontrabili solo a partire dalla metà del XIX secolo. Di conseguenza, i primi record sedimentari delle SCP's in natura risalgono a questo periodo. (Rose, 2017).

La combustione industriale del carbone, almeno fino alla seconda metà del XX secolo, è caratterizzata da una notevole inefficienza e dall'assenza di controlli

sulle emissioni, motivo per il quale i particolati emessi sono stati dispersi più ampiamente.

Dopo la metà del XX secolo, ci furono due grandi sviluppi nell'uso dei combustibili fossili. In primo luogo, vi fu un'importante espansione delle centrali elettriche a seguito del boom economico che caratterizzò la fase post-bellica. In secondo luogo, la disponibilità, per la prima volta, di olio combustibile a basso costo portò allo sviluppo delle prime centrali elettriche a petrolio su larga scala, utilizzate in combinazione con il carbone per rispondere alla crescente domanda di energia. Il petrolio giunse a soppiantare il carbone come principale combustibile fossile proprio attorno alla metà del XX secolo: in questo stesso periodo, inizia il rapido aumento delle SCP's, contemporaneamente alla "Grande accelerazione" (Swindles et al., 2015).

Negli anni, insieme alle emissioni in atmosfera, sono aumentate anche le superfici di distribuzione e deposizione di "*flying ashes*", giungendo a coprire l'intero globo terracqueo (Rose, 2017). Le SCP's sono molto abbondanti nelle aree vicine alle sorgenti di inquinamento, ma sono state ritrovate anche in aree remote distanti dalle sorgenti industriali in tutti i continenti (Swindles et al., 2015). Questo perché le ceneri, una volta emesse, possono essere trasportate per migliaia di chilometri prima della deposizione (Rose, 2017), in base alle condizioni meteorologiche (Rose e Yang, 2007).

Sulla base di quanto detto sopra, le particelle sferoidali carboniose sono potenzialmente buoni indicatori cronostatigrafici per la base dell'Antropocene per i seguenti motivi:

1. sono presenti a livello globale (Swindles et al., 2015);
2. sono un inequivocabile indicatore della combustione di combustibili fossili antropogenici (Oldfield, 2015);
3. sono documentati in carote di ghiaccio, sedimenti marini e terrestri;
4. possono essere facilmente estratti e identificati dai ricercatori (Swindles et al., 2015).

A parte il disturbo derivante da eventuali problemi di trasporto post-deposizionale nel sedimento, dovuti, per esempio, alla bioturbazione, le SCP's sono immobili nei sedimenti lacustri (e marini). La presenza e i profili di abbondanza di queste particelle sono stati usati come strumento per caratterizzare e datare un livello nelle carote di sedimento (Renberg e Wik, 1984, Rose et al., 1995).

Per tali ragioni, negli ultimi dieci anni le particelle sferoidali carboniose prodotte dalla combustione ad alta temperatura di combustibili fossili hanno conosciuto una crescente fortuna nell'ambito delle ricerche paleoecologiche. Per esempio, sono state utilizzate per la datazione indiretta dei sedimenti



lacustri (Renberg e Wik, 1984; Rose, 1991), per identificare le potenziali fonti di deposizione atmosferica (Rose e Juggins, 1994) e hanno dimostrato di avere forti correlazioni con le distribuzioni di altri depositi atmosferici inquinanti, come gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) (Broman et al., 1990) e lo zolfo (Wik e Renberg, 1991; Rose e Juggins, 1994).

Studi sono stati svolti anche per mettere in correlazione la distribuzione dimensionale delle SCP's con la distanza dalla sorgente e con il carattere del trasporto atmosferico. In particolare, un lavoro effettuato su carotaggio nella Repubblica Ceca ha evidenziato che la presenza di oltre il 20% di particelle con diametro superiore a 40  $\mu\text{m}$  nei sedimenti indicava un'origine locale, con fonte entro pochi chilometri. (Vukić et al., 2006).

Infine, la forte correlazione delle SCP's con l'impronta umana e la periodizzazione dell'Antropocene ha aumentato il loro interesse scientifico.

#### ***1.4 I foraminiferi***

Lo studio dei foraminiferi come parte del sedimento riguarda sia le scienze della vita che le scienze della terra. La micropaleontologia è una disciplina delle scienze della terra che studia i microfossili, ovvero fossili di dimensioni così ridotte da dover essere esaminati al microscopio, e provvisti di strutture esterne

contenenti minerali. I fossili studiati in micropaleontologia possono appartenere a phyla differenti, in particolar modo ai protisti. Tra gli organismi unicellulari (protisti) la cui struttura e composizione si presta alla fossilizzazione e pertanto alla conservazione per migliaia o milioni di anni, abbiamo i foraminiferi. Le analisi micropaleontologiche hanno conosciuto un grande successo a partire dagli anni '60, per lo più in associazione con l'indagine petrolifera. I fossili apportano un gran numero di informazioni sul passato del nostro pianeta, permettendo di capire come cambiano nel tempo la geografia (paleogeografia) e le condizioni ambientali (paleoecologia e paleoclimatologia). La presenza di organismi fossili in una regione, per esempio la presenza di foraminiferi, può indicare il sussistere di condizioni ambientali e climatiche diverse da quelle attuali. Lo studio dei fossili, inoltre, è spesso fondamentale per la datazione relativa delle rocce che li contengono (biostratigrafia).

I foraminiferi sono comparsi sulla Terra all'inizio del Cambriano (circa 560 milioni di anni fa) e a tutt'oggi ubiquitari. L'analisi dei foraminiferi è fondamentale per conoscere l'ambiente in cui i sedimenti si sono formati e quindi per ricostruire l'ambiente dove i foraminiferi vivevano.

Sono presenti due diverse tipologie di foraminiferi, distinti sulla base del loro ambiente di crescita e sviluppo: i bentonici e i planctonici. I foraminiferi

planctonici ci forniscono informazioni sulle masse d'acqua oceaniche, mentre quelli bentonici ci danno un quadro di com'era il fondale marino.

#### ***1.4.1 La tassonomia dei foraminiferi***

Le forme fossili dei foraminiferi, la cui documentazione risale almeno a 570 milioni di anni fa, testimoniano un lungo processo evolutivo che ha prodotto un alto livello di efficacia adattativa capace di permettere loro di vivere in diversi habitat del pianeta, compresi i più estremi come le acque gelide dell'Artico e dell'Antartide fino ai laghi salati surriscaldati del Sahara, da 5 a 5.000 m di profondità.

Félix Dujardin diede una corretta definizione dei foraminiferi come “organismi ameboidi” nell'articolo “*Sur les prétendues Céphalopodes microscopique*” (1835). Grazie al suo contributo, essi vennero rimossi dal gruppo dei cefalopodi in cui erano stati precedentemente inseriti da d'Orbigny (1826). Le classificazioni recenti li inseriscono nei Rhizopoda (Corliss, 1944) o Reticulosa (Cavalier-Smith, 1998). La classificazione attuale è basata prevalentemente sulla morfologia di questi organismi e sulla natura e tipo di guscio, ma esiste anche una classificazione di tipo molecolare. La filogenetica ci ha permesso di definire la loro origine nel tempo, individuando l'antenato comune tra i

Cercozoa. La loro evoluzione è iniziata con le forme monotalamiche (Allogromiidi *sensu lato* o “*soft-shelled*”).

### **1.4.2 Morfologia**

L'aspetto morfologico caratteristico dei foraminiferi è la presenza del guscio duro. Esso può essere composto da particelle di sedimento, calcite, aragonite, silice o da proteine (in questo caso il guscio non risulterà duro). I foraminiferi sono organismi unicellulari con protoplasma, generalmente diviso in endoplasma ed ectoplasma, poiché possiamo trovare il protoplasma anche all'esterno del guscio. Essendo degli organismi unicellulari eucariotici, hanno tutto quello che serve all'interno della loro cellula (organelli): nucleo, mitocondri, reticolo endoplasmatico, granuli, stercomata (materiale fecale), globuli lipidici, simbionti (es. diatomee), etc. La principale peculiarità che li distingue dalle amebe è quella di avere degli pseudopodi che permettono l'estensione del materiale anche all'esterno (ectoplasma): questi pseudopodi sono granulo-reticolosi (cioè contengono al loro interno dei granuli) e servono per la locomozione, la cattura di cibo, l'adesione al substrato, la formazione di cisti di resistenza, l'espulsione di materiale metabolico e hanno inoltre una funzione attiva nella biomineralizzazione (costruzione del guscio). La loro estensione può duplicare la dimensione della cellula. Durante l'azione dedicata al

trasporto intracellulare di cibo vengono rilasciate dagli pseudopodi delle fibrille adesive che permettono l'ancoraggio al substrato e conseguentemente il passaggio di nutrimento all'interno della cellula. Le cellule sono supportate da un citoscheletro di microtubuli: i foraminiferi hanno evoluto meccanismi cellulari speciali per assemblare e smontare rapidamente i microtubuli, consentendo la rapida formazione e retrazione di pseudopodi allungati.

I foraminiferi vengono classificati seguendo le caratteristiche morfologiche del guscio. Possono essere:

- Foraminiferi con guscio organico: tale guscio è formato da una sottile membrana glicoproteica (tectina) generalmente non fossilizzabile, molto flessibile, e che permette all'organismo di assumere diverse forme.
- Foraminiferi agglutinanti: il materiale che viene selezionato dal foraminifero può essere di vario tipo, preso casualmente dal substrato o finemente scelto, sia per taglia che per composizione. La selezione in alcuni casi è data esclusivamente dall'abbondanza del materiale che trovano nel substrato.
- Foraminiferi con guscio di carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ): presentano un'alta variabilità di forme e dimensioni, un'alta biodiversità e un elevato numero di specie. Possono presentare dei pori ed essere di tipo perforato ialino, oppure non averli ed essere di tipo porcellanaceo

imperforato. Questa distinzione identifica un diverso meccanismo di biomineralizzazione.

La forma può essere molto variabile: possono presentare una sola camera (monotalamici) o più camere (politalamici). Nelle forme politalamiche, vengono aggiunte nuove camere man mano che l'organismo cresce. Molti foraminiferi mostrano dimorfismo nei loro gusci, con individui megalosferici e microsferici. Questi nomi non dovrebbero essere presi come riferiti alle dimensioni dell'intero organismo; piuttosto, si riferiscono alle dimensioni della prima camera (*proloculus*) e sono legati al ciclo vitale.

### ***1.4.3 Ciclo vitale***

Per ciò che riguarda la riproduzione, presentano un'alternanza di ciclo sia sessuale che asessuale. Nella riproduzione asessuata avviene una scissione multipla semplice per schizogonia. Lo schizonte maturo di forma microsferica raccoglie il suo protoplasma con molti nuclei verso le ultime camere del guscio per poi suddividersi in tante piccole cellule, ciascuna con il proprio nucleo. Tali cellule sono gli embrioni che, fuoriusciti dal guscio, entreranno poi nella fase sessuata. La forma sessuata è caratterizzata dalla presenza di un solo nucleo

che, raggiunta la maturità, si divide in piccole cellule definite gameti. I gameti rilasciati si congiungono fra loro a coppie dando origine a una nuova cellula che diventerà un individuo asessuato. I gusci delle generazioni asessuate sono generalmente di dimensioni maggiori rispetto a quelli della generazione sessuata. Al contrario, la camera iniziale del guscio della forma asessuata è di dimensioni minori della corrispondente camera della forma sessuata. Nel ciclo biologico le due generazioni, la agamica e la gamica (sessuale), si succedono alternandosi, seguendo una metagenesi non ritmica: le fasi asessuali sono più numerose, infatti, di quelle sessuali (il rapporto è di 1:2 / 1:30 circa). (G.L.Pesce, 2004)

#### ***1.4.4 Studi pregressi dei foraminiferi bentonici nell'area di studio***

La presente ricerca ha potuto avvalersi di dati pregressi riferiti all'area di studio del Mare di Barents e del canale di Kveithola. Un quadro d'insieme sufficientemente esaustivo è presente già nell'articolo Gamboa-Sojo et al. (2021). Gli autori, in particolare, hanno descritto l'associazione recente a foraminiferi bentonici.

Caridi et al. (2021) hanno invece studiato la distribuzione dell'associazione vivente a foraminiferi bentonici nella stessa area di studio in relazione

soprattutto alla qualità e quantità della materia organica insieme ai principali dati oceanografici delle masse di acque.

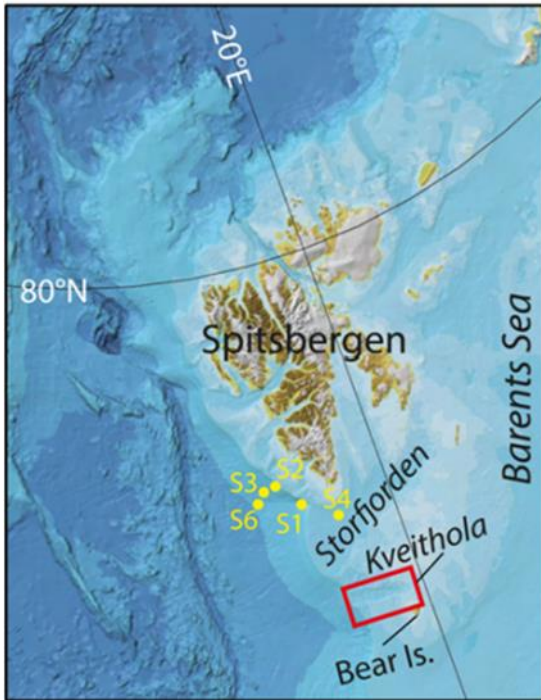
Sabbatini et al. (2023), infine, hanno studiato la densità, biodiversità e distribuzione verticale dei foraminiferi bentonici nel canale di Kveithola, analizzando anche parametri biogeochimici e sedimentologici. I foraminiferi hanno fornito uno strumento per descrivere l'ambiente deposizionale di Kvithola come un hotspot di buona qualità nutrizionale della materia organica, soprattutto nella parte interna del canale.



## **2. MATERIALI E METODI**

### ***2.1 Area di campionamento***

Nel presente lavoro è stata studiata la distribuzione dei foraminiferi bentonici provenienti da una carota prelevata nel canale glaciale Kveithola, situato nel Mare di Barents, durante la spedizione Eurofleets 2-BURSTER (Expedition PS99-1a). La campagna è stata condotta a bordo della rompighiaccio tedesca RV Polarstern dal 13 al 23 giugno 2016 nel quadro del progetto AXED-PNRA. Il progetto aveva come principale obiettivo indagare sulle condizioni chimico/fisiche del canale glaciale Kveithola (Figura 7) per scoprire la possibile presenza di infiltrazioni di gas, per analizzare i tassi di sedimentazione e, infine, per effettuare analisi qualitative e quantitative riguardo la fauna bentonica presente nella zona (Lucchi et al., 2016).



**Figura 7:** Mappa di localizzazione dell'area di studio. Il rettangolo rosso mostra la posizione del canale glaciale Kveithola.

La carota oggetto delle analisi svolte in questa tesi è stata prelevata nella stazione di campionamento PS99.1/21-05 ( $74^{\circ} 52.40'N$ ;  $17^{\circ} 21.60'E$ ) utilizzando un Multicorerer videoguidato (TV MUC) in grado di campionare 8 carote contemporaneamente, a 305.4 m di profondità.

## ***2.2 Trattamento campioni***

La carota PS99.1/21-05 (74° 52.40'N; 17° 21.60'E) -Multicorer-305.4, lunga 17 cm, è stata conservata presso il laboratorio di Stratigrafia, Sedimentologia e Paleoecologia dell'Università Politecnica delle Marche ad una temperatura di -20°C.

La carota, prima di essere aperta e campionata, è stata sottoposta a scongelamento. Il passo di campionatura è stato di 0,5 cm dal cm 0 fino al cm 2; il cm 2-3 è stato campionato ad 1 cm; poi, dal cm 3 fino al cm 13,4 si è proseguito a sezionare la carota di 0,8 cm alla volta. Dal cm 13,4 si è deciso di considerare il campione fino al fondo.

I campioni di sedimento totali raccolti sono risultati 19.

Una volta terminata questa fase di taglio, i campioni sono stati posti sopra pezzettini di carta assorbente, precedentemente denominati con il livello di sedimento corrispondente, e sono stati posti in stufa a 50° per una notte per farli seccare.

Una volta terminata la fase in stufa, ogni singolo campione è stato pesato e successivamente immerso in acqua all'interno di un becher per consentire di inumidire il campione.

Ogni campione è stato lavato utilizzando setacci con maglie da 150µm e da 63µm. Ai fini delle analisi effettuate in questa tesi, è stato preso in

considerazione e osservato con uno stereomicroscopio (ZEISS Stemi 2000) solo il residuo della frazione  $>150\mu\text{m}$ .

Dal setaccio è stato fatto scivolare il campione di sedimento, con l'aiuto di una pompetta d'acqua, su un foglio di carta da filtro precedentemente montato su di un imbuto collegato ad una beuta che raccoglie l'acqua.

Il campione trattenuto dal filtro, anch'esso contrassegnato dal numero del campione, è stato posto di nuovo in stufa per una notte a  $40^{\circ}\text{C}$ , per seccarlo.

Tolti i campioni dalla stufa, si pongono in bustine trasparenti e contrassegnate. Così archiviati, sono pronti per l'analisi al microscopio.

### ***2.3 Protocollo di preparazione e analisi delle particelle sferoidali carboniose***

Per ogni livello considerato, un'aliquota di 0,2 gr di ogni campione è stata utilizzata per l'individuazione delle particelle sferoidali carboniose all'interno della carota di sedimento PS99.1/21-05.

Il protocollo per l'estrazione delle SCP's dai sedimenti è stato stilato dal Laboratorio di Stratigrafia, Sedimentologia e Paleoecologia dell'Univpm e ha rielaborato una tecnica precedentemente pubblicata da Neil L. Rose nel 1994.

In sintesi, il lavoro svolto in laboratorio ha implicato la rimozione sequenziale delle frazioni di sedimento indesiderate mediante un attacco chimico selettivo (Rose, 1994). I passaggi del protocollo sono riportati di seguito:

- Il primo passo ha riguardato la taratura del peso delle falcon, nelle quali sono stati inseriti 0,2 gr di sedimento per ognuno dei 19 campioni presi in analisi.
- Per i campioni di sedimento compresi tra 16-17cm (fondo carota) fino al campione 4-5 cm, insieme alla frazione di sedimento è stata inserita anche l'aliquota di 50 ml di acqua ossigenata a 10 volumi (perossido di idrogeno diluito al 3%). Dal campione 3-4 cm fino al campione 0-0,5 cm (apice carota) è stata inserita acqua ossigenata a 24 volumi (diluito al 7,2%). La scelta dell'acqua ossigenata ad un volume maggiore è stata fatta sulla base della necessità di rimuovere in maniera più efficace la frazione organica dai campioni di sedimento nei livelli superficiali della carota studiata.
- Una volta inserita l'acqua ossigenata all'interno delle falcon, queste sono state messe in stufa a 55° e lasciate per tutta la notte.
- Quando la materia organica si è disciolta e stabilizzata, quindi quando cessa l'effervescenza, i campioni sono stati centrifugati a 2000 r.p.m. (giri al minuto) per 5 minuti per far depositare il residuo.

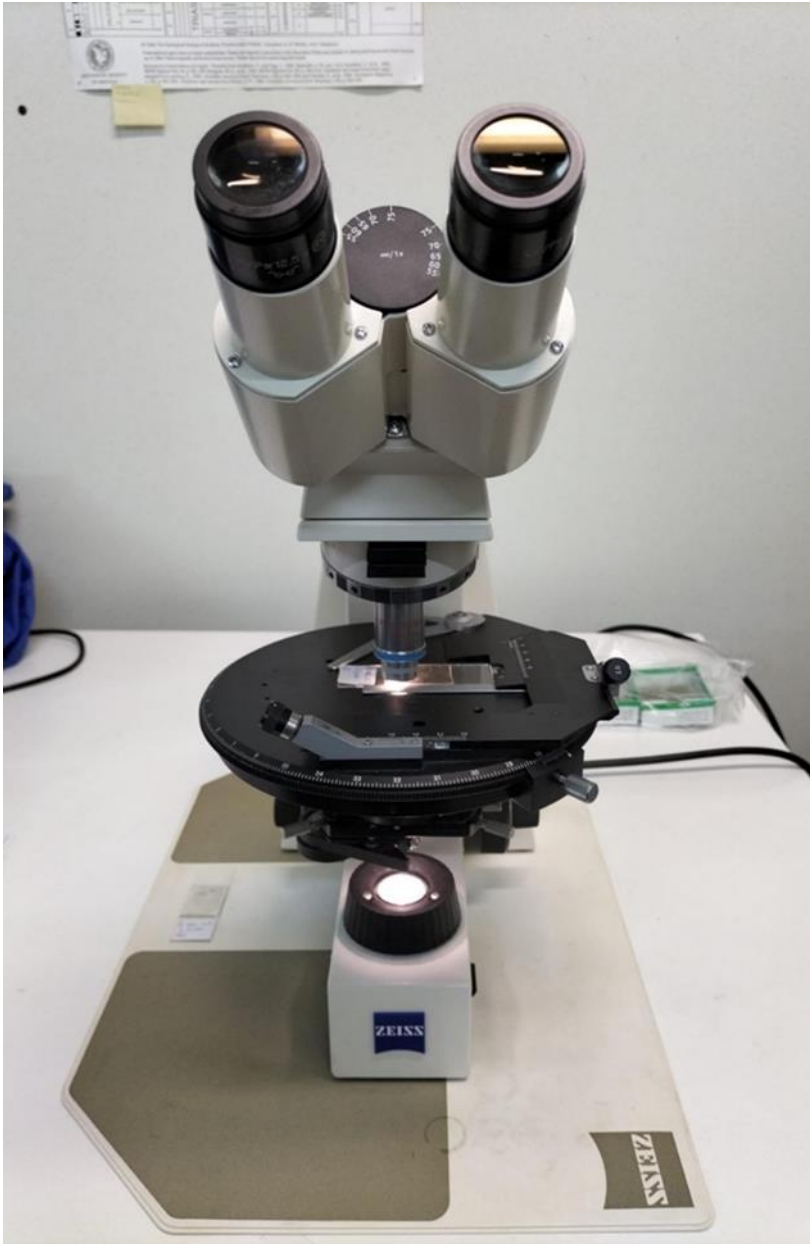
- Una volta terminata la fase di centrifuga si è passati alla fase dei lavaggi. I lavaggi sono stati fatti con 20 ml di acqua distillata e ripetuti 3 volte.
- Dopo ogni lavaggio il campione è stato centrifugato a 2000 r.p.m. per permettere la deposizione del sedimento. In particolare, alla fine di ogni lavaggio la quantità di acqua tolta dalle falcon è stata trattenuta all'interno di nuove falcon precedentemente siglate con il nome e il livello del campione e quindi il surnatante è stato conservato per successivi trattamenti. Il surnatante proveniente da ogni singolo lavaggio e successiva centrifugazione è stato trattenuto per una verifica della presenza di particelle sferoidali carboniose proveniente dal sedimento in sospensione.
- Terminati i lavaggi, sono stati aggiunti 30 ml di acido cloridrico (HCl) a 3M ai campioni di sedimento e poi lasciati per due ore in stufa a 80°. È stato necessario utilizzare l'acido cloridrico per rimuovere rispettivamente materiale siliceo e carbonatico. Le particelle sferoidali carboniose, sebbene fisicamente abbastanza fragili, sono resistenti all'attacco chimico essendo composte principalmente da carbonio elementare. È quindi possibile utilizzare acidi forti come l'acido cloridrico, senza danneggiare le particelle (Rose,1994).

- Dopo il trattamento acido, si è centrifugato il campione a 2000 r.p.m. per 5 minuti per far depositare di nuovo il residuo.
- Sono stati fatti 3 cicli di lavaggi con l'aggiunta di 20 ml di acqua distillata e centrifugazione come sopra.
- A differenza dei lavaggi precedenti fatti per eliminare l'acqua ossigenata, in questo caso il surnatante non è stato conservato.
- Le falcon, con all'interno il residuo, sono state poste in centrifuga a 2000 r.p.m. per 5 minuti per la deposizione del sedimento.
- È stata eliminata l'acqua ed è stato conservato il sedimento per successiva analisi al microscopio.
- I campioni, prima del processamento finale, sono stati liofilizzati. Una volta avvenuta la liofilizzazione del sedimento, che impiega circa una giornata, si è potuto continuare con la fase finale di trattamento del campione. A questo scopo, è stata utilizzata la tecnica *smear slide*. Uno *smear slide* è un sottile strato di sedimento non consolidato incorporato su un vetrino per esami sedimentologico-petrografici al microscopio. Il metodo *smear slide* è molto efficace per valutare rapidamente piccole quantità di sedimento (mineralogia, provenienza, forma, dimensione) come base per la classificazione e per accertare la presenza di microfossili (Myrbo, 2007). In questo caso, ci si è serviti di 0,05 gr di

campione: tale quantità è stata divisa circa a metà e ripartita su due vetrini. Il campione è stato aggiunto su vetrini attraverso una pipetta.

- Una volta raggiunta la consistenza adatta, il sedimento è stato distribuito su tutto il vetrino attraverso l'utilizzo di una piccola spatola.
- Per la successiva analisi al microscopio è necessario che il vetrino con il sedimento venga protetto. Per tale motivo è stato utilizzato un vetrino più piccolo, posizionato e incollato tramite colla per vetro al di sopra del campione in analisi. La colla viene fatta asciugare sotto una lampada UV per qualche minuto oppure direttamente al sole.
- Terminata questa preparazione, si procede con l'analisi al microscopio (Figura 8).





**Figura 8:** Microscopio per analisi paleontologiche.

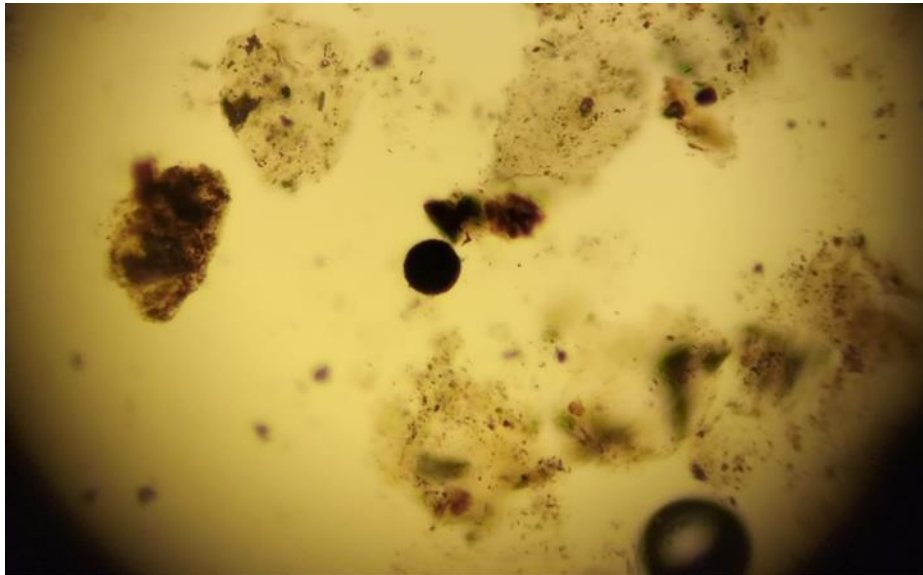
#### ***2.4 Riconoscimento delle particelle sferoidali carboniose***

Le analisi delle particelle sferoidali carboniose sono state condotte servendosi di un microscopio ottico a luce polarizzata, uno strumento utilizzato principalmente negli studi di petrografia. Esso consente di ottenere un'immagine ingrandita di un oggetto mediante due sistemi di lenti: l'obiettivo e l'oculare. Nel caso specifico, l'oculare è a 12,5 X e l'obiettivo a 40 X, pari ad un ingrandimento totale di 500X. Inoltre, è presente anche un analizzatore (ulteriore filtro polarizzatore) posto tra obiettivo e oculare. Altra importante caratteristica è la presenza di una scala graduata incisa in un vetro inserito nell'oculare che permette di misurare elementi molto piccoli. Una unità della scala graduata corrisponde a 2,5 $\mu$ m.

Per il riconoscimento delle particelle sferoidali carboniose ci si è avvalsi del protocollo sviluppato da Allan Clark (2002) rielaborato in alcuni aspetti.

Al fine della corretta individuazione delle particelle sferoidali carboniose (SCP's), è stato utile chiarire preliminarmente le principali differenze tra queste e le "*fly ash*", ovvero sfere di cenere inorganica (IAS). Le SCP's appaiono di solito come sfere aventi diametro compreso tra 5 e 100  $\mu$ m. Tutte le sferette che hanno dimensioni inferiori a 5  $\mu$ m sono state scartate dall'analisi perché trovate principalmente nella porzione apicale della carota, mentre risultano assenti nella porzione inferiore. Sono quindi assimilabili a particelle di pirite. Oltre alle dimensioni, le altre caratteristiche che vengono considerate sono:

- Il colore: le particelle sferoidali carboniose appaiono nere/opache, ma potrebbero avere dei buchi e una trama a pizzo; il colore può non essere totalmente nero ma avvicinarsi di più ad una totalità marrone con bordatura sul rosso, delineabile soprattutto ingrandendo l'immagine (Figura 9).



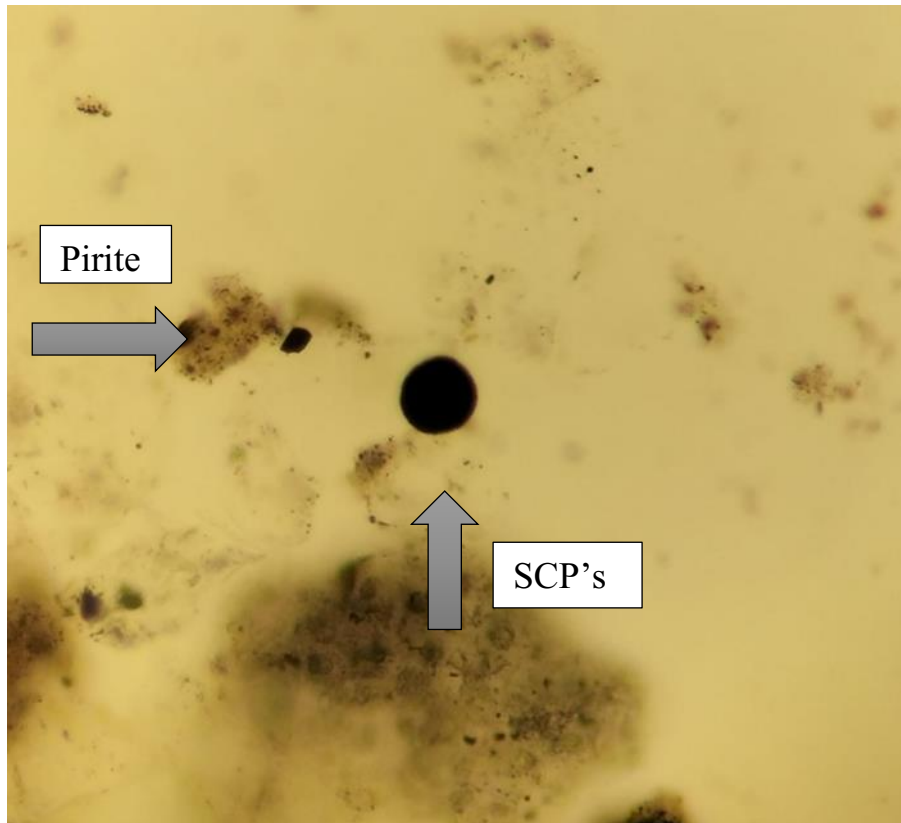
**Figura 9:** SCP's individuata ai cm 15-16 con dimensioni di 19  $\mu\text{m}$ .

- Il perimetro: deve essere abbastanza sferico. È preferibile non conteggiare la particella come SCP's se non è liscia e presenta scanalature per evitare di avere un dato sbagliato.
- Sotto luce polarizzata si verifica un cambio nel colore, assumendo tonalità più scure.

- Se si mette a fuoco dentro e fuori, la distanza focale mostrerà che si tratta effettivamente di una particella sferica tridimensionale (Clark, 2002).
- Tendenzialmente, andando più indietro negli anni, quindi analizzando le porzioni di carota verso il fondo, le SCP's saranno di diametro inferiore.

Nel conteggio finale è stata esclusa la presenza di particelle di pirite e micro-noduli di Fe - Mn.

Le particelle di pirite, infatti, pur presentando forti somiglianze con le SCP's nella morfologia e per l'opacità, presentano un range dimensionale compreso tra i 0.003 mm e i 4  $\mu$ m che differisce totalmente dalle dimensioni che caratterizzano le SCP's, tendenzialmente più grandi (Optical & Guide, n.d.) (Figura 10)



**Figura 10:** Differenze strutturali tra particelle di Pirite e SCP's.

Inoltre, anche i micro-noduli Fe – Mn presentano forti somiglianze con le SCP's per la loro forma sferica, per l'opacità e per il range dimensionale che va dai 4 ai 1000  $\mu\text{m}$  (Optical & Guide, n.d.).

La principale caratteristica dei noduli polimetallici che ha permesso di escluderne la presenza nel sedimento in analisi è il loro habitat naturale di sedimentazione, ovvero le pianure abissali a profondità comprese tra i 4000 e i 6000 metri. La carota di sedimento PS99.1/21-05 (74° 52.40'N; 17° 21.60'E) -

Multicorer-305.4 presa in considerazione è stata tuttavia prelevata a 305,4 m, a una profondità dunque incompatibile con quella che caratterizza l'habitat naturale dei noduli polimetallici.

### ***2.5 Analisi quantitative della fauna a foraminiferi bentonici***

L'identificazione e l'analisi dei foraminiferi bentonici viene effettuata su un numero statisticamente valido di 300 individui. A tale scopo l'analisi della fauna a foraminiferi è stata fatta su frazioni di sedimento quartato. La quartatura viene effettuata mediante un Microsplitter che divide il campione di sedimento in frazioni uguali, di cui una si conserva e l'altra, se occorre, viene di nuovo quartata. Questo procedimento prosegue fin quando non si ritiene che la frazione raggiunta sia sufficiente ad ottenere un conteggio di foraminiferi statisticamente utile, valore stimato in 300 individui. Il Microsplitter è stato utile anche per garantire una distribuzione omogenea e del tutto casuale dei foraminiferi nella frazione scelta.

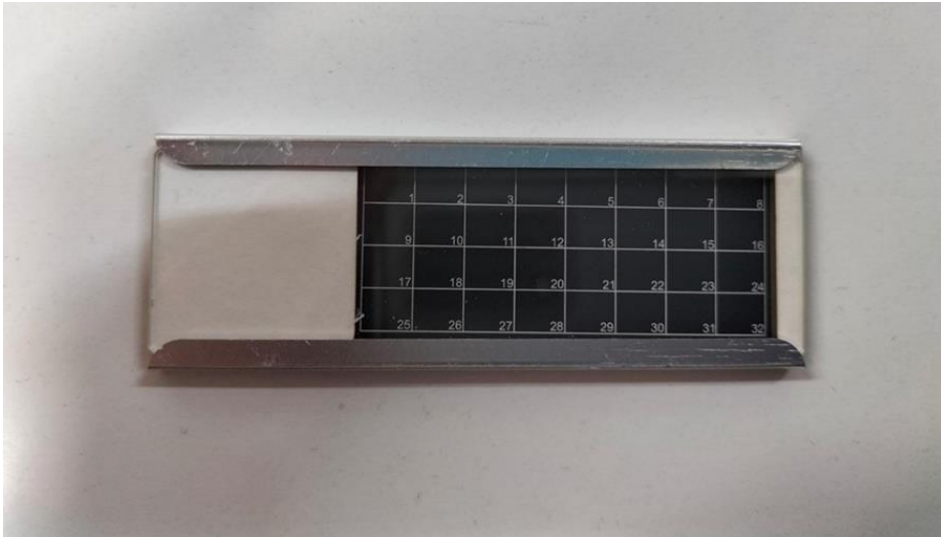
Il sedimento precedentemente quartato viene rovesciato su una slide con fondo scuro (15.4x5.2x0.4 cm) contenente 45 caselle. L'analisi dei foraminiferi viene svolta tramite stereomicroscopio (Figura 13). Con l'ausilio di un pennellino misura "00" si esegue il "picking", ovvero il prelievo dei foraminiferi, e il

trasferimento in una slide simile alla prima, ma più piccola (Figura 12). Contemporaneamente avviene l'identificazione delle specie e il conteggio, inserendo il risultato in apposite tabelle cartacee prestampate (Figura 11). In particolare, l'identificazione delle specie avviene seguendo i principali caratteri tassonomici:

- Composizione, struttura e morfologia del guscio
- Numero, forma e disposizione delle camere
- Posizione e forma dell'apertura
- Ornamenti ed eventuali caratteri accessori (per es. *Pullenia bulloides* presenta una camera accessoria).

CAMPIONE:								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31	32	33	34	35	36

**Figura 11:** Tabelle cartacee prestampate dove inserire il conteggio dei Foraminiferi.



**Figura 12:** Slide a fondo nero dove inserire i Foraminiferi prelevati attraverso la fase di “picking”.





**Figura 13:** Stereomicroscopio (Nikon SMZ645) utilizzato per il picking dei foraminiferi bentonici.

Come detto, gli individui sono stati identificati mediante l'utilizzo di uno stereomicroscopio a livello di specie, dove possibile. Lo stereomicroscopio è un microscopio ottico progettato per produrre una visione stereoscopica (o binoculare) di un oggetto. In questo modo, fornisce una visione tridimensionale

degli oggetti, mentre attraverso quello ottico (o composto) gli oggetti appaiono piatti, senza volume.

Diversamente dai microscopi ottici, in uno stereoscopico solitamente si osserva la luce riflessa dal campione, invece della luce trasmessa. L'uso della luce riflessa dall'oggetto consente l'esame di campioni troppo spessi o altrimenti opachi per la microscopia tramite microscopi a trasmissione. Anche i microscopi stereoscopici possono essere configurati per operare con illuminazione trasmessa, tipicamente con una lampada, e diversamente dal microscopio composto, nella maggioranza dei sistemi stereoscopici l'illuminazione per trasparenza non è focalizzata attraverso un condensatore.

Lo stereomicroscopio presenta un ingrandimento tipicamente compreso fra 8-50 volte, molto inferiore a quello del microscopio ottico.

Lo stereomicroscopio non permette di vedere organismi indistinguibili ad occhio nudo, analisi che può essere svolta mediante l'utilizzo di microscopia ottica. Infatti, questo strumento è adatto ad osservare oggetti che si possono già scorgere ad occhio nudo, come insetti, fiori, o foraminiferi.

Terminate le analisi di isolamento delle specie di foraminiferi, viene effettuato il conteggio degli individui totali presenti in ogni cm della carota in analisi.

Mediante l'utilizzo di Excel, si creano delle tabelle funzionali all'inserimento dei dati.

Viene poi determinato il valore in concentrazione delle specie presenti nei campioni: i valori sono stati standardizzati sull'aliquota di sedimento visto e poi rapportati ad 1 gr di sedimento secco; ovvero per ogni campione è stato calcolato il rapporto tra il n° individui di ogni specie sui grammi di sedimento secco del campione totale.

Sono state inoltre calcolate le abbondanze percentuali.

Per l'interpretazione ecologica, utilizzando la letteratura presente, le specie sono state raggruppate in:

- Specie opportunistiche
- Specie epifite
- Specie anossiche
- Specie indicatrici di acque atlantiche
- Specie indicatrici di acque artiche

Sono stati infine considerati anche gli indici di biodiversità, determinati mediante l'utilizzo di Past (PAleontological STatistic - versione 3.01):

- Taxa
- Dominanza

- Shannon
- Equitabilità

## SCOPO TESI

Lo scopo della tesi è verificare la presenza nei sedimenti artici, provenienti dal canale glaciale di Kveithola nel Mare di Barents, di due markers stratigrafici:

- le particelle sferoidali carboniose (SPC's)
- i foraminiferi bentonici.

Le prime testimoniano la combustione di combustibili fossili, tipicamente associata all'Antropocene in quanto marker stratigrafico univoco: ne andrà verificata la presenza e l'abbondanza assoluta nel sedimento, per tentare di formulare un'ipotesi attendibile sul passaggio dall'Olocene all'Antropocene dell'areale in oggetto (Canale di Kveithola, Mare di Barents).

I foraminiferi nel sedimento, poi, sono stati oggetto di catalogazione e analisi per verificare, attraverso eventuali variazioni di abbondanza assoluta e relativa, cambiamenti nelle condizioni ambientali e climatiche dell'areale, corrispondenti all'aumento di temperatura delle masse di acqua in artico, all'aumento della produttività e accumulo di materia organica. Non, dunque, indicatori "assoluti" dell'Antropocene, ma "spie" indirette di avvenute variazioni in alcuni parametri ecologici.

### 3. RISULTATI

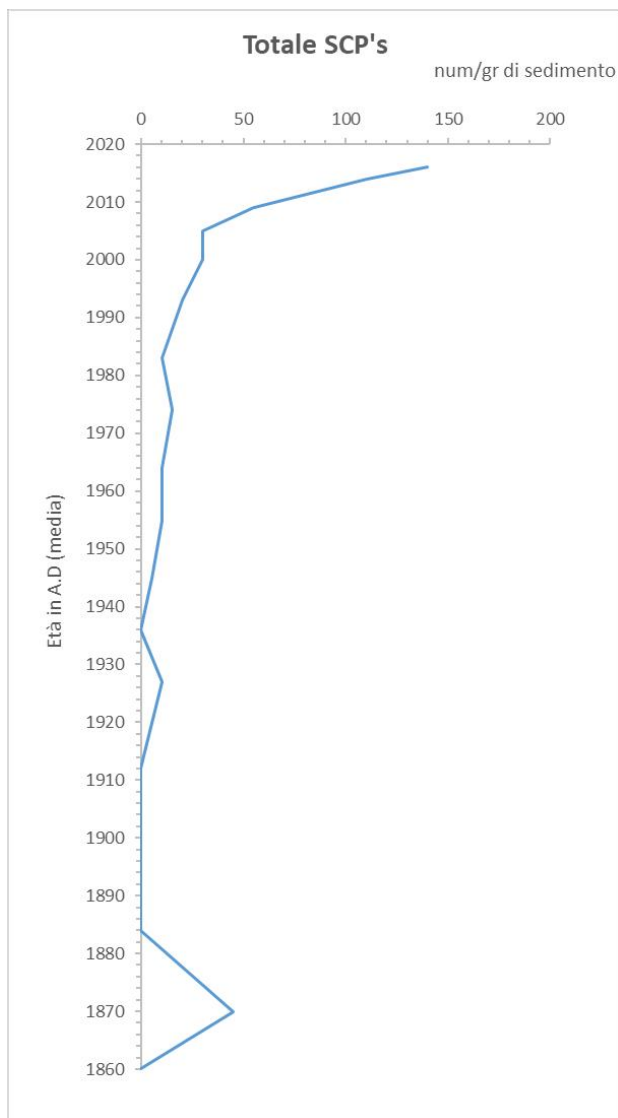
In questo paragrafo vengono riportati i risultati dell'indagine bio-ecostratigrafica compiuta sulla carota PS99.1/21-05.

#### *3.1 Densità e distribuzione verticale nel sedimento delle particelle sferoidali carboniose (SCP's)*

Nell'analisi delle *smear slides* sono state individuate in totale 98 SCP's, con dimensioni variabili da 5 ai 75  $\mu\text{m}$ .

Gli intervalli di profondità in centimetri sono stati convertiti in età; questo è stato possibile grazie all'analisi isotopica degli elementi Piombo e Cesio ( $^{210}\text{Pb}$  e  $^{137}\text{Cs}$ ). (Gamboa-Sojo et al., 2021). Le età e il tasso di sedimentazione sono stati calcolati sulla base del modello di Concentrazione Iniziale Costante (CIC) (Robbins e Edgington, 1975), e i risultati sono stati convalidati attraverso l'identificazione dei picchi nell'attività del  $^{137}\text{Cs}$  (Ritchie e McHenry, 1990). La carota ha un intervallo di età che va dal 1860 al 2016.

La distribuzione delle SCP's lungo la carota è rappresentata nel seguente grafico (Figura 14):



**Figura 14:** Grafico della distribuzione delle SCP's lungo la carota 21-5 dal 1860 al 2016.

Il grafico riporta il numero di SCP's per grammo di sedimento. In generale la tendenza mostra una bassa quantità di SCP's fra gli anni 1880 e 2000. Si osserva un picco corrispondente all'anno 1870, successivamente il numero cala e rimane molto basso fino al 1993 per poi crescere in maniera piuttosto rapida.

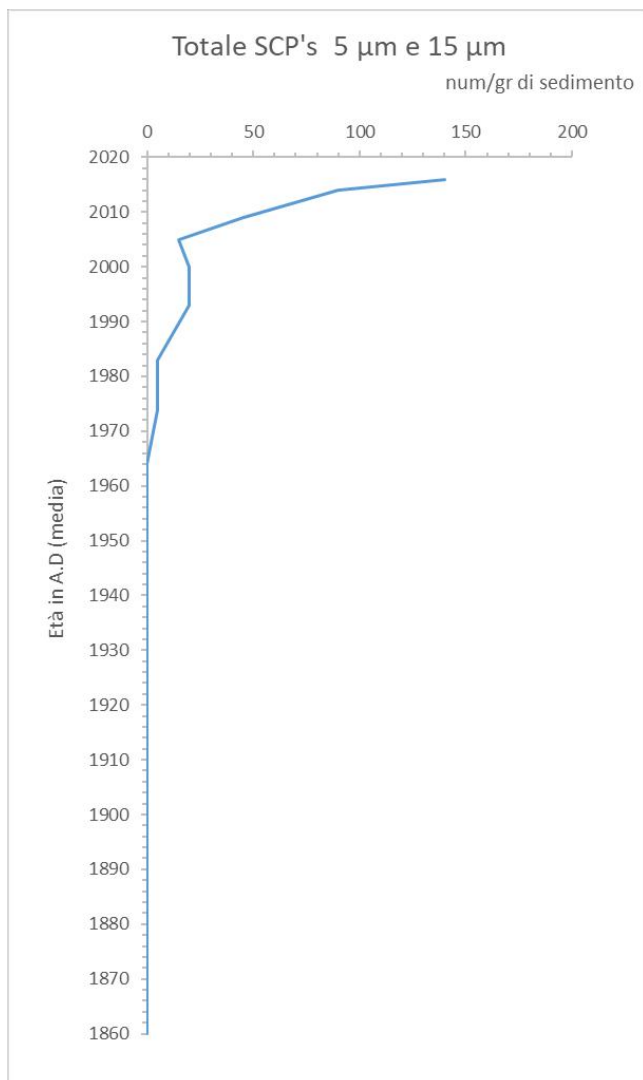
Un incremento notevole è osservato a partire da primi anni 2000 e il numero maggiore di SCP's si osserva nell'anno 2016 dove l'analisi riporta 140 SCP's/grammo di sedimento.

Durante l'analisi si è deciso di distinguere diverse categorie dimensionali di SCP's:

- Piccole: di dimensioni comprese tra 5  $\mu\text{m}$  e 15  $\mu\text{m}$
- Medie: di dimensioni comprese tra 15  $\mu\text{m}$  e i 30  $\mu\text{m}$
- Grandi: di dimensioni superiori ai 30  $\mu\text{m}$

I risultati sono graficati e commentati di seguito:

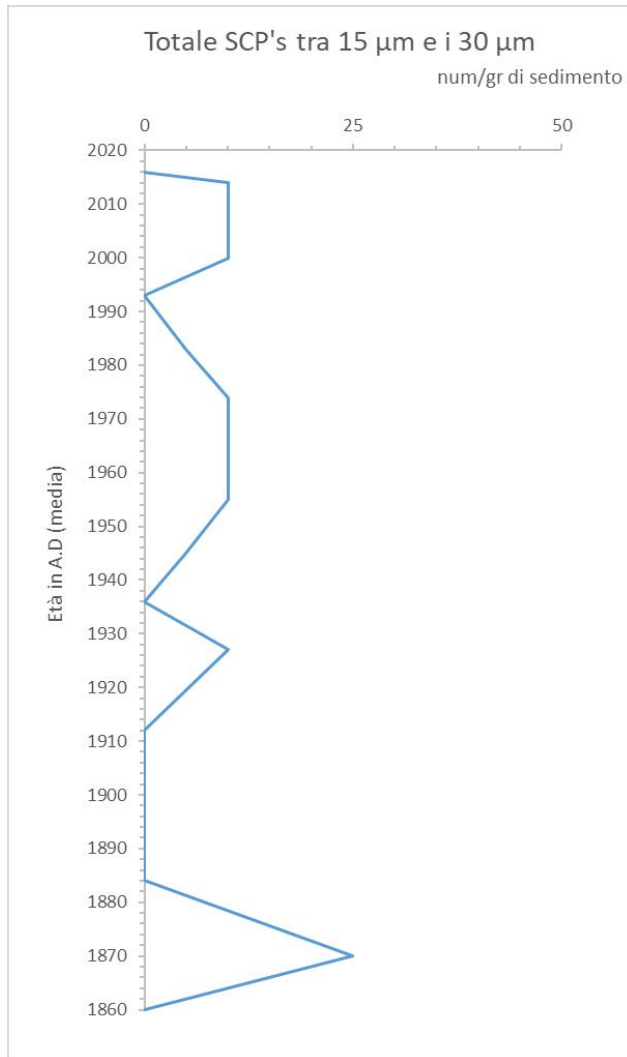




**Figura 15:** Andamento delle SCP's di dimensioni comprese tra 5 e 15 micron lungo la carota.

Il grafico relativo all'andamento delle SCP'S di piccole dimensioni (Figura 15) ci mostra che a partire dal 1860 e fino al 1964 esse non sono rilevate. Iniziano ad essere presenti a partire dal 1974 in numero abbastanza basso fino al 2005. Un incremento nell'abbondanza si osserva in corrispondenza dell'anno 2009

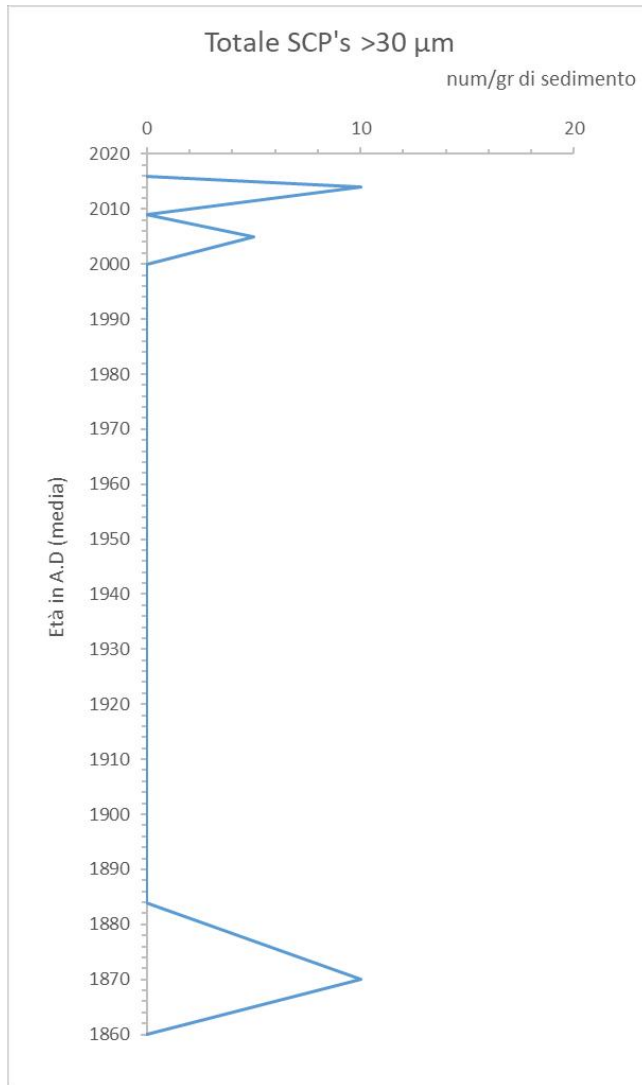
raggiungendo il massimo nel 2016, dove si registra un valore di 140 SCP's/gr di sedimento.



**Figura 16:** Andamento delle SCP's di dimensioni comprese tra 15 e 30 micron lungo la carota.

Il grafico relativo all'andamento delle SCP'S di medie dimensioni (Figura 16) mostra un picco di abbondanza nel 1870, mentre successivamente tra il 1884 e

il 1912 esse non sono rilevate. Dal 1927 fino al 2014 si osservano quasi sempre con un'abbondanza pressoché costante (10 SCP's/gr di sedimento), tranne nei campioni datati al 1936, 1993 e 2016.



**Figura 17:** Andamento delle SCP's di dimensioni maggiori di 30 micron lungo la carota.

Il grafico relativo all'andamento delle SCP's di grandi dimensioni (Figura 17) mostra un picco nel 1870, successivamente la totale assenza fino al 2000. Nel 2005 e nel 2014 tornano ad essere presenti.

### ***3.2 Biodiversità e composizione tassonomica dei foraminiferi bentonici***

La maggior parte delle specie identificate sono presenti lungo tutta la carota campionata ma, per alcune l'abbondanza risulta elevata, per altre ridotta, per altre ancora è possibile osservare una singola comparsa nell'arco dell'analisi completa.

Le specie trovate sono:

- 26 specie calcaree perforate che rappresentano il gruppo tassonomico più abbondante.
- 3 specie calcaree imperforate o miliolidi
- 2 specie agglutinanti

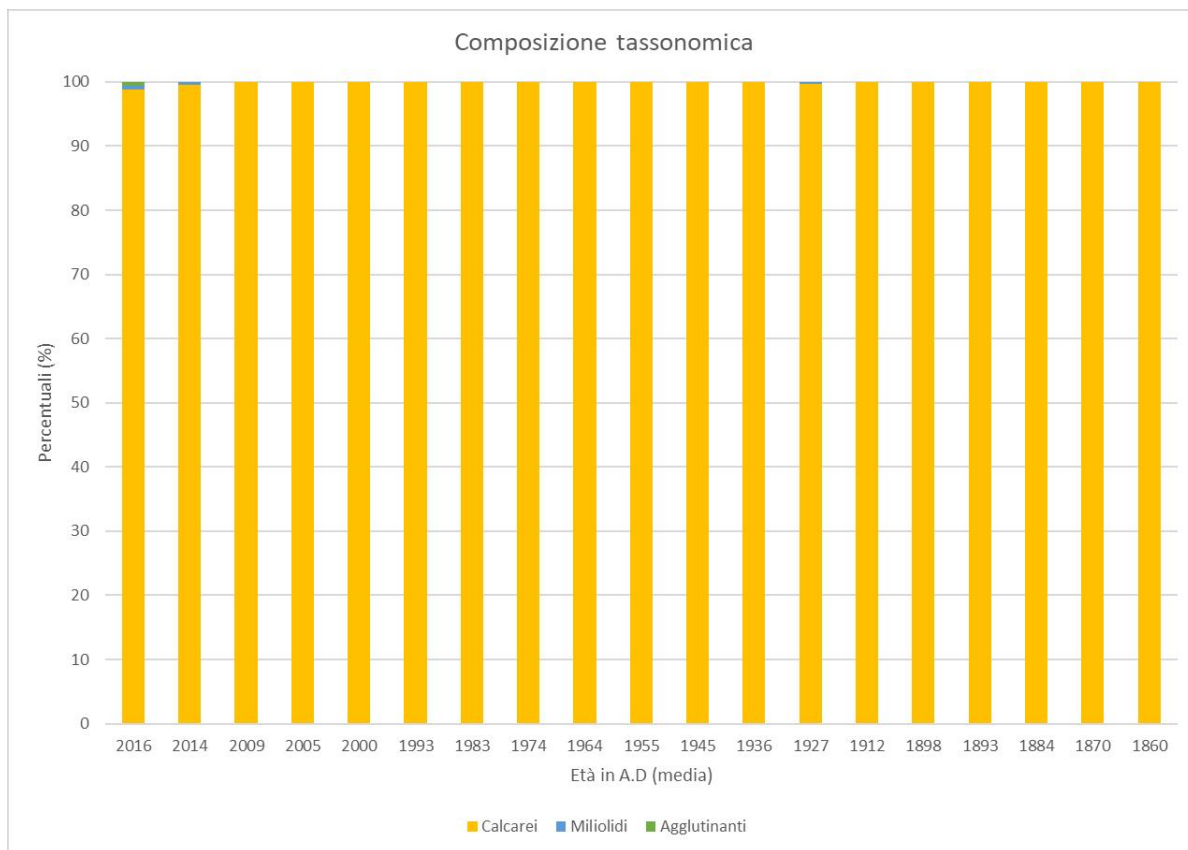
Le specie più abbondanti (>5%) sono risultate appartenenti al gruppo tassonomico dei foraminiferi calcarei e sono: *Astrononion hamadaense*, *Cibicides refulgens*, *Elphidium excavatum*, *Epistominella exigua*, *Islandiella norcrossi*, *Lobatula lobatula*, *Melonis affinis*, *Nonionellina labradorica*, *Pullenia bulloides*, *Trifarina angulosa*, *Trifarina fluens*.

Le specie meno abbondanti (tra 1%-5%) sono anch'esse risultate appartenenti al gruppo al gruppo tassonomico dei foraminiferi calcarei e sono: *Cassidulina reniforme*, *Cassidulina neoteretis*, *Nonionella auricula*, *Cibicidoides wuellerstorfi*, *Globocassidulina subglobosa*, *Lagena* spp.

Le specie rare e/o occasionali (tra 0,1%-0,01%) sono risultate appartenere sia ai calcarei perforati che imperforati o miliolidi e agli agglutinanti e in particolare sono:

- Perforati: *Discorbis vilardeboanus*, *Fissurina* spp., *Globobulimina auriculata* subsp. *arctica*, *Islandiella helenae*, *Lenticulina gibba*, *Lenticulina* spp., *Nonionella iridea*, *Patellina corrugata*, *Pseudopolymorphina novangliae*;
- Imperforati o miliolidi: *Miliolinella* spp., *Pyrgo* spp., *Triloculina tricarinata*;
- Agglutinanti: *Reophax fusiformis* e *Reophax scorpiurus*.

Durante il picking non sono state prese in considerazione le specie rimaneggiate o piritizzate. Nei campioni sono stati individuati anche frustoli vegetali, radioli di Echinodermi, gusci di Bivalvi e Gasteropodi e, spicole silicee.



**Figura 18:** Istogramma in percentuale delle componenti tassonomiche che si riferiscono ai calcarei perforati (giallo), ai calcarei imperforati o miliolidi (blu) e agglutinanti (verde).

Dal grafico (Figura 18) è possibile osservare la predominanza di foraminiferi calcarei imperforati lungo tutta la carota.

Per l'analisi degli indici di diversità dei dati è stato utilizzato il software PAST (PAleontological STatistic - versione 3.01) (Hammer et al., 2001), che ha permesso di calcolare gli indici di diversità (taxa, dominanza, Shannon e equitabilità).

Gli indici di diversità rappresentati nel grafico sottostante (Figura 19) indicano che nell'anno 2016 sono presenti valori maggiori di equitabilità e Shannon, con rispettivamente 0,8598 per l'equitabilità e 2,532 per Shannon.

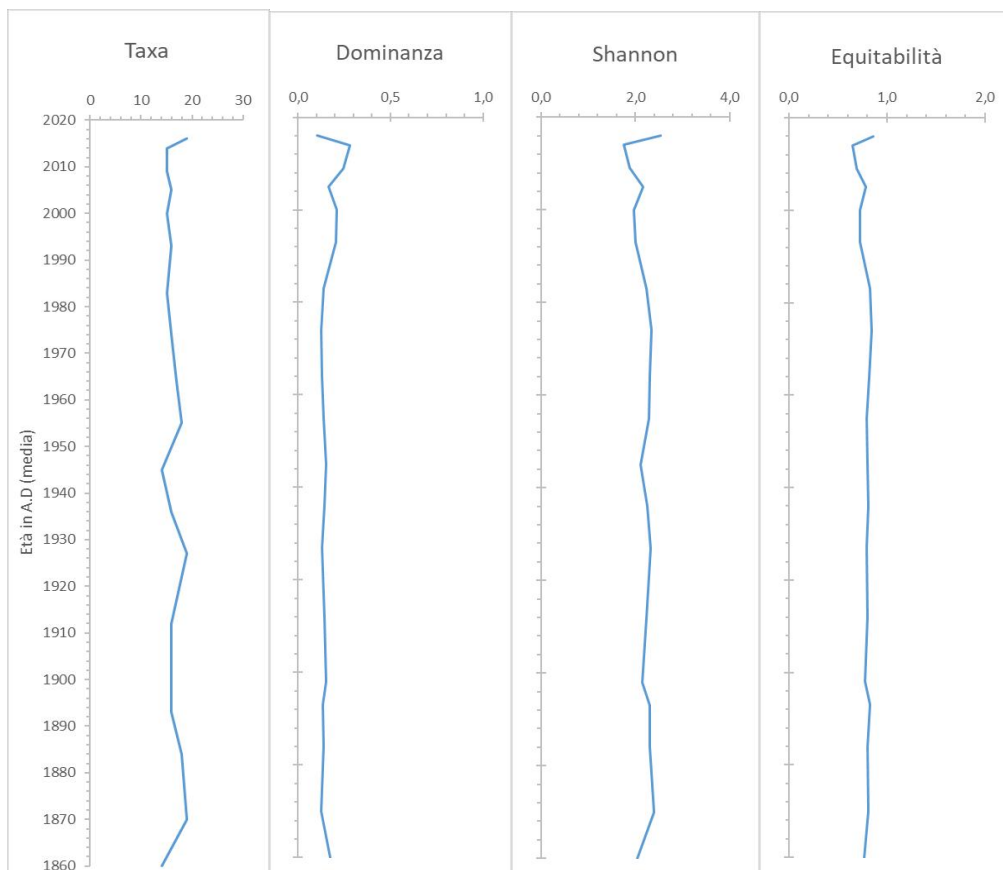
I valori minimi di equitabilità sono espressi nell'anno 1993 con un valore di 0,7227.

I valori minimi di Shannon sono espressi nell'anno 2014 con un valore di 1,755.

L'anno 2016, insieme agli anni 1927 e 1870 mostrano alti livelli di taxa con un valore di 19.

Il campione, relativo all'anno 2014, ha un maggiore valore di dominanza (0,2825) contrapposto al valore di Shannon che risulta essere il più basso lungo tutta la carota in analisi.

In conclusione, il campione corrispondente all'anno 2016, in virtù del valore dell'indice di Shannon (2.532), risulta chiaramente diversificato rispetto ai restanti campioni.

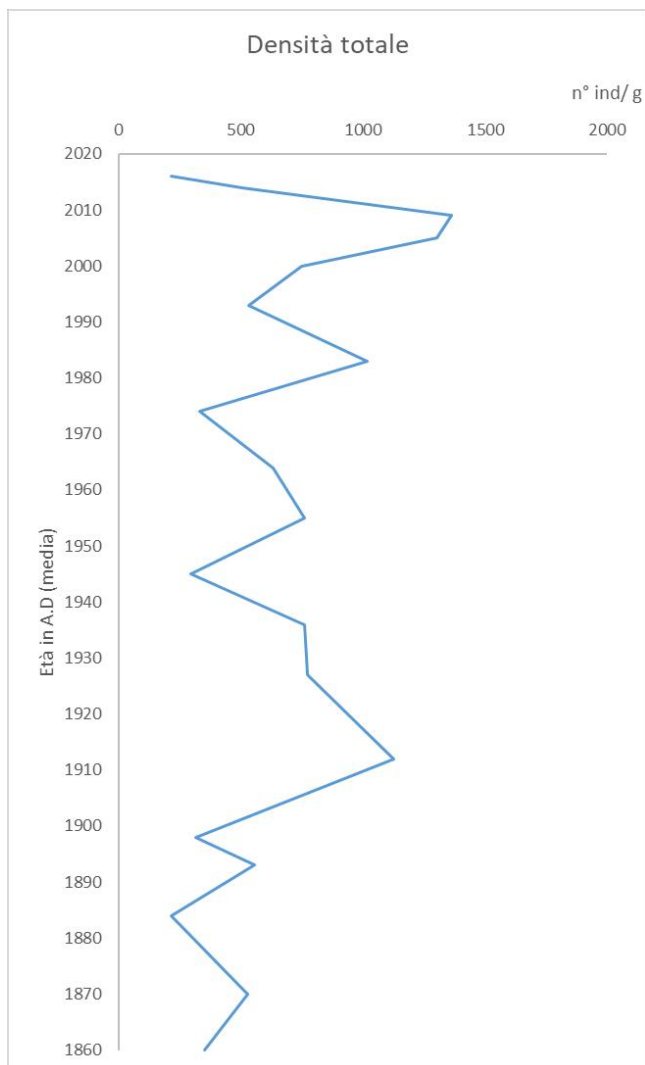


**Figura 19:** Indici di diversità lungo tutta la carota.

### ***3.3 Abbondanza assoluta e relativa dei foraminiferi bentonici***

In questo paragrafo si descrive l'andamento delle abbondanze assolute (n° ind/gr sed) e relative (%) delle specie di foraminiferi bentonici lungo la carota in funzione delle età.





**Figura 20:** Densità totale dell'associazione a foraminiferi bentonici espressa in numero di individui per grammo di sedimento.

L'andamento della densità dell'associazione totale fluttua lungo tutta la carota 21-5 (Figura 20).

Partendo dal fondo si individuano dei picchi negli intervalli relativi all'anno 1870 con una densità di 529 individui/gr sed, nell' anno 1893 con una densità

di 558 individui/gr sed, nell' anno 1912 con una densità di 1127 individui/gr sed, nell'anno 1936 con una densità di 760 individui/gr sed, nell'anno 1955 con una densità di 761 individui/gr sed, nell'anno 1983 con una densità di 1018 individui/gr sed e 2009 con una densità di 1364 individui/gr sed. Si riscontra come ci sia una tendenza di costante aumento a partire dal valore più basso riferito all'intervallo 14-15 cm (relativo all'anno 1884) fino al valore più alto riferito all'intervallo 1-1,5 cm (relativo all'anno 2009).

Di seguito compare la descrizione delle abbondanze (relative in percentuale) delle specie più abbondanti con relativi grafici.

**Specie più abbondanti (>5%):**

- *Cassidulina neoteretis*

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie dal 1860 fino al 1945 presenta valori di abbondanza relativa generalmente bassi che in diversi casi culmina con l'assenza delle specie in questi anni: 1860, 1893, 1898, 1912, 1945. È presente un picco nell'anno 1974 con un massimo percentuale di 8,16% seguito da una diminuzione. È presente un secondo picco nell'anno 2016 con un massimo percentuale di 4,09%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): la specie dal 1860 fino al 1974 presenta valori generalmente bassi. Si osserva un picco nell'anno 1983 (30,13

ind/gr sed) e un secondo picco nell'anno 2009 (55,49 ind/gr sed). Dal 2009 al 2014 si registra una diminuzione nell'abbondanza assoluta (8,04 ind/gr sed) ed un successivo aumento nell'anno 2016 con un valore di 8,84 ind/gr sed.

- ***Cibicides refulgens***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è largamente distribuita lungo tutta la carota. Si registrano valori crescenti dall'alto verso il basso che culminano con un picco nell'anno 2014 con un valore di 47,83% che rappresenta il valore più alto.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): la specie si presenta uniformemente distribuita lungo tutta la carota. Dal 1860 fino al 2005 presenta valori generalmente bassi. Nel 2009 si registra un picco di 601,16 ind/gr sed. E successivamente si osserva una diminuzione della abbondanza assoluta tra il 2014 (243,22 ind/gr sed) e il 2016 (32,65 ind/ gr sed).

- ***Elphidium excavatum***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è distribuita lungo tutta la carota, con valori di abbondanza relativa sempre superiori al 5%. Si registrano tre picchi: nell'anno 1893 con un valore di 20,30%, nell'anno 1945 con un valore di 18,68% e nell'anno 1983 con un valore di 15,78%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): la specie risulta abbondante in tutto l'intervallo studiato con un andamento leggermente oscillante. Dal 1860 fino al 1898 si registrano valori bassi e un successivo picco nell'anno 1912 (202,04 ind/gr) che rappresenta il valore più alto registrato. Dal 1927 fino al 1974 i valori tendono a diminuire e nel 1983 si registra un secondo picco con un valore di 160,67 ind/gr sed. Un terzo picco si registra nell'anno 2005 con un valore di 156,73 ind/gr sed, dal 2009 fino al 2016 i valori tendono a diminuire.

- ***Epistominella exigua***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è presente in tutta la carota tranne nell'anno 1898 e nell'anno 1936. L'andamento tende ad essere crescente, si registrano i valori più bassi verso il fondo della carota, ad esempio nell'anno 1184 con un valore di 0,85%, e valori più alti verso l'apice della carota, ad esempio nell'anno 1964 con un valore di 6,69%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): come per l'abbondanza relativa anche in questo caso l'andamento risulta essere crescente dal basso verso l'alto, con il valore minimo registrato nel 1893 di 12,59 ind/gr sed e un valore massimo registrato nell'anno 2009 con un totale di 73,99 ind/gr sed.

- ***Islandiella norcrossi***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): le percentuali di frequenza della specie sono piuttosto basse nella parte inferiore dell'intervallo studiato. Esse, tuttavia,

aumentano notevolmente tra gli anni 1927 e 1983 con valori al di sopra del 15%. Dal 1993 fino al 2016 i valori tendono a diminuire raggiungendo un picco minimo nell'anno 2014 con un valore di 3,95%, che rappresenta la percentuale più bassa registrata.

Abbondanza assoluta (n° ind/gr sed) (Figura 21): la specie è presente lungo tutto l'intervallo in analisi. Presenta valori estremamente bassi nella porzione finale della carota, più in particolare dall'anno 1860 fino all'anno 1898. Dall'anno 1912 fino all'anno 2005 i valori tendono ad aumentare vistosamente raggiungendo un picco massimo nell'anno 1983 con un valore di 187,45 ind/gr sed.

- ***Lobatula lobatula***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è presente in tutta la carota tranne nell'anno 1898. L'andamento del grafico viene definito “a dente di sega” perché presenta continue fluttuazioni dal basso verso l'alto della carota. È generalmente presente un'abbondanza in termini percentuali piuttosto bassa, tranne nell'anno 1870 dove si registra il picco più alto di 9,77%.

Abbondanza assoluta (n° ind/gr sed) (Figura 21): per ciò che riguarda l'abbondanza assoluta, non si registrano differenze dal grafico relativo all'abbondanza in percentuali. Quindi presenta un andamento incostante, dove si registrano aumenti in densità e fluttuazioni negativa dal 1860 fino al 2016

con un picco massimo nell'anno 1870 che presenta un valore di 51,61 ind/gr sed.

- ***Melonis affinis***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): l'andamento della specie è abbastanza regolare lungo tutta la carota con percentuali comprese tra il 15% e il 25%. Si osserva tuttavia un picco di abbondanza di 28,79% nell'anno 1936. Dal 1955 fino al 2000 si registra una oscillazione negativa con valori intorno al 10%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): la specie è presente in tutto l'intervallo in maniera regolare. La curva presenta un andamento oscillante. Tra il 1860 e il 1898 i valori sono tendenzialmente bassi e culminano con un picco di 192,26 ind/gr sed nell'anno 1912. Dall'anno 1912 fino all'anno 1936 si registrano valori alti con un picco massimo nell'anno 1936 con un totale di 218,71 ind/gr sed. Dal 1945 fino al 2005 l'andamento è piuttosto discontinuo, con valori che tendono a diminuire raggiungendo un terzo picco nell'anno 2009 con un totale di 226,59 ind/gr sed, che rappresenta il valore più alto registrato.

- ***Nonionellina labradorica***

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie presenta valori alti nella porzione inferiore della carota, in particolar modo dall'anno 1884 fino all'anno 1936 con valori che superano il 10%. Dal 1945 fino al 2014 i valori tendono a

diminuire e culminano con un picco nell'anno 2016 che registra un valore di 8,49%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): la specie è abbondantemente presente lungo tutta la carota, si osserva tuttavia tra il 1884 e il 1936 un massimo di abbondanza assoluta, con un picco significativo nell'anno 1936 che registra un valore di 80,58 ind/gr sed. Una decrescita significativa viene registrata negli anni 1884, 1945, 1974, 1993 e 2014 con valori intorno al 10 ind/gr sed.

- *Trifarina angulosa*

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è presente lungo tutta la carota con valori relativamente bassi sempre al di sotto del 5%. Si osserva tuttavia un picco di abbondanza di 5,97% nell'anno 2016.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr) (Figura 21): la specie è presente lungo tutta la carota, con valori bassi. Nella parte centrale delle carota, tra gli anni 1912 e 1927 si riscontra l'abbondanza maggiore. Dal 1936 fino al 2009 l'andamento diventa più oscillante e contemporaneamente si osserva una diminuzione dell'abbondanza che culmina nel 2005 con un picco che registra 39,18 ind/gr sed. Dal 2009 al 2016 la specie presenta valori di abbondanza assoluta generalmente bassi.

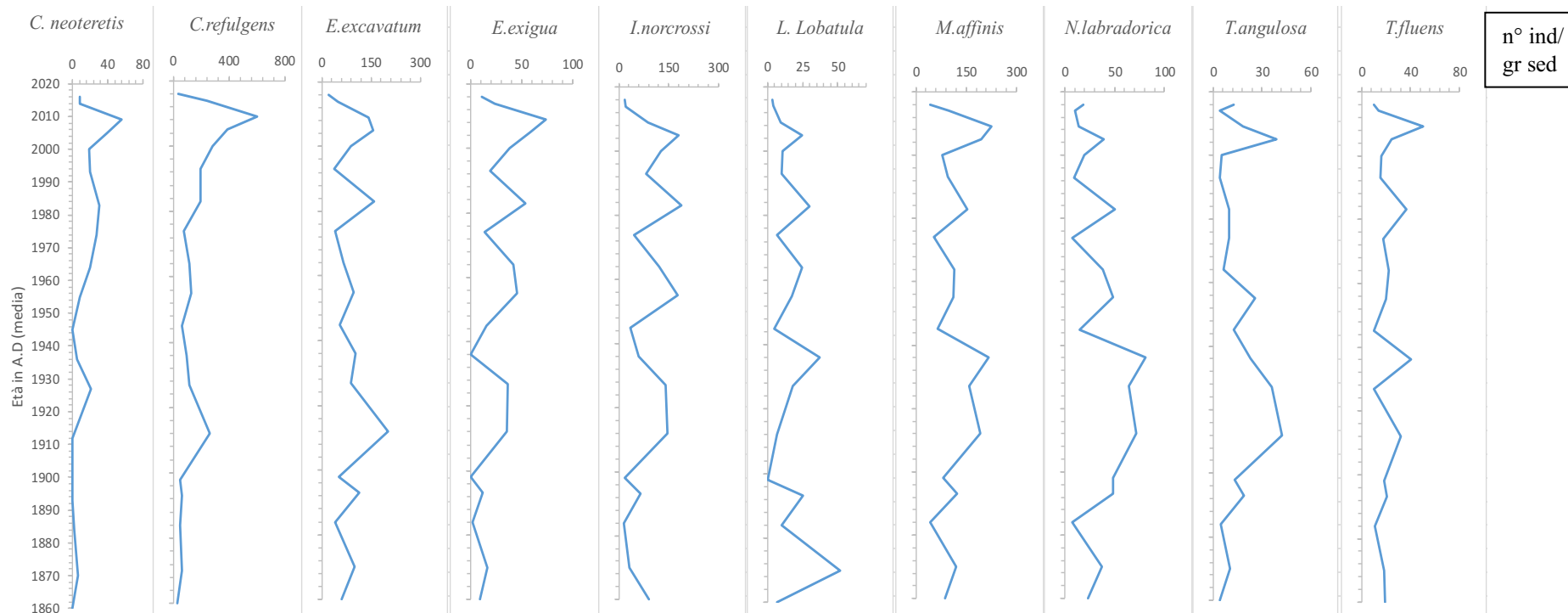
- *Trifarina fluens*

Abbondanza relativa (%) (Figura 22): la specie è presente in tutta la carota con percentuali che rimangono intorno al 5%. Nell'anno 1927 si evidenzia un'oscillazione negativa di 1,34% e nell'anno 2005 una seconda oscillazione negativa di 1,88%.

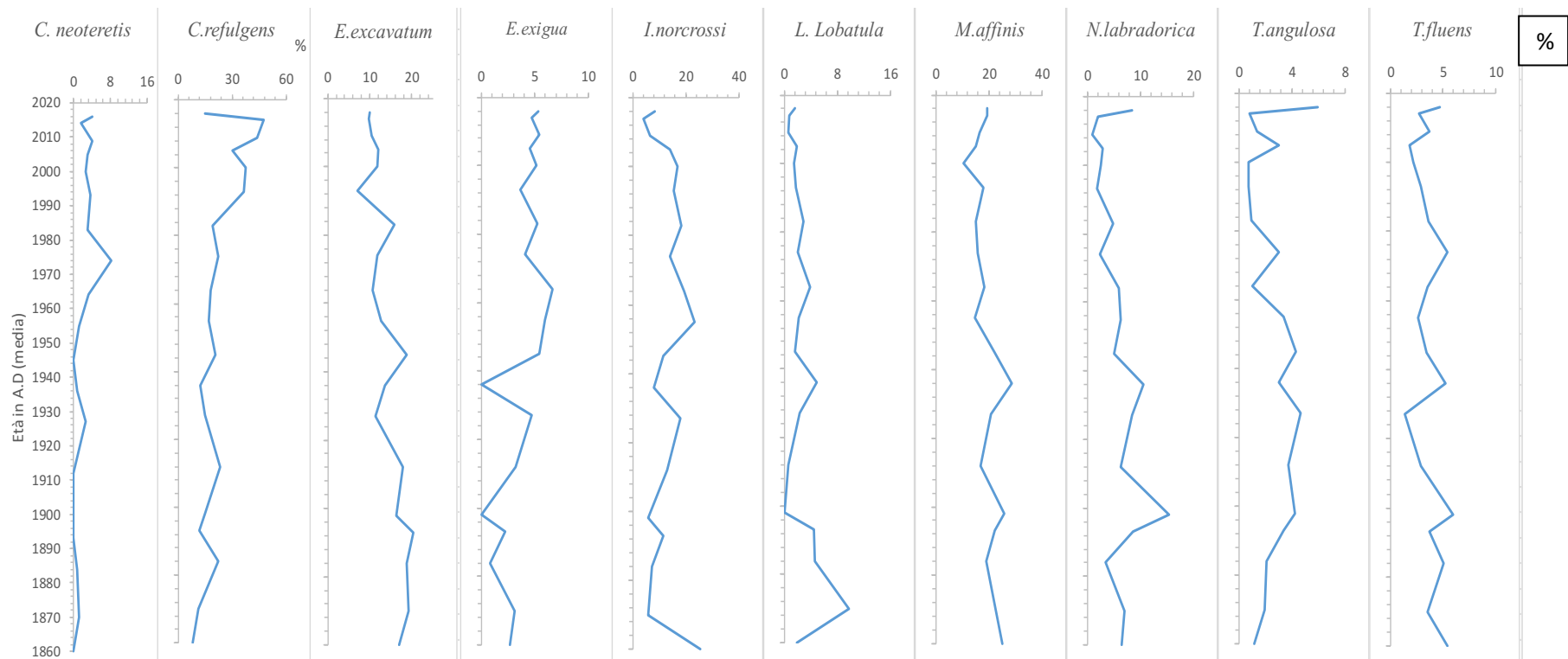
Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 21): si evidenziano tre picchi significativi: nell'anno 1936 con un valore di 40,29 ind/gr sed, nell'anno 1983 con un valore di 36,82 ind/gr sed e nell'anno 2009 con un valore di 50,87 ind/gr sed. Dal 1860 fino all'anno 1922 l'andamento diviene più oscillante e si osserva contemporaneamente una diminuzione dell'abbondanza, così come dal 1945 fino al 1974 e dal 1993 fino al 2005. Dal 2014 fino al 2016 si registrano valori generalmente bassi.

La carota 21-5 è caratterizzata dalla predominanza di specie di *Cibicides refulgens* con più del 21,54% e *Melonis affinis* con 19,29%. *Elphidium excavatum* e *Islandiella norcrossi* hanno circa le stesse percentuali (%), rispettivamente di 13,96% e 13,01%. *Cassidulina neoteretis*, *Epistominella exigua*, *Lobatula lobatula*, *Nonionellina labradorica*, *Trifarina angulosa* e *Trifarina fluens* hanno appena superato il 5%.





**Figura 21:** Specie più abbondanti (>5%)-(n° ind/gr sed).



**Figura 22:** Specie più abbondanti (>5%)-(%).

**Specie meno abbondanti (<5%):**

- *Astrononion hamadaense*

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie è presente lungo tutta la carota, tranne nell'anno 2014, con percentuali sempre al di sotto del 5% con un massimo nell'anno 2016 di 4,09 %.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 23): la specie è presente in tutta la carota, tranne nell'anno 2014, con un andamento oscillante e valori sempre al di sotto di 40 ind/gr sed. Nell'anno 2005 si registra il picco maggiore con un valore di 39,18 ind/gr sed.

- *Cassidulina reniforme*

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie è presente in tutti i campioni studiati tranne negli anni 1860, 1955, 1983, 2000 e 2014. L'andamento è abbastanza regolare, anche se si osserva un lieve aumento delle percentuali di frequenza nella parte bassa della carota che culmina con un'oscillazione positiva nell'anno 1898 con 3,87%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 23): la specie nella parte bassa della carota è ben rappresentata e tende a diminuire in densità nelle porzioni più apicali. Il valore più alto viene registrato nell'anno 1893 con un totale di 14,68 ind/gr sed.

- ***Cibicidoides wuellerstorfi***

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie è presente in quasi tutti i campioni dell'intervallo studiato. L'andamento è oscillante, dal 1964 fino al 2016 non si registra la presenza di individui della specie. Si registrano altre due oscillazioni negative, nell'anno 1898 e dall'anno 1936 all'anno 1945. I valori non superano mai il 3%.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 23): la specie è presente dal 1860 fino al 1893 con una densità piuttosto bassa, dal 1912 al 1927 con la densità più alta registrata lungo la carota. Si definisce un picco nell'anno 1912 con un valore di 22,81 ind/gr sed. La specie è presente anche nell'anno 1955 con un valore di 17,11 ind/gr sed.

- ***Globocassidulina subglobosa***

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie risulta abbondante dall'anno 1955 fino all'anno 1993 con picchi che non superano mai il 3%. Dall'anno 1912 all'anno 1955 la specie risulta assente, così come in altri punti lungo la carota (1860,1870, 1993, 2009).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 23): la specie presenta valori piuttosto alti nella porzione apicale della carota, dall'anno 1964 all'anno 2014. Durante questo arco temporale si registrano due valori che culminano a zero nell'anno 1993 e 2009. Il picco maggiore si registra nell'anno 1964 con un

valore di 13,33 ind/gr sed. Dopodiché la densità tende a scendere per poi risalire raggiungendo un altro picco nell'anno 2014 con un valore di 12,06 ind/gr sed.

- ***Lagena spp.***

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): l'andamento è discontinuo, nelle porzioni più basse della carota si registrano valori generalmente bassi, sempre al di sotto del 2%. Due picchi si registrano nella porzione più alta della carota in particolar modo nell'anno 1983 con un valore di 2,96% e nell'anno 2016 con un valore di 3,14%.

Abbondanza assoluta (n° ind/gr sed) (Figura 23): la specie è presente lungo tutto l'intervallo studiato con un unico punto in cui culmina a zero che riguarda l'anno 1860. Dal 1870 l'andamento è piuttosto regolare, con una densità mai superiore ai 20 ind/gr sed. È presente un unico picco nell'anno 1983 dove si registra un valore di 30,13 ind/gr sed.

- ***Nonionella auricula***

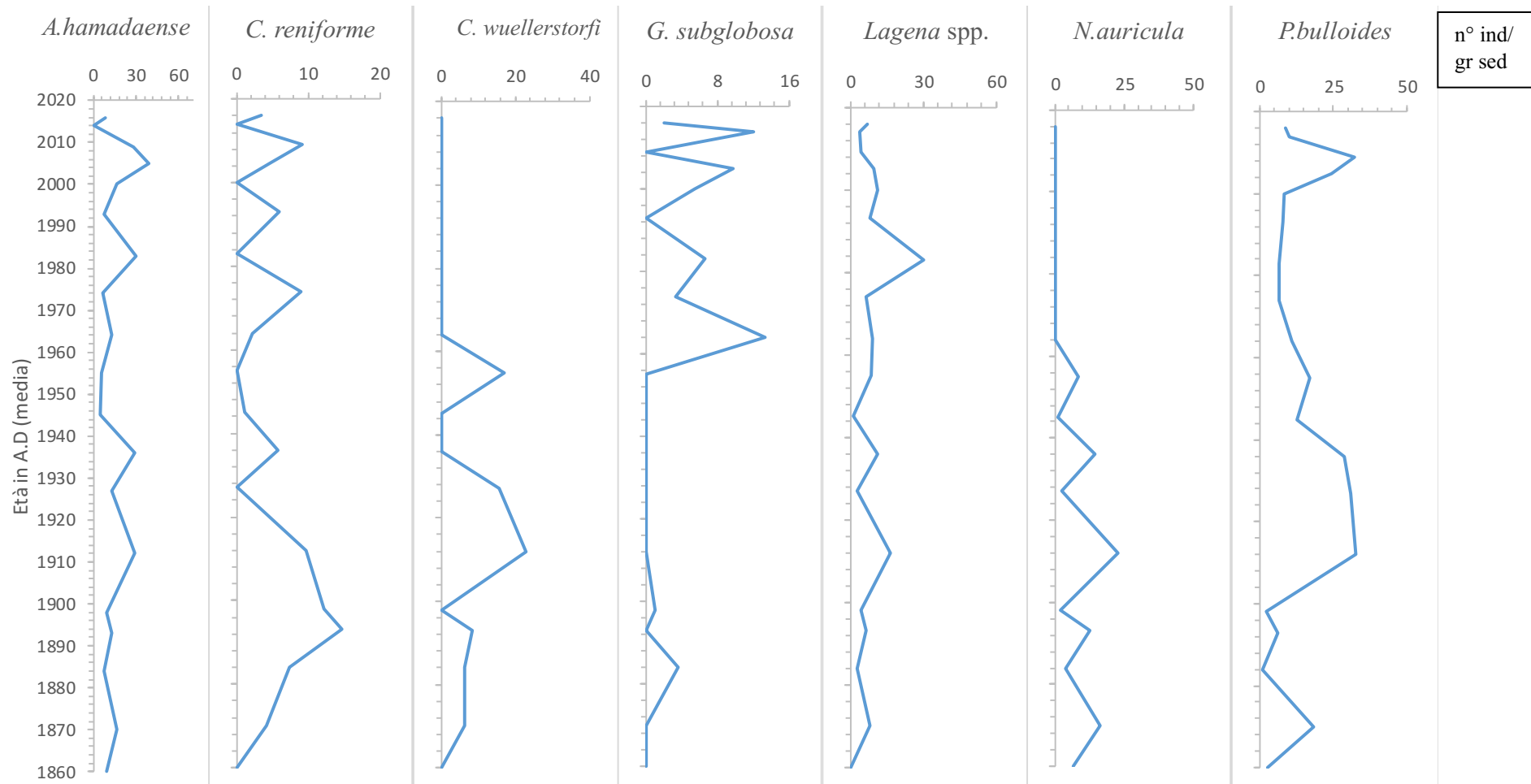
Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie è ben rappresentata nella parte bassa della carota con una tipica rappresentazione grafica “a dente di sega”. Si registra un picco in abbondanza nell'anno 1912 e percentuali sempre al di sotto del 4% con un picco massimo nell'anno 1870 con 3,13%. Dall'anno 1964 fino al 2016 si registra un'assenza di specie.

Abbondanza assoluta (n° ind/gr sed) (Figura 23): la specie è presente solo nelle porzioni inferiori della carota con una densità che non supera mai i 30 ind/gr sed. Il picco maggiore viene registrato nell'anno 1912 con un valore di 22,81 ind/gr sed. Dopodichè la densità tende a diminuire terminando a zero nell'anno 1964 fino al 2016 (apice della carota).

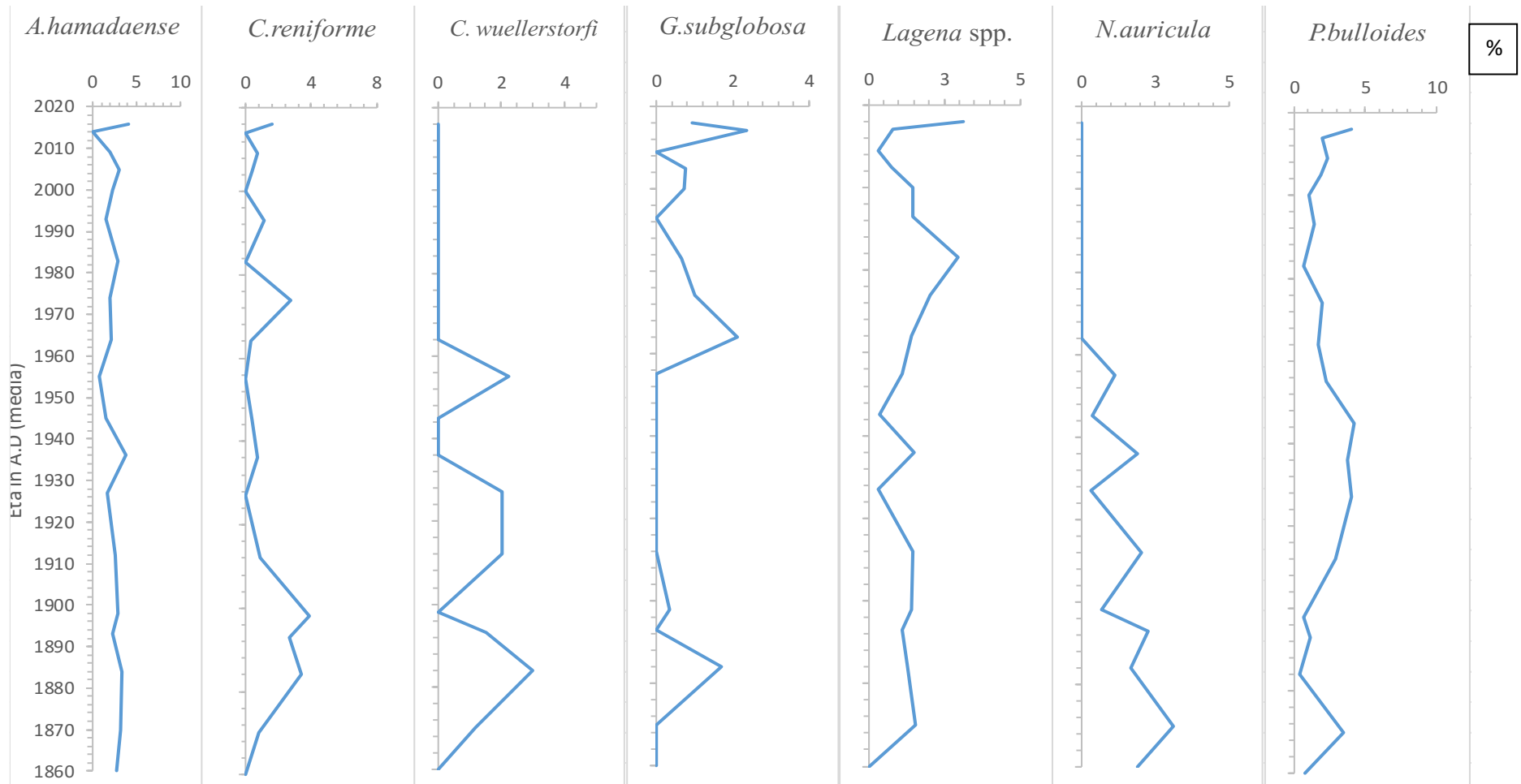
- ***Pullenia bulloides***

Abbondanza relativa (%) (Figura 24): la specie è presente in percentuali sempre al di sotto del 3% lungo tutta la carota con un andamento costante. Sono presenti due picchi relativi all'anno 1945 con un valore di 4,28% e nell'anno 2016 con un valore di 4,09%.

Abbondanza assoluta (n° ind/gr sed) (Figura 23): l'andamento della specie è abbastanza regolare lungo tutta la carota, con un significativo aumento di densità dall'anno 1912 dove si registra il valore massimo di 32,59 ind/gr sed fino all'anno 2009 dove si registra un valore di 32,37 ind/gr sed. Dall'anno 2009 fino all'anno 2016 l'andamento tende a diminuire.



**Figura 23:** Specie meno abbondanti (<5%)-(ind/gr sed).



**Figura 24:** Specie meno abbondanti (<5%)-(%).



**Specie rare e/o occasionali (in media tra 0,1%-0,01%):**

- ***Discorbis vilardeboanus***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie presenta valori generalmente bassi e con un picco nell'anno 2005 (1,88%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie presenta valori generalmente bassi e con un picco nell'anno 2005 (24,49 ind/gr sed).

- ***Fissurina spp.***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente nell'anno 1995 (0,75%) e nell'anno 1964 (0,70%) con un totale di quattro individui.

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente nell'anno 1995 (5,70 ind/ gr sed) e nell'anno 1964 (4,44 ind/ gr sed).

- ***Globobulimina auriculata subsp. Arctica***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente nell'anno 1936 (0,38%) e nell'anno 1993 (0,74%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente nell'anno 1936 (2,88 ind/ gr sed) e nell'anno 1993 (3,93 ind/ gr sed).

- ***Islandiella helenae***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente nell'anno 1898 (0,70%) e nell'anno 1927 (0,34%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente nell'anno 1898 (2,22 ind/ gr sed) e nell'anno 1927 (2,59 ind/ gr sed).

- ***Lenticulina gibba***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente nell'anno 1870 (0,39%) e 1955 (0,37%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente nell'anno 1870 (2,06 ind/gr sed) e 1955 (2,85 ind/ gr sed).

- ***Lenticulina spp.***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 1884 (0,43%)

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 1884 (0,92 ind/ gr sed).

- ***Miliolinella spp.***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 2016 (0,63%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 2016 (1,36 ind/ gr sed).

- ***Nonionella iridea***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente dal 1860 al 1870 (0,39%) e nel 1927 (1,01%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente dal 1860 (1,36 ind/ gr sed) al 1870 (2,06 ind/ gr sed) e nel 1927 (7,77 ind/ gr sed).

- ***Patellina corrugata***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 1898 (0,35%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 1898 (1,11 ind/ gr sed).

- ***Pseudopolymorphina novangliae***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente nell'anno 1870 (0,39%) e nell'anno 1893 (0,75%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente nell'anno 1870 (2,06 ind/gr sed) e nell'anno 1893 (4,19 ind/ gr sed).

- ***Pyrgo spp.***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 1927 (0,34%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 1927 (2,59 ind/ gr sed).

- ***Reophax fusiformis***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 2016 (0,31%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 2016 (0,68 ind/ gr sed).

- ***Reophax scorpiurus***

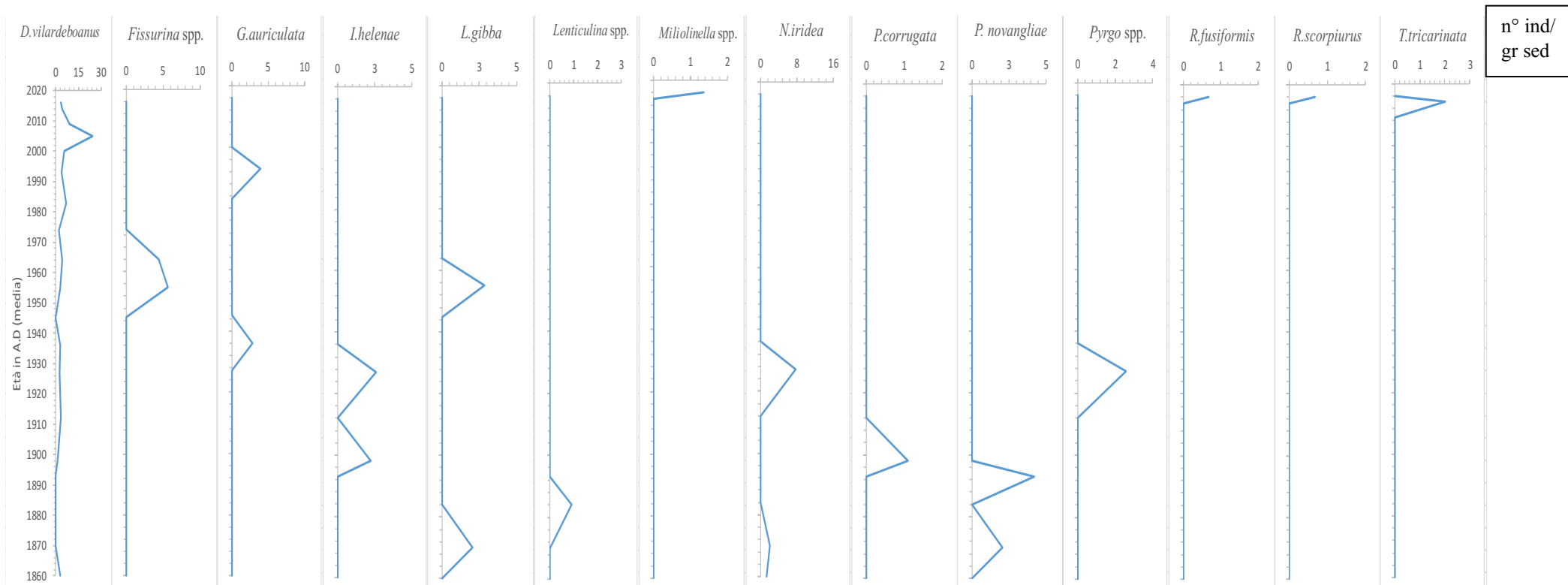
Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 2016 (0,31%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 2016 (0,68 ind/ gr sed).

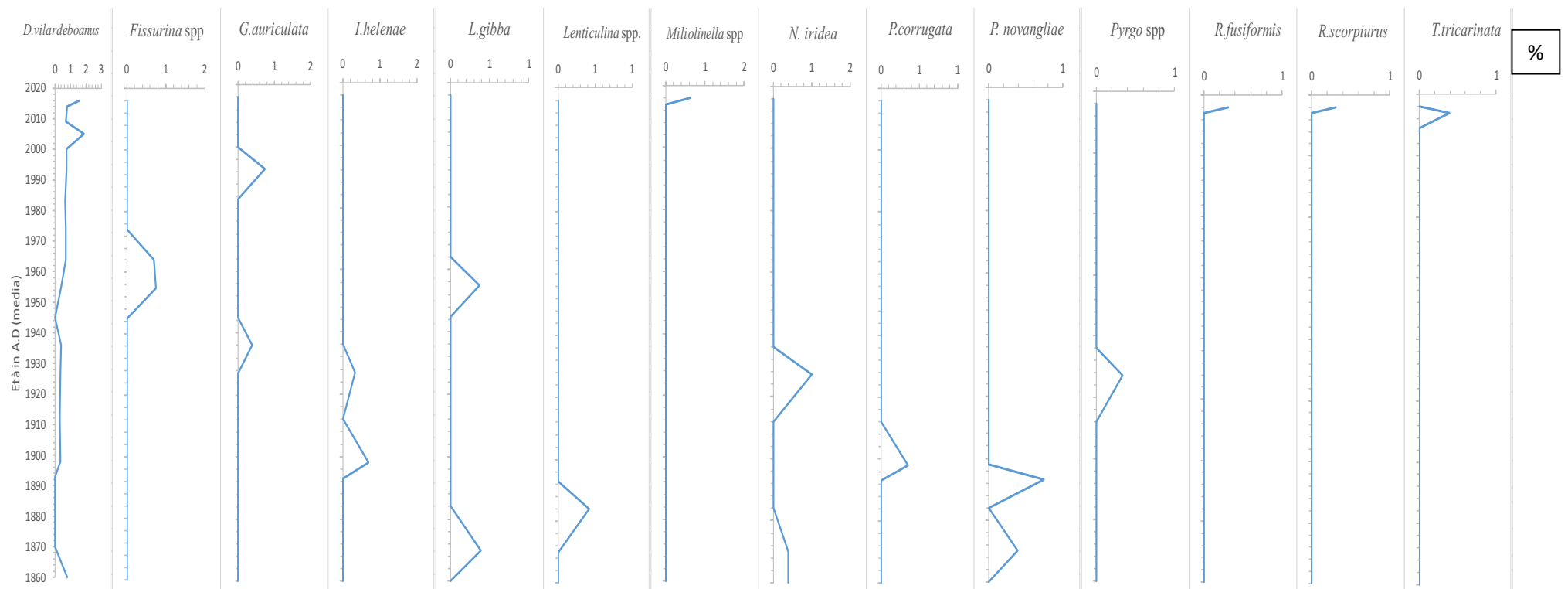
- ***Triloculina tricarinata***

Abbondanza relativa (%) (Figura 26): la specie è presente solo nell'anno 2014 (0,40%).

Abbondanza assoluta (n°ind/gr sed) (Figura 25): la specie è presente solo nell'anno 2014 (2,01 ind/ gr sed).



**Figura 25:** Specie rare e/o occasionali (in media tra 0,1%-0,01%)-(ind/gr sed).



**Figura 26:** Specie rare e/o occasionali (in media tra 0,1%-0,01%)-(%).

### ***3.4 Distribuzione dei principali gruppi ecologici***

L'ecologia è lo studio delle cause dei modelli di distribuzione e abbondanza degli organismi. Riguarda l'interazione tra i diversi individui e con l'ambiente chimico e fisico. Ne consegue che per ogni specie è probabile che fattori diversi o una combinazione di fattori (abiotici e biotici) limitino le distribuzioni sia spaziali che temporali. In un determinato ambiente possono esistere correlazioni molto forti tra alcune specie di foraminiferi e uno specifico fattore (temperatura, nutrienti, ossigeno disciolto, competizione, predazione ecc.) (Murray, 2006). Per interpretare i segnali ambientali utilizzando le associazioni di foraminiferi, le specie sono state raggruppate in base alle loro caratteristiche ecologiche tipiche, documentate nella letteratura esistente in:

- **Specie opportuniste:** *Nonionella auricula*, *Nonionella iridea*, *Nonionellina labradorica*, *Islandiella norcrossi*, *Islandiella helenae*, *Trifarina fluens*, *Pullenia bulloides*, *Lagena* spp., *Epistominella exigua*.

La strategia di vita opportunistica rende le specie altamente adatte a far fronte allo stress ambientale e le fa prevalere in aree soggette a condizioni ambientali in rapido cambiamento. Molto frequentemente specie quali *Epistominella exigua* tenderanno a colonizzare ambiente precedentemente soggetti ad anossia.

Le specie si presentano con un'abbondanza relativa mai superiore al 43,24% (Figura 27), valore identificabile nell'anno 1860. Dall'anno 1860 fino all'anno 1884 si verifica una diminuzione nell'abbondanza relativa delle specie che culmina nel 1884 con il valore più basso identificabile (20%). Dall'anno 1884 fino al 1927 si registra un aumento che culmina con un secondo picco nell'anno 1927 con un valore di 38,55%. Un terzo picco si individua nell'anno 1955 con un valore di 42,70%. Dal 1955 fino al 2016 è presente una diminuzione nell'abbondanza relativa delle specie che termina con un ultimo picco nell'anno 2016 dove si delinea un valore di 34,28%. L'andamento è di tipo oscillante e mostra due fluttuazioni positive alla base e al tetto della carota.

- **Specie epifite:** *Patellina corrugata*, *Lobatula lobatula*, *Trifarina angulosa*, *Astrononion hamadaense*, *Pyrgo* spp., *Cibicides refulgens*.

L'andamento delle specie è costante (Figura 27), da un picco più basso identificabile nell'anno 1860 con un valore di 13,90% si passa ad un picco più alto identificabile nell'anno 2014 con un valore di 49,41%. Si registra un aumento graduale delle specie dal fondo fino all'apice della carota.

- **Specie anossiche:** *Globobulimina auriculata* subsp. *arctica*, *Lenticulina gibba*, *Lenticulina* spp.

Le specie anossiche comprendono tutte quelle specie in grado di sopravvivere in ambienti dove le concentrazioni di ossigeno sono limitanti. L'ossigeno



disciolto è uno dei principali fattori di controllo delle comunità bentoniche. Ogni specie mostra una precisa affinità a condizioni di maggiori o minori concentrazioni di ossigeno e in questo modo è possibile interpretare la situazione dei sedimenti e delle acque di fondo a contatto con essi.

L'andamento è discontinuo (Figura 27). Si osserva un picco corrispondente all'anno 1884, successivamente la specie è assente e tale rimane fino al 1936 dove si registra un secondo picco. Tra il 1964 e il 1983 non sono presenti specie. Il numero in abbondanza relativa delle specie cresce in maniera piuttosto rapida nel 1993 e, successivamente, torna a zero fino al 2016 (apice della carota).

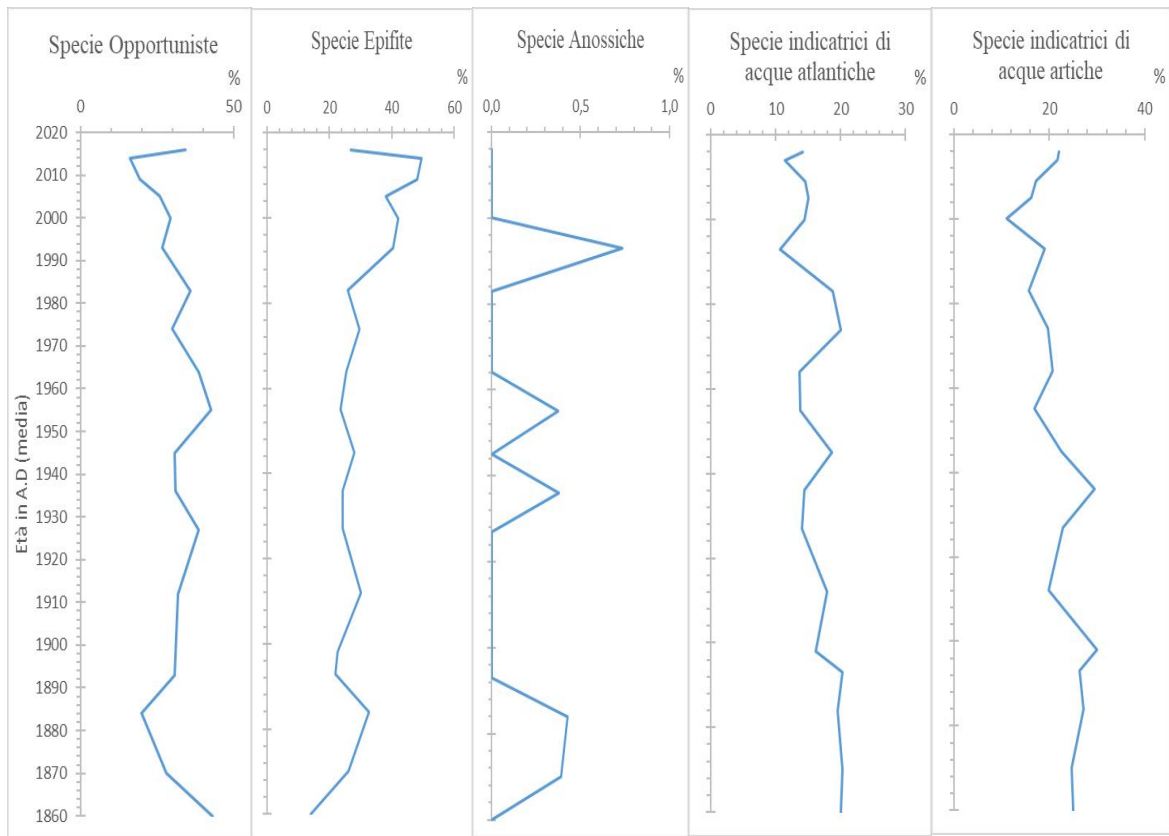
- **Specie indicatrici di acque atlantiche:** *Cassidulina neoteretis*,  
*Elphidium excavatum*.

L'andamento delle specie è costante (Figura 27). Si registra un'abbondanza relativa delle specie sempre superiore al 10% con un picco massimo nell'anno 1983 di 20,30%. L'andamento tende a diminuire verso le porzioni più apicali della carota, dal 1993 al 2016.

- **Specie indicatrici di acque artiche:** *Cassidulina reniforme*,  
*Cibicidoides wuellerstorfi*, *Globocassidulina subglobosa*.

Si osserva un picco corrispondente all'anno 1898 (Figura 27) e un altro picco corrispondente all'anno 1936, successivamente il numero cala e rimane molto basso fino al 2016. Il valore maggiore si osserva nell'anno 1936 dove si delinea

un'abbondanza relativa di 29,55%. Le percentuali non scendono mai sotto al 10% e viene registrata un'oscillazione negativa nell'anno 2000 (11,07%).



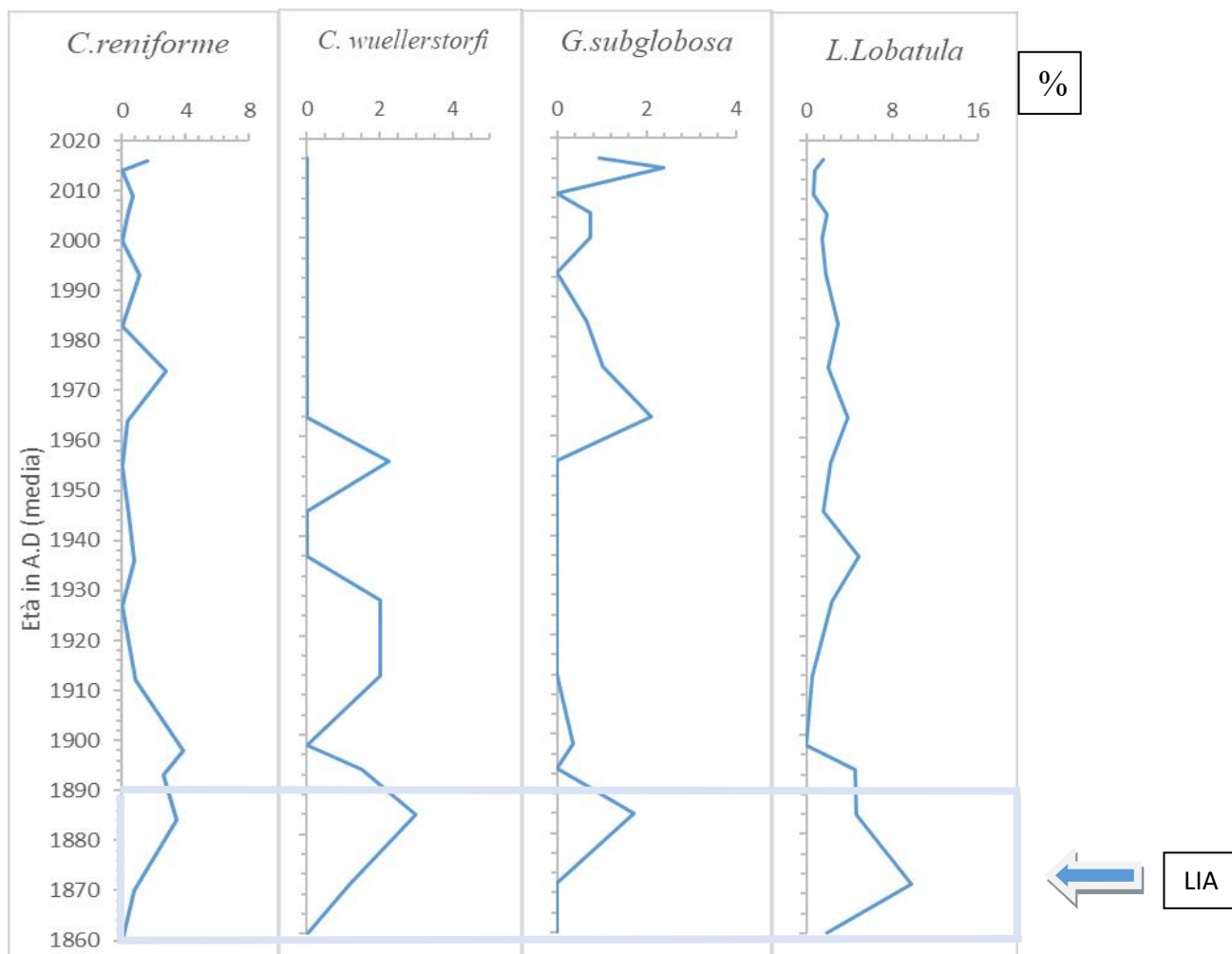
**Figura 27:** Abbondanza relativa dei principali gruppi ecologici.

#### 4. DISCUSSIONI

Lo studio della associazione a foraminiferi bentonici combinato con quello delle SCP's permette di mettere in evidenza degli intervalli caratterizzati da delle variazioni di densità di specie chiave di foraminiferi che sono in relazione con i cambiamenti della temperatura della colonna d'acqua e relativa eutrofizzazione dell'ambiente.

In particolare, si osservano (Figura 28- Figura 30) tra la base della carota riferita al 1860 e il 1890 associazioni caratterizzate da *C. reniforme* (con un valore di 3,40% nell'anno 1884), *C. wuellerstorfi* (con un valore di 2,98% nell'anno 1884), *G. subglobosa* (con un valore di 1,70% nell'anno 1884) e *L. lobatula* (con un valore di 9,77% nell'anno 1870) che indicano chiaramente un intervallo freddo. In particolare, *C. reniforme* è una specie indicatrice di acque fredde insieme a *G. subglobosa*; entrambe sono infaunali e *G. subglobosa* è abbondante nei sedimenti dove il contenuto e la qualità della materia organica che arriva al fondo sono scarsi. La presenza delle specie *C. wuellerstorfi* e *L. lobatula* indica invece un elevato idrodinamismo delle masse d'acqua. La scarsa densità dei foraminiferi bentonici totali, dove il valore più basso di tutta la serie storica si registra nell'anno 1884 con un valore complessivo di 216,34 ind/ gr sed, suggerirebbe delle condizioni sfavorevoli per l'associazione dei

foraminiferi, forse determinato dalla presenza di ghiaccio stagionale nella zona del Kveithola. Inoltre, simili condizioni ambientali sono state riportate anche da altri autori: Dijkstra et al. (2017) in Bjørnøyrenna, e Wilson et al. (2011) nel Mare di Barents. La presenza della copertura dei ghiacci implicherebbe inoltre la mancanza di un apporto di cibo al fondo e variazioni di salinità come evidenziato dalla scarsa presenza di *N. labradorica* e *C. neoteretis*. L'associazione a foraminiferi bentonici così descritta corrisponderebbe quindi alla situazione del bentos durante la fase di deterioramento freddo nota come Piccola Età Glaciale (LIA “*Little Ice Age*”).



**Figura 28:** Associazione di foraminiferi indicatori di acque artiche (%). La linea blu posizionata al 1890 indica la fine della LIA.

La stessa LIA è stata descritta nella carota 21-5 campionata nel canale di Kveithola (Gamboa-Sojo et al., 2021) nel corso della stessa campagna oceanografica durante la quale è stata campionata la carota oggetto di studio di questa tesi. Gli autori riportano che le specie dominanti erano *C. laevigata* (23%), *C. neoteretis* (21%), *C. lobatulus* (19%), *C. reniforme* e *C. refulgens*

(entrambe con un picco nel 1813 rispettivamente di 14% e il 12%). *E. clavatum*, *I. norcrossi*, *M. barleeanus* e *N. labradorica* raggiunsero più del 5% tra il 1827 e il 1848. *G. subglobosa* risulta abbondante verso il fondo della carota raggiungendo il 7% nel 1792 e aumenta nuovamente alla fine della LIA (1890). Come nel mio caso, la densità totale dei foraminiferi tende a diminuire lungo questo periodo che va dal 1600 al 1890.

Sebbene la LIA sia caratterizzata da un periodo di generale raffreddamento della temperatura terrestre terminato solitamente attorno alla fine del XIX secolo, sono ancora oggetto di ampio dibattito nella comunità scientifica questioni cruciali per comprendere la natura di questo fenomeno: si è trattato di un evento davvero globale o regionale? Quando può essere datato l'inizio della LIA?

Per quanto riguarda la prima domanda, preso atto della distribuzione anche molto varia dei cambiamenti climatici prima del XX secolo, possiamo affermare che il raffreddamento della temperatura ha riguardato con particolare intensità la regione nord-atlantica, per esempio le isole britanniche, l'Europa centro-settentrionale, l'America del Nord; mentre l'emisfero australe è stato sì interessato da un aumento delle precipitazioni, ma senza conseguenze significative come in quello boreale.

Sulle possibili datazioni di inizio della LIA, le ipotesi spaziano dal XIV alla metà del XVII secolo, tenendo conto anche di intervalli più caldi interni alla stessa Piccola Età Glaciale. D'altronde, anche la data di fine della LIA non è determinabile con precisione: dagli ultimi anni del XIX secolo in poi si registra quasi ovunque un aumento globale delle temperature, ma vanno tenute in considerazione significative variazioni regionali che possono indicare un trend di riscaldamento di qualche anno precedente, o di qualche anno successivo.

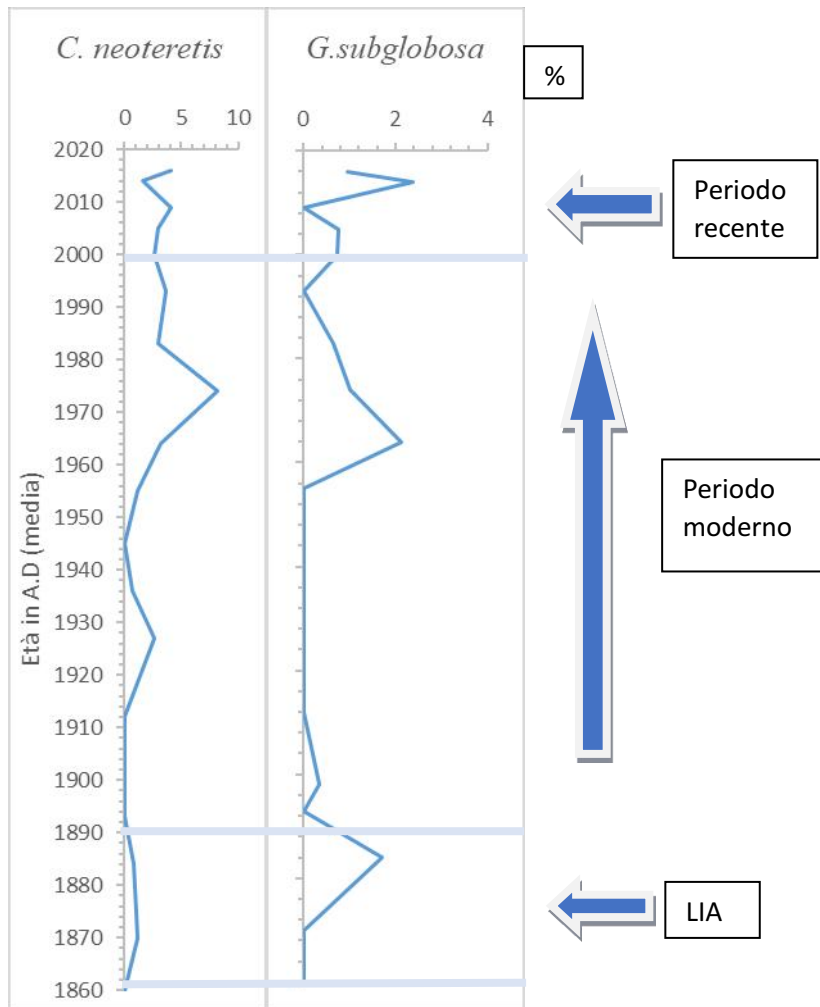
Anche le Svalbard vanno incluse nelle aree interessate dalla LIA: durante questo periodo, infatti, l'estensione dei ghiacciai raggiunse il massimo di tutto l'Olocene. L'abbassamento delle temperature causò sia un significativo avanzamento dei ghiacciai esistenti, sia la creazione *ex novo* di ghiacciai non presenti in precedenza (Martin-Moreno et al., 2016).

Successivamente alla LIA, ovvero dopo il 1890, si assiste ad un periodo di generale riscaldamento delle acque sovrastanti il canale di Kveithola, a causa, probabilmente, di un aumento delle temperature globali. In questo intervallo considerato "caldo", tuttavia, si registrano alcuni episodi di deterioramento freddo.

Secondo le ipotesi di Gamboa-Sojo et al. (2021) il periodo "caldo" che va dalla fine delle LIA (1890) all'apice della carota (2016) può essere definito come "periodo moderno". Il periodo moderno è caratterizzato da un riscaldamento

dei mari artici causato probabilmente dall'ingressione di acque atlantiche calde all'interno del canale di Kveithola. Proprio sulla base di questa considerazione che si registra, nella mia carota 21-5 (Figura 29- Figura 30), un aumento in abbondanza relativa di *C. neoteretis* con un picco nell'anno 1974 (8,16%). *C. neoteretis* è una specie tipica di acque atlantiche, la quale preferisce fitodetrito fresco. È relativa anche a salinità stabile, condizioni stagionali senza ghiaccio e condizioni calde di fondo. Il picco di *C. neoteretis* è contrapposto ad una diminuzione in abbondanza relativa di *G. subglobosa* (tipica di acque temperato-fredde), la quale da una abbondanza di 2,11% nell'anno 1964 scende ad un valore di 1,01% nell'anno 1974 che tenderà poi a zero nel 1993.

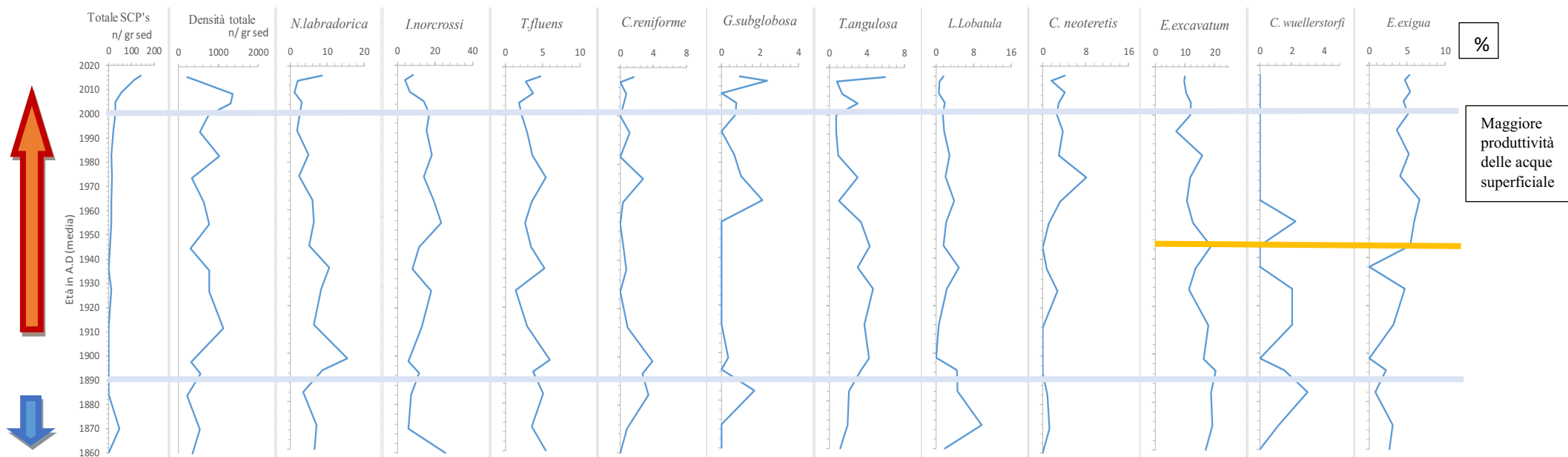




**Figura 29:** Grafico che registra un trend di aumento in % della *C. neoteretis* (specie indicatrice di acque atlantiche) e una diminuzione in % della *G. subglobosa* (specie indicatrice di acque artiche).

Dal 1955 (12,73%) fino al 1974 (11,90%) si registra (Figura 30) una diminuzione di *E. excavatum* e di *C. wuellerstorfi* che tende a zero dal 1964 fino al 2016. La presenza di *E. excavatum* indicherebbe un aumento della

fusione dei ghiacciai conseguente all'aumento delle temperature che sembrerebbe coincidere con la diminuzione di *C. wuellerstorfi* che è una specie tipicamente artica. Il graduale aumento delle temperature e l'ingresso definitivo di acqua atlantica dalla fine della LIA hanno portato alla fusione dei ghiacciai, con un conseguente aumento delle radiazioni incidenti che oltrepassano la colonna d'acqua raggiungendo profondità più elevate e permettendo una migliore crescita algale e quindi produttività primaria. Questa condizione ambientale favorirebbe il trasferimento di una maggiore quantità di materia organica al fondo e di migliore qualità energetica. L'aumento delle risorse trofiche per il comparto bentonico potrebbe essere dimostrato dalla presenza di specie come *E. exigua*. Quest'ultima specie (5,45%) mostra un trend in aumento a partire dal 1945 e la sua presenza è legata proprio alla maggiore produttività delle acque superficiali (Gooday, 1993; Thomas et al., 1995; Wollenburg e Mackensen, 1998).



**Figura 30:** Grafico generale che raggruppa il totale delle sferette (n/ gr sed), la densità totale dei foraminiferi bentonici (n/gr sed) e le specie utilizzate per le discussioni (%). Nel grafico viene rappresentato il trend di riscaldamento delle masse di acqua artiche successivo alla LIA. Tale condizione è registrata dal trend di diminuzione di *E. excavatum* a partire dal 1955 e di *C. wuellerstorfi* che scompare a partire dal 1964 fino al 2000 e dalla presenza costante di *E. exigua*

dal 1945 fino al 2000 (linea gialla/linea blu). La freccia blu indica la LIA ,quindi un periodo freddo. La freccia rossa indica il periodo moderno, quindi un periodo più caldo.

Questa situazione ambientale che caratterizza il “periodo moderno” viene registrata anche nella carota 21-5 analizzata da Gamboa-Sojo et al. Gli autori riportano che le specie dominanti sono *A. gallowayi* e *C. levigata*, contrapposte ad una diminuzione di *E. clavatum* (attualmente rinominato come *E. excavatum*) e di *C. reniforme* (specie indicatrice di acque artiche). Questi record indicano un definitivo ingresso dell’acqua atlantica, mostrato dall'aumento del flusso di specie affini all'acqua atlantica come *A. gallowayi*, *C. laevigata* e *C. neoteretis*. L'aumento dell'approvvigionamento alimentare è stato dimostrato dalla presenza di *I. norcrossi*, *I. helenae*, e *N. labradorica* soprattutto dal 1960 in poi, in coincidenza con l'aumento delle condizioni più calde. L'incremento del contenuto organico, registrato dalla bassa presenza di *G. subglobosa*, si verifica dal 1920 circa e prevale durante l'intero periodo.

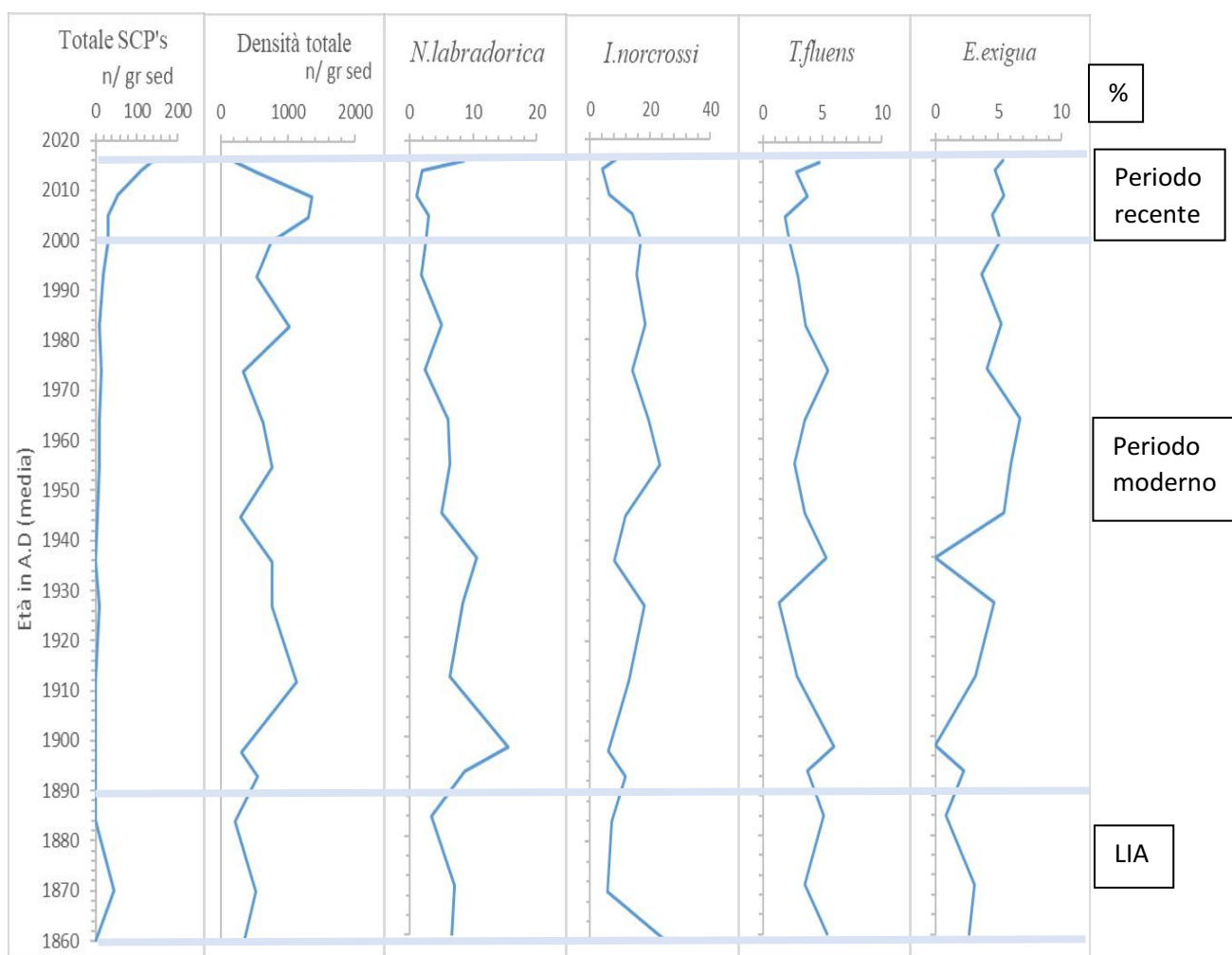
L'aumento delle condizioni di riscaldamento delle acque di fondo associate all'afflusso di acqua atlantica nel Mare di Barents e nelle aree limitrofe è ben documentato (Ingvaldsen et al., 2002; Bengtsson et al., 2004; Wilson, 2011; Dijkstra et al., 2015-2017). Secondo Groot et al., (2014) durante gli ultimi 1500 anni l'afflusso di acqua atlantica è aumentato; ciò ha creato condizioni ambientali instabili.

Infine, e questo è il dato che appare maggiormente rilevante, dal 2000 aumenta in modo significativo il numero delle particelle sferoidali carboniose. A questo

dato si associa una diminuzione della densità totale dei foraminiferi, che registra un picco minimo nell'anno 2016 di 216,33 ind/gr sed (Figura 31). Oltre all'aumento di temperatura e all'ingresso di acque atlantiche, aumenta probabilmente l'impatto antropico: negli ecosistemi marini, ciò implica una maggiore produttività primaria dovuta alla fusione dei ghiacciai. Come ampiamente documentato, negli ultimi 15 anni la regione artica ha subito un importante incremento della produttività primaria, soprattutto in primavera (Leu et al.; 2015), per via di un meccanismo a feedback nel quale sono coinvolti: fusione dei ghiacciai, maggior disponibilità di luce e nutrienti nella colonna di acqua superficiale e conseguentemente una maggiore produttività primaria.

La materia organica biodisponibile che entra nell'ambiente bentonico può essere rapidamente elaborata dai foraminiferi bentonici (Graf, 1992). Tanta materia organica che arriva al fondo implica un maggiore consumo di ossigeno da parte della comunità bentonica; in questo contesto, l'ambiente di vita potrebbe risultare stressato, come dimostrato dallo studio della fauna vivente di foraminiferi bentonici che colonizzano il Kveithola (Caridi et al., 2021; Sabbatini et al., 2023). Questo trova riscontro anche nei dati elaborati in questa tesi; in particolare, lungo la carota studiata negli ultimi 16 anni si registra (Figura 27- Figura 30- Figura 31) un aumento dell'abbondanza relativa di *N.*

*labradorica*, insieme all'aumento del numero di taxa opportunisti come *I. norcrossi*, *T. fluens* ed *E. exigua*, rispettivamente con valori di 1,98%, 8,49%, 4,72% e 5,35%. L'associazione a foraminiferi bentonici degli ultimi 16 anni descriverebbe quindi un ambiente eutrofico in cui l'aumento del flusso di materia organica al fondo, anche stagionale, potrebbe creare episodici eventi di anossia al fondo dove proliferano specie opportuniste adattate allo stress ambientale.



**Figura 31:** Grafico che mette in relazione l'aumento delle SCP's (n/ gr sed) con la diminuzione della densità totale dei foraminiferi (n/ gr sed) e l'aumento in abbondanza relativa (%) di alcune specie opportuniste negli ultimi 16 anni.

La presenza delle sferette indica un chiaro segnale antropogenico. Le cause sono molteplici e risulta impresa fuori dalla modesta portata di questa tesi dare conto esaustivamente di tutti i fattori che possono aver contribuito, a partire dal 2000, a un aumento della combustione di combustibili fossili ad elevate temperature ( $> 1000^{\circ}\text{C}$ ) nell'areale di riferimento.

Tuttavia, possiamo affermare con un accettabile grado di probabilità che il principale responsabile di questa tendenza pare essere rappresentato dal traffico navale. Nel capitolo 1.2.4, una rapida ricognizione delle vicende del crescente impatto antropico nell'arcipelago a partire dal XX secolo ha permesso di individuare alcuni elementi potenzialmente inquinanti quali l'insediamento umano in forma stanziale (con trend variabili di crescita e decrescita della popolazione), l'estrazione mineraria (anche qui, con fasi di maggiore e minore produzione), le attività di pesca. Essi rappresentano, al di là delle variazioni, una costante che precede di circa 100 anni il 2000, proseguendo fino alla data di prelievo della carota.



Quali fenomeni legati alla navigazione a motore potrebbero essere entrati in gioco a livello locale tali da determinare la presenza significativa di SCP's a partire dall'inizio del XXI secolo?

Due sembrano essere i principali indiziati.

In primo luogo, dal 2000 notiamo una ripresa dei viaggi verso le Svalbard, specialmente legati al turismo, dopo lunghi decenni nei quali i mari dell'arcipelago paiono scarsamente solcati (forse per mancanza di una adeguata capacità di rilevamento).

Nell'interessante grafico rintracciabile in Kruse (2016), vengono censite tutte le imbarcazioni di medio-grandi dimensioni che hanno trasportato persone alle Svalbard (Figura 32). Dati ricavati dalle varie fonti reperibili, in particolare dai resoconti di carattere storico per le epoche più remote (1600-2000) e dall'annuario statistico del Governatore delle Svalbard per gli anni più recenti (dal 1996 in poi).

Si evidenziano tre grandi ondate di afflusso via mare per l'arcipelago: la prima, compresa tra la metà del XVII e la fine del XVIII secolo, è caratterizzata dalla prevalenza delle baleniere olandesi, tedesche e britanniche. La seconda, che va dalla metà del XIX secolo fino allo scoppio della Prima Guerra Mondiale, vede invece protagoniste le navi da pesca norvegesi. La terza, infine, è quella più

interessante ai fini della presente ricerca: sia in quanto compresa all'interno dell'intervallo temporale della carota, sia in quanto “viaggia” su imbarcazioni a motore, che producono SCPs. Questa terza ondata ha luogo proprio dopo il 2000: una coincidenza che sembra suggerire una correlazione con l'aumento esponenziale delle particelle sferoidali carboniose nel sedimento.

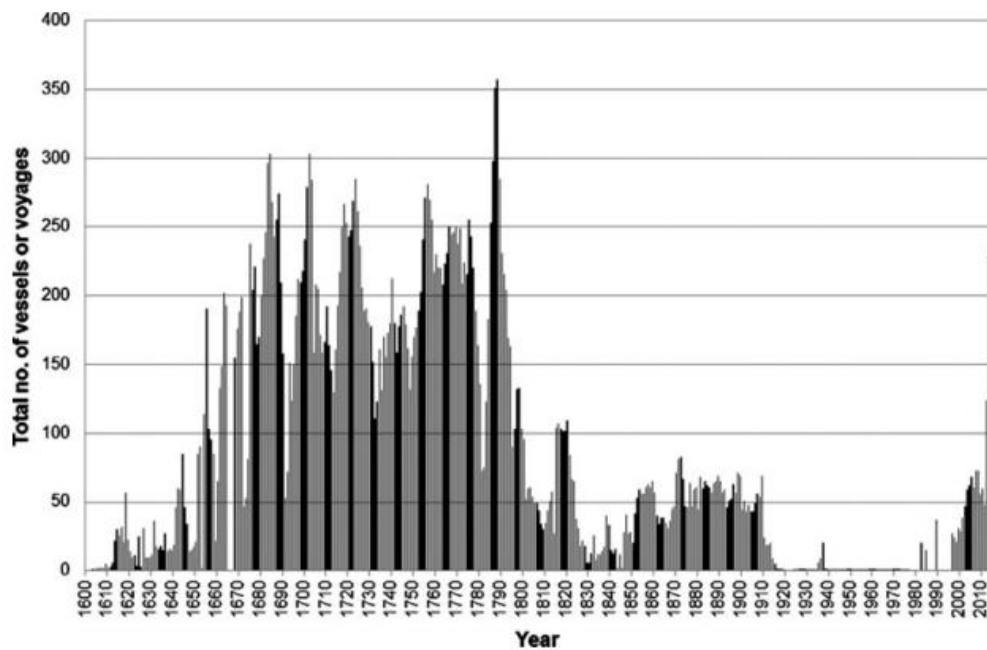


Fig. 2. A column chart of the total number of vessels or voyages to Svalbard per year between 1603 and 2014 as an indication of human presence in the archipelago over time. (From 36 published sources.)

**Figura 32:** Numero di imbarcazioni di medio-grandi dimensioni che hanno trasportato persone alle Svalbard dal 1600 fino al 2016. (Kruse, 2016)

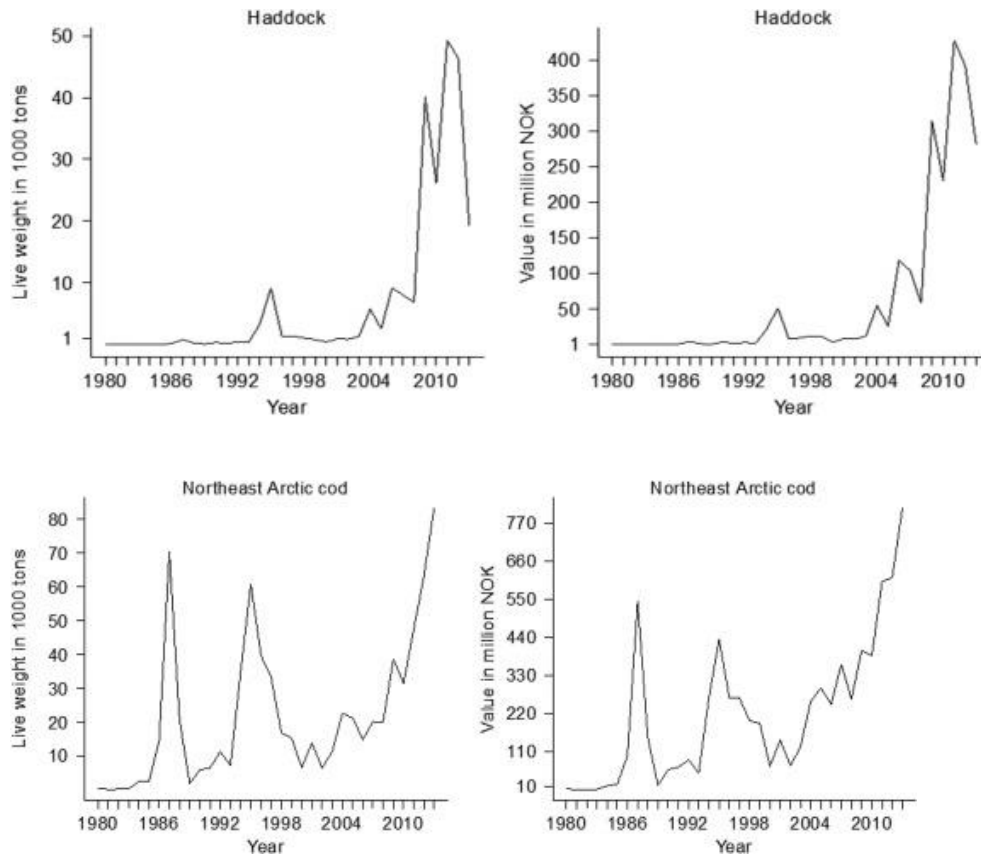
L'altro fattore che pare svolgere un ruolo determinante è la pesca. Qui il dato va letto nella sua complessità, senza fermarsi a considerare solo le quantità

totali di pescato, ma analizzando le variazioni di specie interessate e la localizzazione delle catture (<https://www.fiskeridir.no/>).

Non è questa la sede per ripercorrere la lunga e articolata storia della pesca nelle Svalbard: nel corso del tempo oggetto dell'interesse commerciale sono state di volta in volta il capelin (anni '70-'80), la capasanta (1985-1995), l'halibut (1990-1993), il gamberetto boreale (in forte declino dopo il 2005), contestualmente e parallelamente alle variazioni dell'andamento dei valori commerciali delle varie tipologie di pescato (Misund et al., 2016).

Alcune di queste specie risultano abbondanti e sono dunque catturate nel mare prospiciente Spitsbergen. La pesca a strascico del gamberetto boreale, per esempio, avviene principalmente ad Hopen, Bellsund, Storfjorden, ma anche e soprattutto Isfjorden: sono celebri le luci delle imbarcazioni da pesca del gamberetto visibili a occhio nudo nelle notti invernali dalla capitale Longyearbyen.

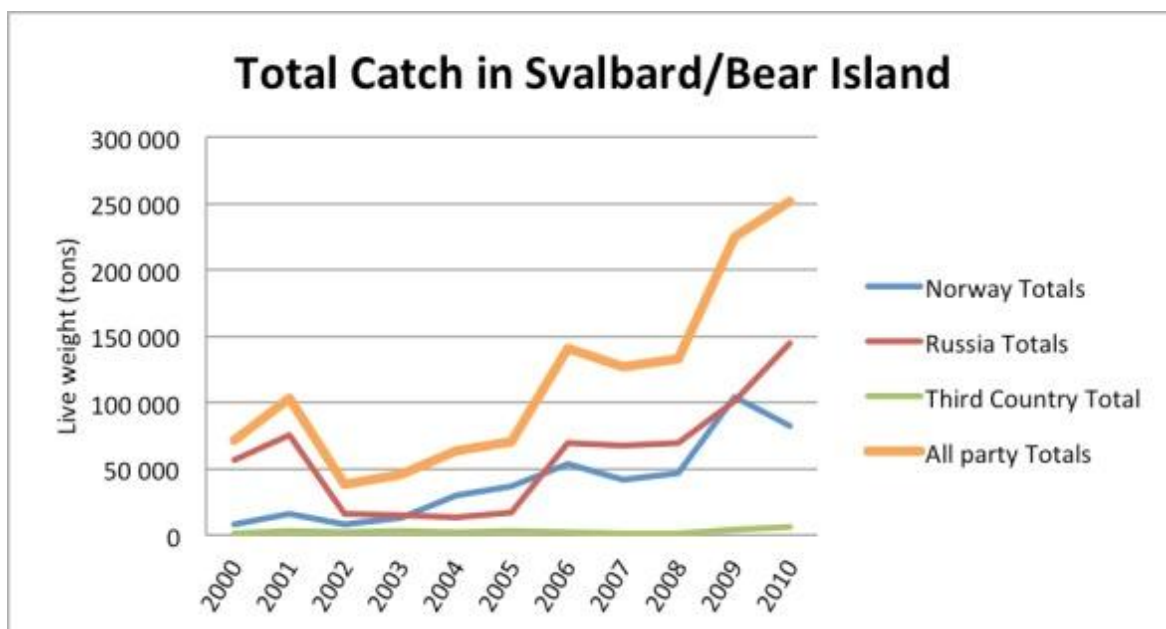
Non così per le specie demersali, come il merluzzo artico, il merluzzo nero, l'eglefino, catturate principalmente da grandi navi-fattoria di 60-70 metri che operano attorno a Bjørnøya. Come mostrato nei grafici, è proprio il tonnello di pescato di queste specie ad aumentare in modo significativo dopo il 2000 (Figura 33).



**Figura 33:** Quantità totale in tonnellate di eglefino (*Haddock*) e merluzzo artico (*Northeast Arctic cod*) nelle Svalbard tra il 1980 e il 2016. (Misund et al, 2016)

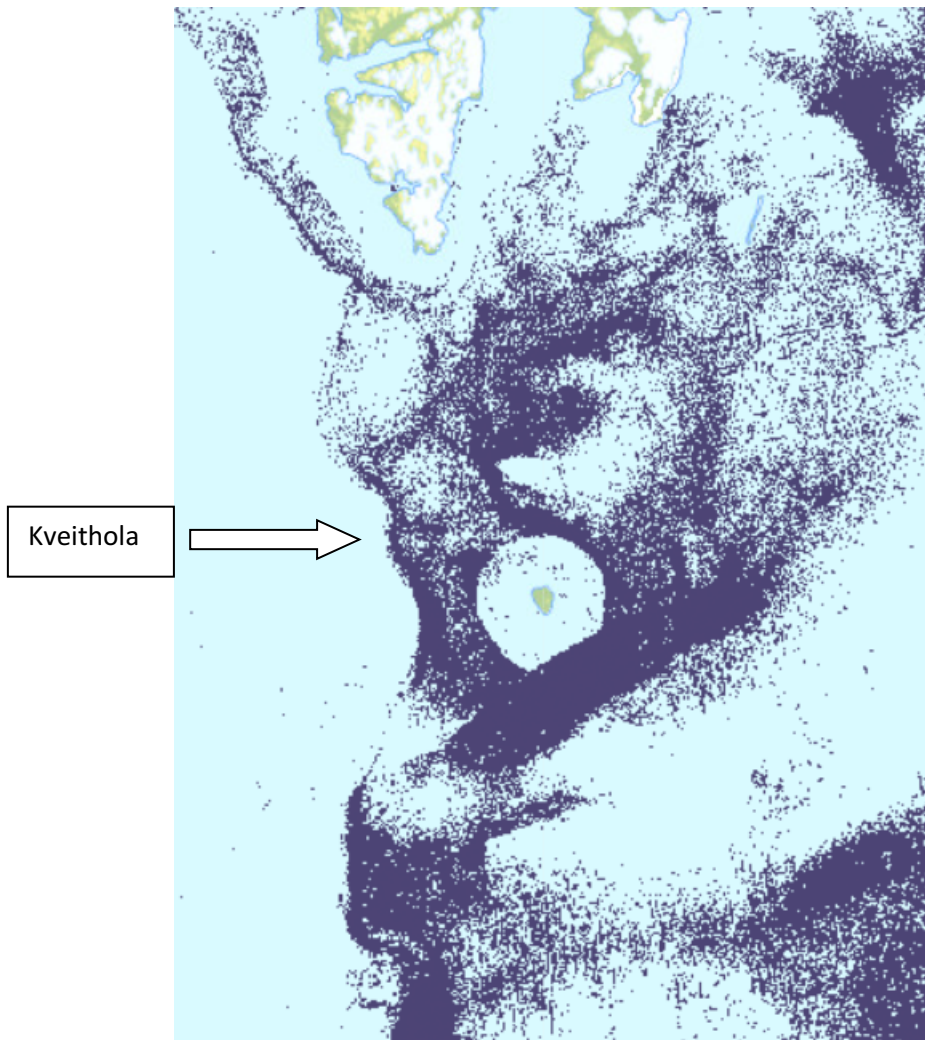
Ciò ha portato a un consistente aumento dell'attività di pesca nelle acque attorno a Bjørnøya. Una testimonianza importante ci deriva dal quantitativo totale di catture effettuate nei mari attorno all'isola, che giunge a superare le 250.000 tonnellate nel 2010 (Figura 34). Senza dimenticare, peraltro, la pesca

illegale, già ampiamente documentata nelle acque attorno all'isola, anche se difficilmente quantificabile. (<https://snl.no/Bj%C3%B8rn%C3%B8ya>)



**Figura 34:** Quantità totale in tonnellate di pescato tra il 2000 e il 2010 (isola di Bjørnøya). <https://polarconnection.org/svalbard-fisheries-protection-zone/>

Soprattutto, si evidenzia un'intensa attività di pesca da parte di imbarcazioni di stazza superiore ai 15 metri proprio nella zona del Canale di Kveithola (Figura 35).



**Figura 35:** In blu la densità di imbarcazioni da pesca di dimensioni superiori ai 15 metri. <https://www.fiskeridir.no/>

È facile dedurre da questi intensi traffici marittimi derivanti dalle attività turistiche e di pesca un inquinamento da combustione di combustibili fossili che ha generato le SCP's nel sedimento.

In ultimo, vanno considerati i dati relativi alle temperature.

Per il secolo XX abbiamo anche a disposizione le rilevazioni effettuate dalle 5 stazioni meteorologiche attualmente presenti sulle Svalbard: Svalbard Airport, Ny-Ålesund, Hopen, Jan Mayen e Bjørnøya.

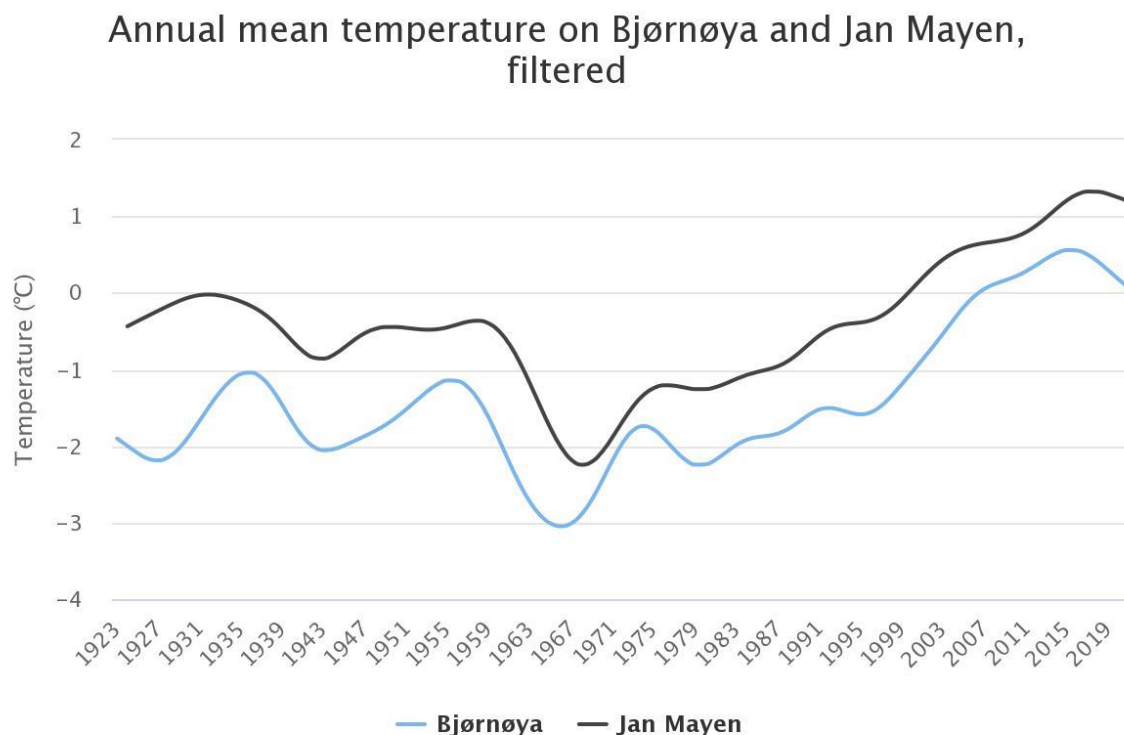
Le più antiche risalgono al 1911 e provengono dalla stazione situata nell'area di Hotellneset dove dal 1975 sorge l'aeroporto dell'arcipelago. Le più interessanti per lo scopo della presente ricerca, tuttavia, sono quelle fornite dalla stazione radio-meteorologica dell'isola di Bjørnøya, la più vicina al canale di Kveithola. I lavori per la sua costruzione iniziarono nel 1918 nella parte settentrionale della costa; la serie annuale inizia dal 1923.

La storia del clima delle Svalbard presenta tendenze abbastanza univoche ricavabili senza grandi differenze da tutte e 5 le stazioni. I primi anni del XX secolo sono caratterizzati da temperature piuttosto basse, con un'inversione di tendenza a partire dagli anni '20. Notiamo un importante picco di calore tra gli anni '30 e gli anni '50, e un aumento costante delle temperature a partire dagli anni '70.

Durante gli anni '60, invece, si assiste a Bjørnøya e su tutto l'arcipelago a un periodo freddo. Gli anni '66-'67, in particolare, registrano temperature annuali eccezionalmente basse, raggiungendo i  $-3^{\circ}$  a Bjørnøya e in  $-10^{\circ}$  a Svalbard Airport.

Dall'inizio delle rilevazioni (1911), le Svalbard registrano in media un aumento di temperatura di 0,33° per decennio: un riscaldamento molto più veloce di quello rilevato nella Norvegia continentale e tre volte più rapido dell'aumento medio della temperatura globale.

Particolarmente significativo il fatto che i 3 anni più caldi in tutte e 5 le stazioni sono stati registrati dopo l'anno 2000 (Figura 36). Con tutta probabilità, in questa fase più recente entra in gioco l'accelerazione al riscaldamento globale e locale prodotta dalla emissione di gas serra e dagli altri fattori antropogenici.

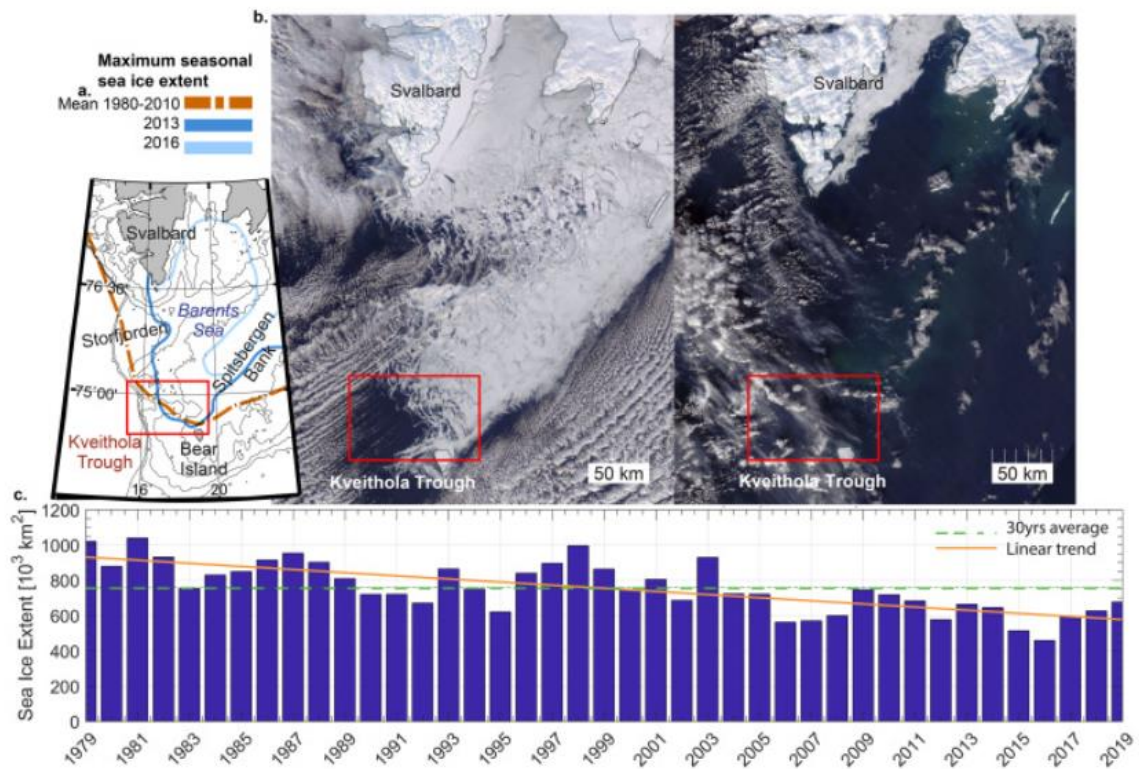




**Figura 36:** La figura mostra la temperatura media annuale nelle stazioni artiche norvegesi alle Svalbard.

<https://mosj.no/en/indikator/climate/atmosphere/air-temperature-and-precipitation/>

Il costante aumento delle temperature causa anche la fusione dei ghiacci marini, osservato anche nell'area di studio per l'anno 2016 (Gamboa-Sojo, 2021) (Figura 37). Negli ultimi anni, questa zona del Mar di Barents è stata spesso caratterizzata dall'assenza di ghiaccio durante il periodo invernale (Peng et al., 2018). Bisogna risalire all'inverno 2013 per trovare ghiaccio marino in tutto il bacino nord-occidentale vicino al canale di Kveithola (Gamboa-Sojo, 2021).



**Figura 37:** Mappa del Mare di Barents che mostra l'estensione media stagionale massima del ghiaccio marino nel periodo 1980-2010 (linea tratteggiata arancione), nel 2013 (linea blu scuro) e nel 2016 (linea azzurra).

<https://nsidc.org/arcticseaicenews>

## 5. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha permesso di:

- evidenziare un netto incremento delle SCP's nel sedimento dopo gli anni 2000
- delineare tre intervalli temporali caratterizzati da diverse associazioni di foraminiferi bentonici nella zona del canale di Kveithola:
  - 1) dal 1860 fino al 1890 circa, con condizioni di freddo predominante corrispondente alla fase terminale della Piccola Età Glaciale (LIA).
  - 2) un periodo definito moderno dal 1890 fino al 2000, caratterizzato da un generale trend di riscaldamento. In questo intervallo temporale si registra un aumento delle temperature delle masse di acqua artiche, causato dall'ingresso di acqua calda e salata dall'Oceano Atlantico che determina la diminuzione dell'estensione dei ghiacciai nel Mare di Barents e quindi la loro fusione parziale; l'ambiente risponde con un aumento dei nutrienti disponibili in colonna d'acqua e quindi una maggiore produttività che si riflette in un maggiore afflusso di materia organica per il sistema bentonico.

3) un intervallo recente che caratterizza gli ultimi 16 anni del secolo.

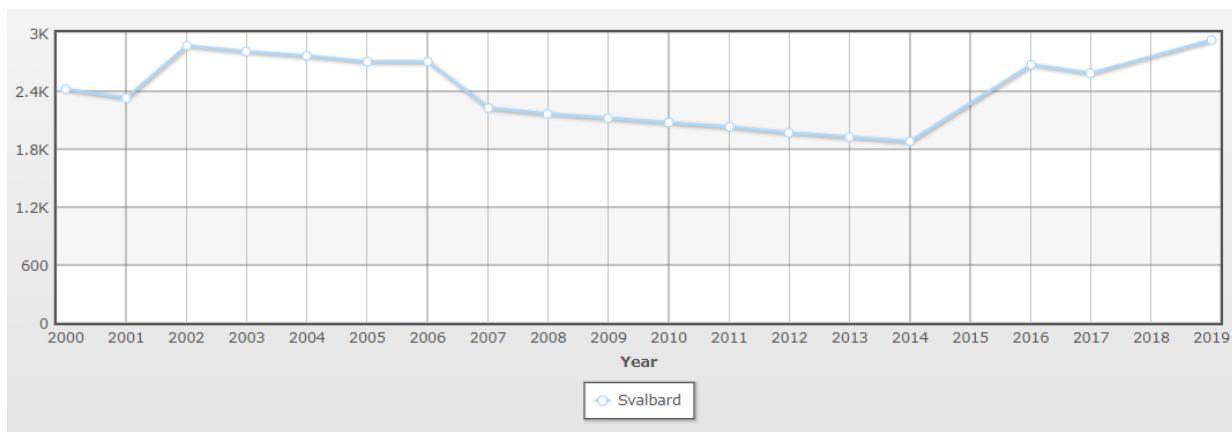
Dal 2000 al 2016 l'associazione a foraminiferi bentonici registra l'instaurarsi delle condizioni ambientali attuali caratterizzate da eutrofia con episodici eventi di anossia al fondo che giustificano la presenza di specie opportuniste e tolleranti lo stress. In questo stesso intervallo, le condizioni ambientali stressanti per il sistema marino vengono dimostrate dall'abbondanza delle SCP's come evidenza diretta di impatto antropico.

Come detto precedentemente, le SCP's rappresentano un marker stratigrafico univoco dell'Antropocene. Secondo la tesi di Steffen, 2016 questa nuova epoca, distinta dall'Olocene, avrebbe inizio nel 1950 con la "*Great acceleration*". In realtà, in Artico, come delineato dallo studio sull'abbondanza assoluta delle SCP's, esse risultano essere presenti con una densità costante dal 2000. Ciò testimonierebbe come il canale di Kveithola sia rimasto maggiormente isolato dall'impatto dell'uomo almeno fino agli anni 2000, o almeno in misura molto minore rispetto agli ambienti marini delle medie latitudini dove si hanno dati relativi alle SCP's e probabilmente rispetto alla stessa Spitsbergen, dove invece insediamenti umani, attività di pesca e di estrazione mineraria sono ben presenti già nel XX secolo.

L'analisi e le valutazioni effettuate nel presente lavoro di tesi riguardanti le particelle sferoidali carboniose in sedimenti marini nel canale di Keivthola rappresentano un *unicum* nel panorama scientifico: nessuna indagine simile è stata precedentemente svolta in Artico e, al momento, non disponiamo di nuovi dati nel periodo che va dal giugno 2016 ad oggi (febbraio 2023).

In attesa di ulteriori studi che potranno nel futuro seguire l'evoluzione dell'abbondanza delle SPC's, è possibile ipotizzare una prosecuzione della tendenza di aumento delle particelle stesse.

Infatti, nonostante negli anni successivi al 2016 si sia registrato un abbassamento delle temperature presso le Svalbard (e l'isola di Bjørnøya) e un leggero aumento della superficie di ghiaccio marino, la pressione antropica appare in costante aumento. La popolazione delle Svalbard è in costante aumento, passando dai 2667 abitanti del 2016 ai 2926 del 2019. (Figura 38)



**Figura 38:** Censimenti della popolazione alle Svalbard dal 2000 al 2019.

<https://www.indexmundi.com/g/g.aspx?c=sv&v=21>

Soprattutto, non accenna a diminuire, ma al contrario aumenta costantemente quella che è stata definita la “febbre dell’Artico” (Likhacheva, 2022): le presenze turistiche hanno proseguito dopo il 2016 con una tendenza sempre in aumento, eccezion fatta per la parentesi COVID. Inoltre, la navigazione artica segna ogni anno una crescita anche significativa: se nel 2016 erano state 9 milioni le miglia navigate dalle imbarcazioni nella zona artica, gli ultimi dati disponibili (2019) ci indicano un aumento fino a 10,7 milioni di miglia (Arctic Shipping Status Report, 2020).

Dunque, nonostante l’anno 2016 possa essere considerato l’*annus horribilis* non solo del riscaldamento globale, ma anche dell’inquinamento antropico nel

sedimento preso in analisi, non ci sono elementi per ipotizzare una inversione di tendenza.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- Aagaard K. (1989). A synthesis of the Arctic Ocean circulation. *Rapports et procès-verbaux des réunions du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, vol. 188, pp. 11-22, doi: 10.17895/ices.pub.19279133
- Arlov T.B. (2005), The Discovery and Early Exploitation of Svalbard. Some Historiographical Notes. *Acta Borealia. A Nordic Journal of Circumpolar Societies*, vol. 25, n. 1, pp. 3-19, doi: 10.1080/08003830510020343.
- Aveta A. (2018). I Foraminiferi bentonici delle zone umide del Madagascar occidentale e del Vietnam. Tesi di laurea magistrale discussa presso l'Università Politecnica delle Marche
- Bakken J.M. (2021). Early and Mid-Holocene environments in Isfjorden, Svalbard – what does the foraminifera and molluscs tell?. Tesi di laurea magistrale discussa presso la Norwegian University of Science and Technology



- Barnosky A. (2014). Palaeontological evidence for defining the Anthropocene, Geological Society London Special Publications, vol. 395, n. 1, pp. 149-165, doi:10.1144/SP395.6
- The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism
- Bengtsson L., Semenov V.A, Johannessen O. (2004). The Early Twentieth-Century Warming in the Arctic—A Possible Mechanism Journal of Climate, vol. 17, pp. 20, doi:/10.1175/1520-0442(2004)017%3C4045:TETWIT%3E2.0.CO;2
- Bjarnadóttir L.R., Rüther D.C., Winsborrow M., Andreassen K. (2013). Grounding-Line Dynamics during the Last Deglaciation of Kveithola, W Barents Sea, as Revealed by Seabed Geomorphology and Shallow Seismic Stratigraphy: Grounding Line Dynamics, W Barents Sea. Boreas, 2013, vol. 42, pp. 84–107, doi:10.1111/j.1502-3885.2012.00273.x
- Broman D., Näf C., Wik M., Renberg I. (1990). The importance of spheroidal carbonaceous particles (SCPs) for the distribution of particulate polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an estuarine-

- like urban coastal water area. *Chemosphere*, vol. 21, n. 1-2, pp. 69-77,  
doi:10.1016/0045-6535(90)90379-8
- Caridi F., Sabbatini A, Bensi M., Kovacevic V., Lucchi R.G., Morigi C., Povea P., Negri A. (2021). Benthic foraminiferal assemblages and environmental drivers along the Kveithola Trough (NW Barents Sea). *Journal of Marine Systems*, vol. 224, pp. 1-20, doi:10.1016/j.jmarsys.2021.103616. (2021)
  - Cavalier-Smith T. (1998). A revised six-kingdom system of life. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 73, n. 3, pp. 203-266.
  - Clark, A. (2002). An Exceptionally Brief Note on Spherical Carbonaceous Particles (Fly ash, Inorganic ash spheres). Compiled by Allan Clark. 1, 4–5
  - Conway W.M. (1897). *The first crossing of Spitsbergen*, London: J.M. Dent and Company
  - Corliss J.O. (1994). An interim utilitarian (user-friendly) hierarchical classification and characterization of the protists. *Acta protozoologica*, vol. 33, n. 1, pp. 1-51.

- Crutzen P.J., Stoermer E.F. (2000). The “Anthropocene”. Global Change Newsletter - The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP): A Study of Global Change of the International Council for Science (ICSU), n. 41, pp. 17-18
- Crutzen P.J. (2002a). Geology of mankind. Nature, vol. 415, n. 6867, p. 23 doi:10.1038/415023a
- Crutzen P.J. (2002b) The “anthropocene”. Journal de Physique IV, vol. 12, n. 10, pp. 1-5, doi:10.1051/jp4:20020447
- De Blasio F.V. (2013). Cambiamenti climatici. In: Aria, acqua, terra e fuoco; Springer Italia: Milano, IT, 2013; pp. 197-212, doi:10.1007/978-88-470-2544-8\_8
- De Veer G. (1598). Waerachtige beschryvinghe van drie seylagien, Amsterdam: Cornelis Claesz.
- Djaliti L., Guideri M., Ivaldi R., Papa L. (2015). Dinamiche della copertura glaciale artica e rotte di navigazione, studio sulla regione Artica, Genova: Istituto Idrografico della Marina.
- Diamond J. (1997). Guns, Germs and Steel: The Fates of Human Societies, New York: W. W. Norton & Company.

- Dijkstra, N., Junttila, J., Husum K., Carroll J., Hald M. (2015). Natural variability of benthic foraminiferal assemblages and metal concentrations during the last 150 years in the Ingøydjupet trough, SW Barents Sea. *Marine Micropaleontology*, vol. 121, pp. 16-31, doi:10.1016/j.marmicro.2015.09.005w York: W. W. Norton & Company.
- Dijkstra, N., Junttila, J., Aagaard-Sørensen, S. (2017). Environmental baselines and reconstruction of Atlantic Water inflow in Bjørnøyrenna, SW Barents Sea, since 1800 CE. *Marine environmental research*, vol. 132, pp. 117-131.
- Dirzo R., Young H.S., Galetti M., Ceballos G., Isaac N.J.B., Collen B. (2014), Defaunation in the Anthropocene. *Science*, vol. 345, n. 6195, pp. 401-405, doi:10.1126/science.1251817
- d'Orbigny A. (1826). Tableau méthodique de la classe des Céphalopodes. *Annals des Sciences Naturelles*, vol. 7, pp. 245-314
- Dowdswell J., Fugelli E. (2012), The seismic architecture and geometry of grounding-zone wedges formed at the marine margins of past ice sheets. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 124, n. 11-12, pp. 1750-1761, doi:10.1130/B30628.1

- Dujardin F. (1835). Sur les prétendues Céphalopodes microscopique. *Annals des Sciences Naturelles*, vol. 3, pp. 312-314
- Ehrlich P., Holdren J.P. (1971). Impact of Population Growth. *Science*, vol. 171, n. 3977, pp. 1212-1217.
- Finger M. (2016). The Arctic, Laboratory of the Anthropocene. In: (eds) *Future Security of the Global Arctic: State Policy, Economic Security and Climate*; Heininen, L., Ed.; Palgrave Pivot: London, UK, 2016, pp. 121-137, doi:10.1057/9781137468253\_7
- Flato G.M., Brown R.D. (1996). Variability and climate sensitivity of landfast Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, n. C10, pp. 25767-25777, doi:10.1029/96JC02431
- Fohrmann H., Backhaus J.O., Blaume F., Rumohr J. (1998). Sediments in Bottom-Arrested Gravity Plumes: Numerical Case Studies. *Journal of Physic Oceanography*, vol. 28, pp. 2250-2274.
- Gajewski K. (1993). The role of paleoecology in the study of global climatic change. *Review of Palaeobotany and Palynology*, vol. 79, pp. 141-151, doi:10.1016/0034-6667(93)90044-U
- Gamboa-Sojo V.M., Husum K., Caridi F., Lucchi R.G., Bensi M., Kovačević V., Sabbatini A., Langone L., Tadeusz Dominiczak A.,

- Povea P., Morigi C. (2021). Living and dead foraminiferal assemblages of the last decades from Kveithola Trough: Taphonomic processes and ecological highlights. *Marine Micropaleontology*, vol. 166, doi: 10.1016/j.marmicro.2021.102014
- Gao Y., Sun J., Li F., He S., Sandven S., Qing Y., Zhongshi Z., Lohmann K., Keenlyside N., Furevik T., Lingling S. (2015). Arctic sea ice and Eurasian climate: A review. *Advances in Atmospheric Sciences*, vol. 32, pp. 92-114 doi:10.1007/s00376-014-0009-6.
  - Gooday A.J. (1993). Deep-Sea Benthic Foraminiferal Species Which Exploit Phytodetritus: Characteristic Features and Controls on Distribution. *Marine Micropaleontology*, vol. 22, pp. 187-205. doi:10.1016/0377-8398(93)90043-W
  - Graf G. (1992). Benthic-pelagic coupling: a benthic view. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, vol. 30, pp. 149-190
  - Groot, D. E., Aagaard-Sørensen, S., Husum, K. (2014). Reconstruction of Atlantic water variability during the Holocene in the western Barents Sea. *Climate of the Past*, vol. 10, n. 1, pp. 51-62, doi: 10.5194/cp-10-51-2014

- Hacquebord L. (2002). Three centuries of whaling and walrus hunting in Svalbard and its impact on the Arctic Ecosystem. *Environment and History*, vol. 7, n. 2, pp. 169-185, doi:10.3197/096734001129342441
- Hammer Ø., Harper D., Ryan P. (2001). PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, *Palaeontologia Electronica*, vol. 4, n. 1, pp. 9-18
- Holland C. (1994). *Arctic exploration and development, c. 500 to 1915: an encyclopedia*, New York: Garland.
- Ingvaldsen R., Loeng H., Asplin L. (2002) Variability in the Atlantic inflow to the Barents Sea based on a one-year time series from moored current meters. *Continental Shelf Research* vol. 22, pp. 505–519, doi: 10.1016/S0278-4343(01)00070-X
- Ivar do Sul J., Labrenz M. (2021). Microplastics into the Anthropocene. In: *Handbook of Microplastics in the Environment*; Rocha-Santos, T., Costa, M., Mouneyrac, C., Eds.; Springer International: Cham, CH, 2021; pp. 1363-1378, doi:10.1007/978-3-030-10618-8\_25-2
- Klungsøyr J., Sætre R., Føyn L., Loeng, H. (1995). Man's Impact on the Barents Sea. *Arctic*, vol. 48, n. 3, pp. 279-96.

- Kolbert E. (2014). *The sixth extinction: an unnatural history*, New York: W. W. Norton & Company.
- Kruse F. (2016). Is Svalbard a pristine ecosystem? Reconstructing 420 years of human presence in an Arctic archipelago. *Polar record*, vol. 52, n. 266, pp. 518-534. doi:10.1017/S0032247416000309
- Laepple T., Werner M., Lohmann G. (2011). Synchronicity of Antarctic temperatures and local solar insolation on orbital timescales. *Nature*, vol. 471, n. 7336, pp. 91-94, doi:10.1038/nature09825
- Lantsch H., Hanebuth T., Horry J., Grave M., Rebesco M., Schwenk (2017). Deglacial to Holocene history of ice-sheet retreat and bottom current strength on the western Barents Sea shelf. *Quaternary Science Reviews*, vol. 173, pp. 40-57, doi:10.1016/j.quascirev.2017.08.016
- Larsen J. (2003). Size Distributions and Concentrations of Spheroidal Carbonaceous Fly-Ash Particles (SCPs) in Lake Sediments as an Aid to Detecting Locally Deposited Atmospheric Pollution. *Water, Air, and Soil Pollution*, vol. 149, pp. 163-175
- Leu E., Mundy C.J., Assmy P., Campbell K., Gabrielsen T.M., Gosselin M., Juul-Pedersen T., Gradinger R. (2015). Arctic Spring Awakening-Steering Principles behind the Phenology of Vernal Ice Algal Blooms.



- Progress in Oceanography, vol. 139, pp. 151–170,  
doi:10.1016/j.pocean.2015.07.012
- Lewis S., Maslin M. (2015). Defining the Anthropocene. *Nature*, vol. 519, pp. 171-180, doi:10.1038/nature14258
  - Likhacheva A. (2022). *Arctic Fever Political, Economic and Environmental Aspects*, London: Palgrave MacMillan
  - Loeng H. (1991). Features of the physical oceanographic conditions of the Barents Sea. *Polar Research*, vol. 10, n. 1, doi: 10.3402/polar.v10i1.6723
  - Loeng H., Ozhigin V., Ådlandsvik B. (1997). Water fluxes through the Barents Sea, *ICES Journal of Marine Science*, vol. 54, n. 3, pp. 310-317, doi:10.1006/jmsc.1996.0165
  - Lucchi R.G., Bazzaro M., Biebow N., Carbonara K., Caridi F., Deponte D., Dominiczak A., Gamboa-Sojo V.M., Graziani S., Kovacevic V., Krüger M., Mazzini A., Morigi C., Musco M.E., Povea P., Relitti F., Ruggiero L., Rui A., Sánchez Guillamón O., Laterza R. (2016), Eurofleets-2 Cruise Summary Report Bottom Currents in a Stagnat Environment (BURSTER project), doi:10.13140/RG.2.2.24223.36004

- Majewski W., Szczuciński W., Zajączkowski M. (2009). Interactions of Arctic and Atlantic water-masses and associated environmental changes during the last millennium, Hornsund (SW Svalbard). *Boreas*, vol. 38, n. 3, pp. 529-544 doi:10.1111/j.1502-3885.2009.00091
- Mallinger K., Mergili M. (2020). The global iron industry and the Anthropocene. *The Anthropocene Review*, vol. 9, n. 1, pp. 52-70, doi: 10.1177/2053019620982332
- Mann C. (2011). *1493: Uncovering the New World Columbus Created*, New York: Knopf Doubleday Publishing Group
- Martín-Moreno R., Allende Álvarez F., & Hagen J O. (2017). ‘Little Ice Age’ glacier extent and subsequent retreat in Svalbard archipelago. *The Holocene*, vol. 27, n. 9, pp. 1379-1390, doi:10.1177/0959683617693904
- Maslowski W., Marble D., Walczowski W., Schauer U., Clement J.-L., Semtner A.J. (2004). On climatological mass, heat, and salt transports through the Barents Sea and Fram Strait from a pan-Arctic coupled ice-ocean model simulation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, n. C3, pp. 1-16, doi: 10.1029/2001JC001039
- Misund O.A, Heggland K., Skogseth R., Falck E., Gjørseter H., Sundet J., Watne J., Jørgen Lønne O. (2016). Norwegian fisheries in the

- Svalbard zone since 1980. Regulations, profitability and warming waters affect landings. *Polar science*, vol. 10, n. 3, pp. 312,322. doi:10.1016/j.polar.2016.02.001
- Moore III B. (2000). Sustaining Earth's life support systems - the challenge for the next decade and beyond. *Global Change Newsletter - The International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP): A Study of Global Change of the International Council for Science (ICSU)*, n. 41, pp. 1-2.
  - Murray J. (2006). *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge -New York - Melbourne: Cambridge University Press.
  - Myrbo A. (2007), [https://slidelegend.com/smear-slides-limnological-research-center\\_59cf0f851723dda14c6aa7eb.html](https://slidelegend.com/smear-slides-limnological-research-center_59cf0f851723dda14c6aa7eb.html)
  - Oldfield F. (2015). Can the magnetic signatures from inorganic fly ash be used to mark the onset of the Anthropocene?. *The Anthropocene Review*, vol. 2, n. 1, pp. 3-13, doi:10.1177/2053019614534402
  - Orombelli G. (2005). Cambiamenti climatici. *Supplements of Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, vol. 7, pp. 15-24.

- Orvik K.A., Niiler P. (2002). Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic. *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n. 19, pp. 1-4, doi:10.1029/2002GL015002
- Padoa-Schioppa E. (2021). *Antropocene, una nuova sfida per la Terra, una sfida per l'umanità*, Bologna: Il Mulino
- Paoletti I. (2020). GREAT ACCELERATION dell'impatto antropico nei sedimenti marini. Risultati dello studio di associazioni a foraminiferi nella carota S42 (mare Adriatico). Tesi di laurea magistrale discussa presso l'Università Politecnica delle Marche
- Peng G., Steele M., Bliss A. C., Meier W. N., Dickinson S. (2018) Temporal Means and Variability of Arctic Sea Ice Melt and Freeze Season Climate Indicators Using a Satellite Climate Data Record. *Remote sensing*, vol. 10, pp, 9, doi:/10.3390/rs10091328
- Rantanen M., Karpechko A.Y., Lipponen A., Nordling K., Hyvärinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. *Communications Earth and Environment*, vol. 3, pp. 1-28, doi:10.1038/s43247-022-00498-3

- Raut J.-C., Raut, Law K., Onishi T., Daskalakis N., Marelle L. (2022). Impact of shipping emissions on air pollution and pollutant deposition over the Barents Sea. *Environmental Pollution*, vol. 298, pp. 1-9, doi: 10.1016/j.envpol.2022.118832.
- Rebesco M., Liu Y., Camerlenghi A., Winsborrow M., Laberg J.S., Caburlotto A., Diviacco P., Accettella D., Sauli C., Wardell N., Tomini I. (2011). Deglaciation of the western margin of the Barents Sea Ice Sheet - A swath bathymetric and sub-bottom seismic study from the Kveithola Trough. *Marine Geology*, vol. 279, n.1-4, pp. 141-147, 10.1016/j.margeo.2010.10.018
- Rebesco M., Özmaral A., Urgeles, R., Accettella D., Lucchi R.G., Rütther D., Winsborrow M., Llopart J., Caburlotto A., Lantzsch H., Hanebuth T. (2016). Evolution of a High-Latitude Sediment Drift inside a Glacially-Carved Trough Based on High-Resolution Seismic Stratigraphy (Kveithola, NW Barents Sea). *Quaternary Science Reviews*, vol. 147, pp. 178-193. doi:10.1016/j.quasci-rev.2016.02.007
- Renberg I., Wik M. (1984). Dating recent lake sediments by soot particle counting. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie: Verhandlungen*, vol. 22, n. 2, pp. 712-718, doi:10.1080/03680770.1983.11897371

- Ritchie J., McHenry J.R. (1990). Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns. A Review: *Journal of Environment Quality*, vol. 19, n.2, pp. 215-233, doi:10.2134/jeq1990.00472425001900020006x
- Robbins J., Edgington D. (1975). Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 39, n. 3, pp. 285-304, doi:10.1016/0016-7037(75)90198-2
- Rose N.L. (1991). Fly Ash Particles in Lake Sediments: Extraction, Characterisation and Distribution. Tesi di dottorato discussa presso University of London
- Rose N.L. (1994). A note on further refinements to a procedure for the extraction of carbonaceous fly-ash particles from sediments. *Journal of Paleolimnology*, vol. 11, n. 2, pp. 201-204
- Rose N.L., Juggins S. (1994). A spatial relationship between carbonaceous particles in lake sediments and sulphur deposition. *Atmospheric Environment*, vol. 28, pp. 177-183.
- sediments and sulphur deposition', *Atmos. Environ.* 28, 177–183

- Rose N.L., Harlock S., Appleby P.G., Battarbee R.W. (1995). Dating of recent lake sediments in the United Kingdom and Ireland using spheroidal carbonaceous particle (SCP) concentration profiles. *The Holocene*, vol. 5, n. 3, pp. 328-335, doi:10.1177/095968369500500308
- Rose N.L., Yang H. (2007). Temporal and spatial patterns of spheroidal carbonaceous particles (SCPs) in sediments, soils and deposition at Lochnagar, In: *Lochnagar: The Natural History of a Mountain Lake. Developments in Paleoenvironmental Research*, vol 12; Rose N.L. Ed.; Springer: Dordrecht, NL, pp. 403-423, doi:10.1007/1-4020-3986-7\_17
- Rose, N.L. (2015). Spheroidal Carbonaceous Fly Ash Particles Provide a Globally Synchronous Stratigraphic Marker for the Anthropocene. *Environmental Science and Technology*, vol. 49, pp. 4155-4162, doi:10.1021/acs.est.5b00543
- Rose, N.L. (2017). Spheroidal carbonaceous fly ash particles in the anthropocene. In: *Encyclopedia of the Anthropocene*, 5 vols.; Dellasala D.A., Goldstein M.I., Eds.; Elsevier: Amsterdam, NL, pp. 189-195, doi:10.1016/B978-0-12-809665-9.10005-9
- Rütther D.C., Bjarnadóttir L.R., Junttila J., Husum K., Rasmussen T.L., Lucchi R.G., Andreassen K. (2012). Pattern and timing of the

- northwestern Barents Sea Ice Sheet deglaciation and indications of episodic Holocene deposition. *Boreas*, vol. 41, n. 3, pp. 494–512, doi:10.1111/j.1502-3885.2011.00244.x
- Sabbatini A., Bazzarrò M., Caridi F., De Vittor C., Esposito V., Lucchi R.G., Negri A., Morigi C. (2023). Benthic Foraminifera and Productivity Regimes in the Kveithola Trough (Barents Sea) —Ecological Implications in a Changing Arctic and Actuopaleontological Meaning. *Marine Science and Engineering*, vol. 11, n. 2, doi:10.3390/jmse11020237
  - Sandom C., Faurby S., Sandel B., Svenning J.-C. (2014). Global late Quaternary megafauna extinctions linked to humans, not climate change. *Proceedings of the Royal Society B*, vol. 281, n. 1787, pp. 1-8, doi:10.1098/rspb.2013.3254
  - Saville S. (2022). Valuing time: Tourism transitions in Svalbard. *Polar Record*, vol. 58, n. E11, pp. 1-13, doi:10.1017/S0032247422000055
  - Smedsrud L., Esau I, Ingvaldsen R.B., Eldevik T., Haugan P.M., Li C., Lien V.S., Olsen A., Omar A.M., Otterå O.H., Risebrobakken B., Sandø A., Semenov V.A., Sorokina S. (2013). The role of the Barents Sea in



- the Arctic climate system, vol. 51, n. 3, pp. 415-449, doi: 10.1002/rog.20017
- Steffen W., Broadgate W., Deutsch L., Gaffney O., Ludwig C. (2015). The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration, *The Anthropocene Review*, vol. 2, n. 1, pp. 81-98, doi:10.1177/2053019614564785
  - Steffen W., Crutzen P.J., Grinevald J., McNeill (2011). The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions of The Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, pp. 842-867, doi:10.1098/rsta.2010.0327
  - Steffen W., Crutzen P.J., McNeill (2007). The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature?. *AMBIO - A Journal of the Human Environment*, vol. 36, n. 8, pp. 614-621, doi:10.1579/0044-7447(2007)36[614:TAAHNO]2.0.CO;2
  - Steffen W., Leinfelder R., Zalasiewicz J., Waters C., Williams M., Summerhayes C., Barnosky A., Cearreta A., Crutzen P.J., Edgeworth M., Ellis E.C., Fairchild I., Gałuszka A., Grinevald J., Haywood A., Ivar do Sul J., Jeandel C., McNeill J.R., Odada E., Oreskes N., Revkin A.,

- Richter d., Syvitski J., Vidas D., Wagreich M., Wing S.L., Wolfe A.P., Schellnhuber H.J. (2016). Stratigraphic and Earth System approaches to defining the Anthropocene. *Earth's Future*, vol. 4, n. 8, pp. 324-345, doi:10.1002/2016EF000379.
- Steffen W., Rockström J., Richardson K., Lenton T.M. Folke C., Liverman D., Summerhayes C., ; Barnosky A., Cornell S.E., Crucifix, M., Donges J.F., Fetzer I., Lade S.J., Scheffer M., Winkelmann R., Schellnhuber H.J. (2018). Trajectories of the Earth System in the Anthropocene, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, n. 33, pp. 8252-8259, doi:10.1073/pnas.181014111
  - Swindles G., Watson E., Turner T., Galloway J.M., Hadlari T., Wheeler J., Bacon K.L. (2015). Spheroidal carbonaceous particles are a defining stratigraphic marker for the Anthropocene. *Scientific Reports*, vol. 5, pp. 1-6, doi:10.1038/srep10264
  - Tesi T., Muschitiello F., Smittenberg R.H., Jakobsson M., Vonk J.E., Hill P., Andersson A., Kirchner N., Noormets R., Dudarev O., Semiletov I., Gustafsson O. (2016). Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming. *Nature Communications*, vol. 7, n. 13653, pp.1-10, doi:10.1038/ncomms13653

- Thomas E., Booth L., Maslin M., Shackleton N.J. (1995), Northeastern Atlantic benthic foraminifera during the last 45,000 years: Changes in productivity seen from the bottom up, *Paleoceanography and Paleoclimatology*, vol. 10, n.3, pp. 545-562, doi:10.1029/94PA03056
- Vinje T., Kvambekk A. (1991). Barents Sea drift ice characteristics. *Polar Research*, vol. 10, n. 1, pp. 59-68, doi:10.1111/j.1751-8369.1991.tb00635.x
- Viridis G. (2020). GREAT ACCELERATION dell’impatto antropico nei sedimenti marini. La risposta della carota S42 prelevata nel mare Adriatico mediante lo studio di *Spheroidal Carbonaceous Particles* ed elementi in tracce. Tesi di laurea magistrale discussa presso l’Università Politecnica delle Marche
- Vukić J., Fott J., Petrusek A., Šanda R. (2006). What can size distribution of spheroidal carbonaceous particles reveal about their source?. *Atmospheric Environment*, vol. 40, n. 19, pp. 3527-3535, doi:10.1016/j.atmosenv.2006.01.036
- Waters C., Zalasiewicz J., Williams M., Ellis M. A., Snelling A. M. (2014). A stratigraphical basis for the Anthropocene?. *Geological*

- Society London Special Publications, vol. 395, n. 1, pp. 149-165, doi: 10.1144/SP395.18
- Waters C., Syvitski, J.P.M., Gałuszka, A., Hancock G.J., Zalasiewicz J., Cearreta A., Grinevald J., Jeandel C., McNeill J. R., Summerhayes C., Barnosky A. (2015). Can nuclear weapons fallout mark the beginning of the Anthropocene Epoch?. *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 71, n. 3, pp. 46-57, doi:10.1177/0096340215581357
  - Waters C., Zalasiewicz J., Summerhayes C., Barnosky A., Poirier C., Gałuszka A., Cearreta A., Edgeworth M., Ellis E.C. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene, *Science*, vol. 351, n. 6269, pp. 1-10, doi:10.1126/science.aad2622
  - Waters C., Zalasiewicz J., Summerhayes C., Fairchild I., Rose N.L., Loader N., Shotyk W., Cearreta A., Head M., Syvitski J., Williams M., Wagnreich M., Barnosky A., An Z., Leinfelder R., Jeandel C., Gałuszka A., Ivar do Sul J., Gradstein F., Steffen W., McNeill J., Wing S., Poirier C., Edgeworth M. (2018). Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Anthropocene Series: Where and how to look for potential candidates, *Earth-Science Reviews*, vol. 178, pp. 379-429, doi:10.1016/j.earscirev.2017.12.016

- Williams M., Zalasiewicz J., Waters C., Landing, E. (2013). Is the fossil record of complex animal behaviour a stratigraphical analogue for the Anthropocene?. Geological Society London Special Publications, vol. 395, n. 1, pp. 143-148, doi:10.1144/SP395.8
- Wilson, L.J., Hald, M., Godtlielsen, F. (2011). Foraminiferal faunal evidence of twentieth-century Barents Sea warming. The Holocene, vol. 21, pp. 527-537, doi:10.1177/09596836103857
- Wik M., Renberg I. (1991). Recent atmospheric deposition in Sweden of carbonaceous particles from fossil-fuel combustion surveyed using lake sediments', *Ambio*, vol. 20, pp. 289-292.
- Wollenburg J., Mackensen A. (1998). On the vertical distribution of living (rose bengal stained) benthic foraminifers in the arctic ocean. *Journal of Foraminiferal Research*, vol. 28, n. 4, pp. 268-285, doi:10.2113/gsjfr.28.4.268
- Zalasiewicz J., Waters C., Williams M., Barnosky A., Cearreta A., Crutzen P.J., Ellis E., Ellis M.A., Fairchild I., Grinevald J., Haff P., Hajdas I., Leinfelder R., McNeill J., Odada E., Poirier C., Richter D., Steffen W., Summerhayes C., Syvitski J., Vidas D., Wagreich M., Wing S., Wolfe A.P., An Z., Oreskes N. (2015). When did the Anthropocene

begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International*, vol. 383, pp.196-203, doi:10.1016/j.quaint.2014.11.045.

- Zalasiewicz J., Waters C., Ivar do Sul J., Corcoran P., Barnosky A., Cearreta A., Edgeworth M., Gałuszka A., Jeandel C. Leinfelder R., McNeill J., Steffen W., Summerhayes C., Wapreisch M., Williams M., Wolfe A.P., Yonan Y. (2016). The geological cycle of plastics and their use as a stratigraphic indicator of the Anthropocene. *Anthropocene*, vol. 13, pp. 4-17, doi:10.1016/j.ancene.2016.01.002

## 7. SITOGRAFIA

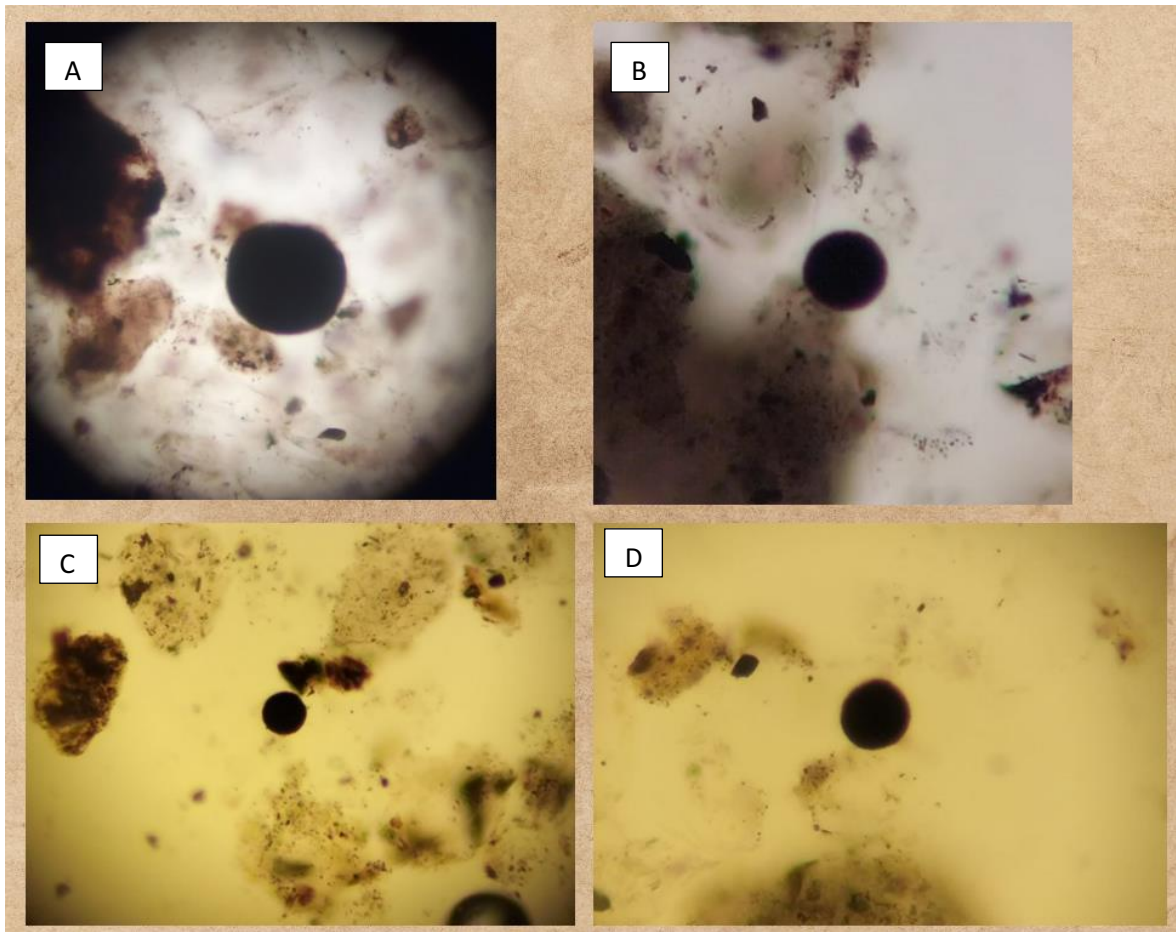
- <https://www.cnr.it/it/comunicato-stampa/7179/artico-ecco-cosa-e-accaduto-14-mila-anni-fa>
- <https://www.no-regime.com/ru-it/wiki/Foraminifera>
- <https://www.climalteranti.it/2011/04/05/la-teoria-di-milankovic-non-vacilla/>
- <https://www.climalteranti.it/2009/05/06/le-variazioni-climatiche-durante-1%E2%80%99ultimo-milione-di-anni-mandanti-killer-e-alibi-prima-parte/>
- [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_IT/SEM6DMH2SDH\\_0.html#:~:text=Quando%20il%20ciclo%20di%20Milankovitch,%C3%A8%20noto%20come%20effetto%20albedo.](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_IT/SEM6DMH2SDH_0.html#:~:text=Quando%20il%20ciclo%20di%20Milankovitch,%C3%A8%20noto%20come%20effetto%20albedo.)
- <https://mosj.no/en/>
- <https://www.climate.gov/media/15021>
- <https://arcticportal.org/maps/download/maps-shipping/2415-future-central-arctic-route-and-sea-ice-conditions>
- <https://www.indexmundi.com/g/g.aspx?c=sv&v=21>
- <https://www.fao.org/fishery/en/facp/nor?lang=en>
- <https://nsidc.org/arcticseaicenews/>

- <https://www.climate.gov/media/15021>
- <https://www.fiskeridir.no/>
- <https://polarconnection.org/svalbard-fisheries-protection-zone/>
- <https://www.npolar.no/en/themes/bjornoya/>
- <https://snl.no/Bj%C3%B8rn%C3%B8ya>
- <https://polarhistorie.no/personer/Zachariassen,%20Soren.html>
- <https://www.thearcticinstitute.org/changing-nature-russia-arctic-presence-case-study-pyramiden/>
- <https://www.arctic-council.org/projects/arctic-shipping-status-reports/>



## 8. PLATES

### 8.1 Particelle sferoidali carboniose (SCP's)

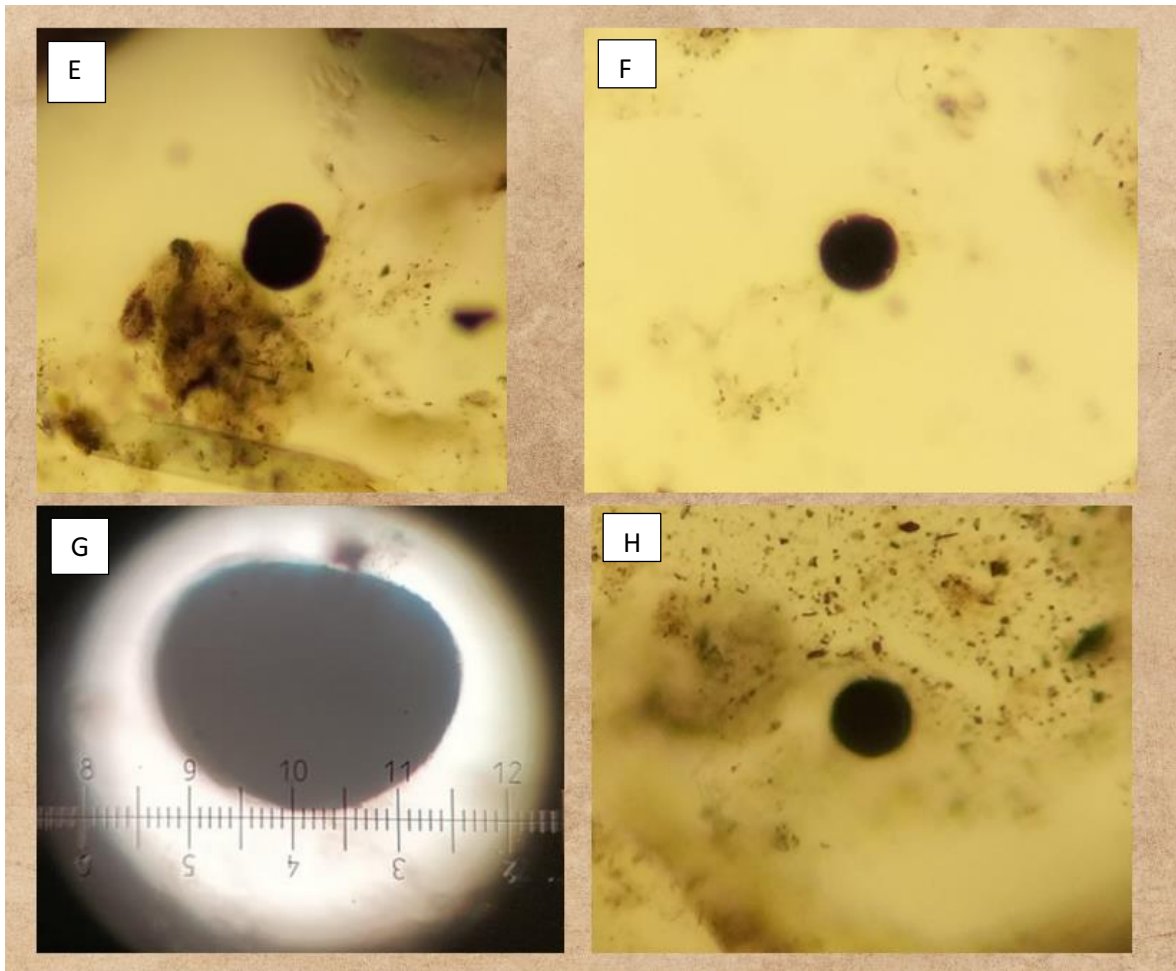


**A:** SCP's individuata ai cm 15-16 (anno 1870) con dimensioni di 57  $\mu\text{m}$ .

**B:** SCP's individuata ai cm 15-16 (anno 1870) con dimensioni di 30  $\mu\text{m}$ .

**C:** SCP's individuata ai cm 15-16 (anno 1870) con dimensioni di 19  $\mu\text{m}$ .

**D:** SCP's individuata ai cm 10-11 (anno 1927) con dimensioni di 19  $\mu\text{m}$ .

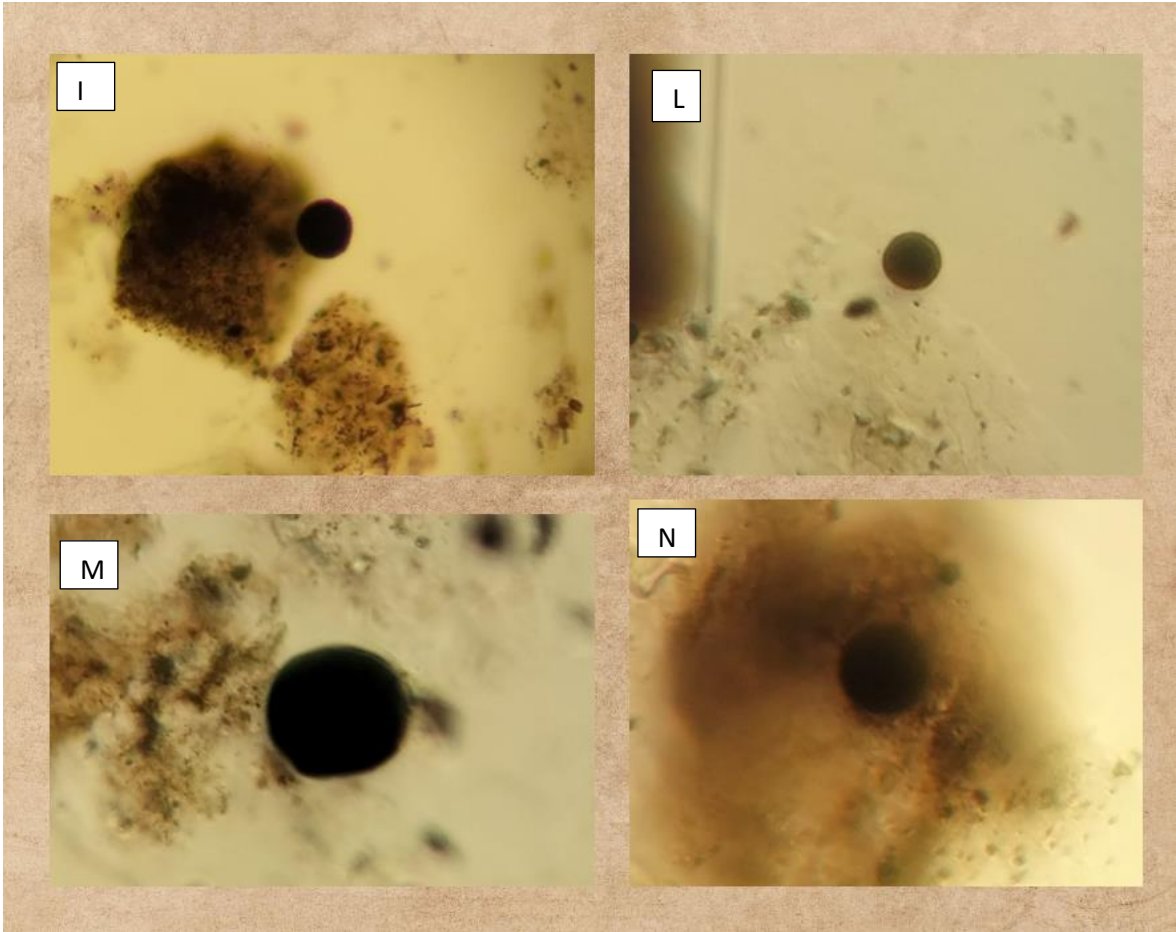


**E:** SCP's individuata ai cm 8-9 (anno 1945) con dimensioni di 19 µm.

**F:** SCP's individuata ai cm 7-8 (anno 1955) con dimensioni di 19 µm.

**G:** SCP's individuata ai cm 6-7 (anno 1964) con dimensioni di 30 µm.

**H:** SCP's individuata ai cm 5-6 (anno 1974) con dimensioni di 19 µm.

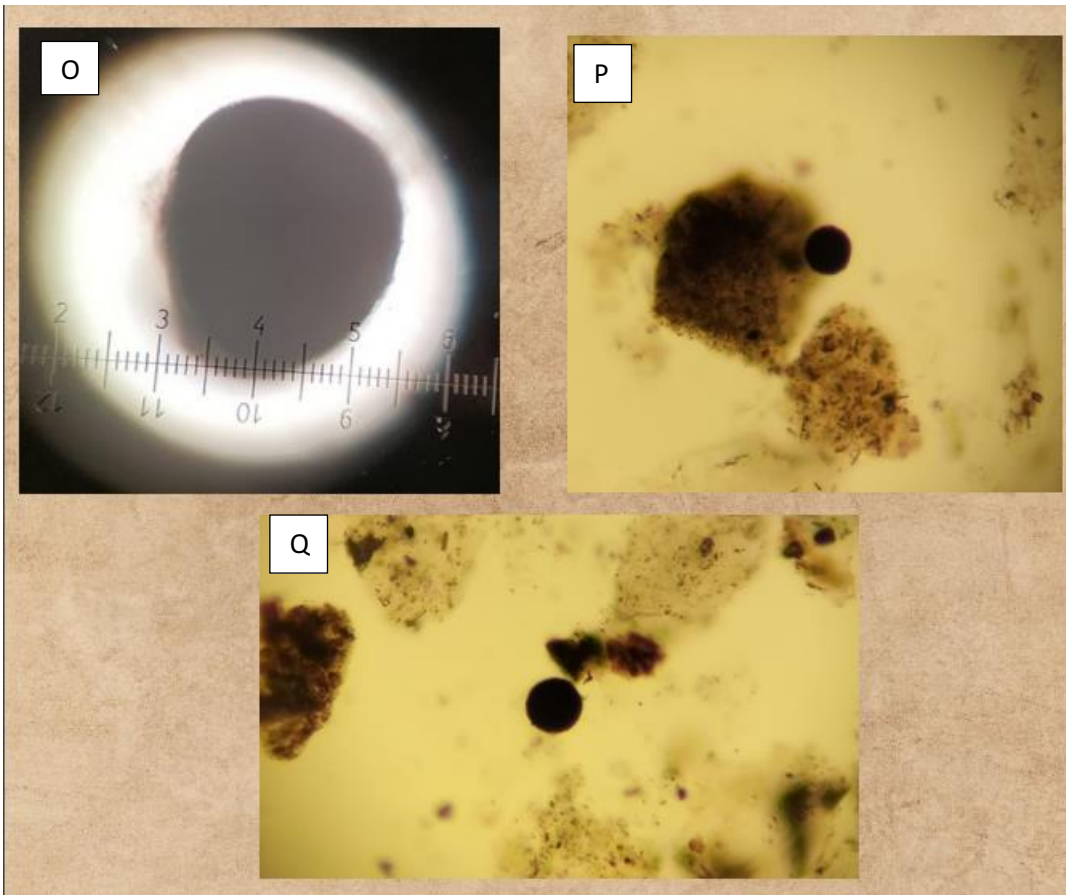


**I:** SCP's individuata ai cm 4-5 (anno 1983) con dimensioni di 17,5  $\mu\text{m}$ .

**L:** SCP's individuata ai cm 3-4 (anno 1993) con dimensioni di 7,5  $\mu\text{m}$ .

**M:** SCP's individuata ai cm 2-3 (anno 2000) con dimensioni di 25  $\mu\text{m}$ .

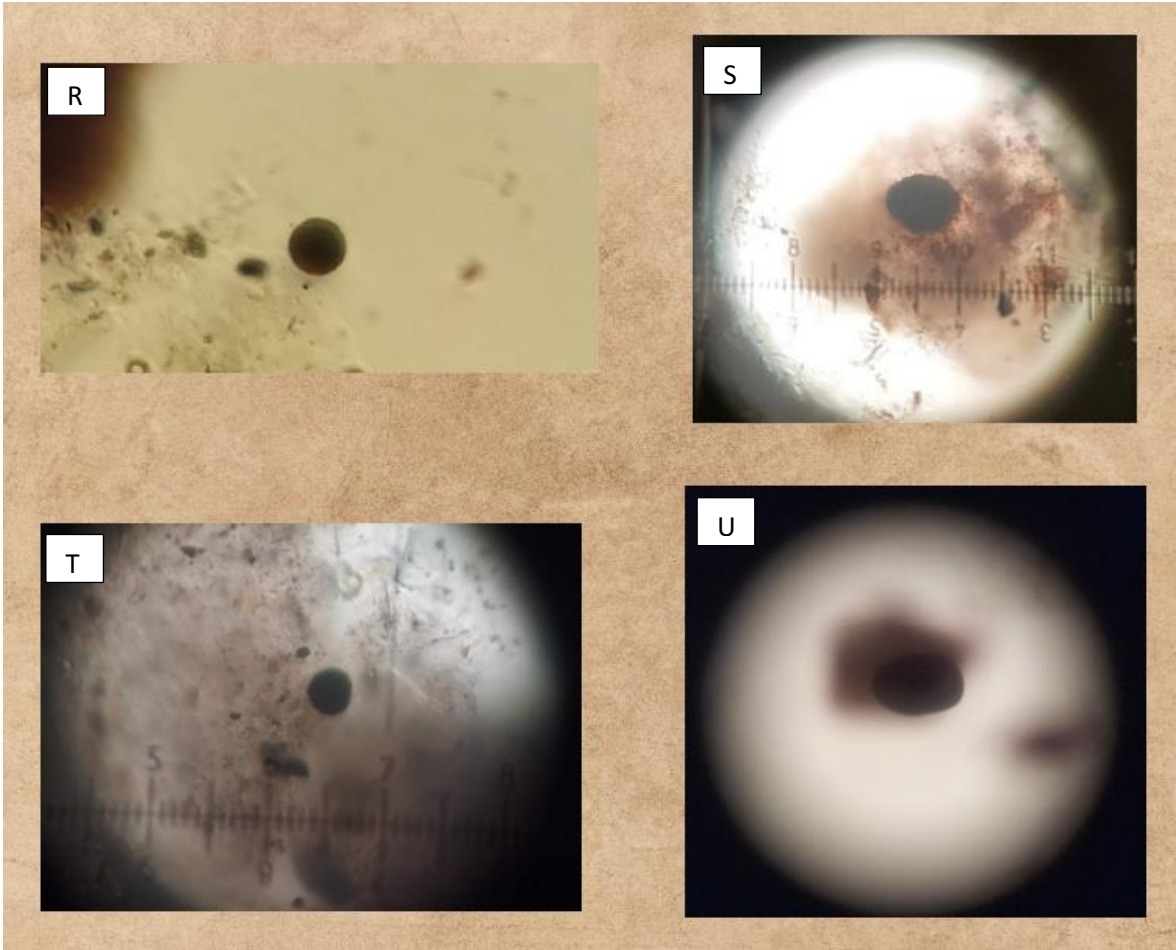
**N:** SCP's individuata ai cm 2-3 (anno 2000) con dimensioni di 7,5  $\mu\text{m}$ .



**O:** SCP's individuata ai cm 1,5-2 (anno 2005) con dimensioni di 25  $\mu\text{m}$ .

**P:** SCP's individuata ai cm 1,5-2 (anno 2005) con dimensioni di 12,5  $\mu\text{m}$ .

**Q:** SCP's individuata ai cm 1-1,5 (anno 2009) con dimensioni di 12,5  $\mu\text{m}$ .



**R:** SCP's individuata ai cm 0,5-1 (anno 2014) con dimensioni di 5  $\mu\text{m}$ .

**S:** SCP's individuata ai cm 0,5-1 (anno 2014) con dimensioni di 10  $\mu\text{m}$ .

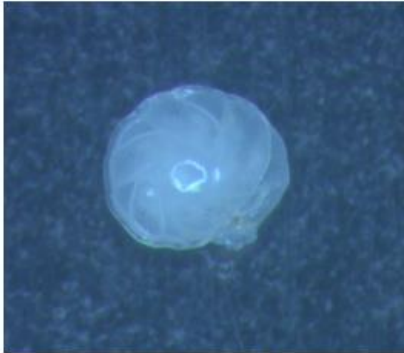
**T:** SCP's individuata ai cm 0-0,5 (anno 2016) con dimensioni di 5  $\mu\text{m}$ .

**U:** SCP's individuata ai cm 0-0,5 (anno 2016) con dimensioni di 15  $\mu\text{m}$ .

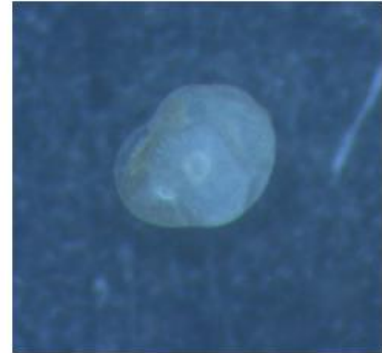
## 8.2 Foraminiferi bentonici

### Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei perforati.

*Cassidulina neoteretis*



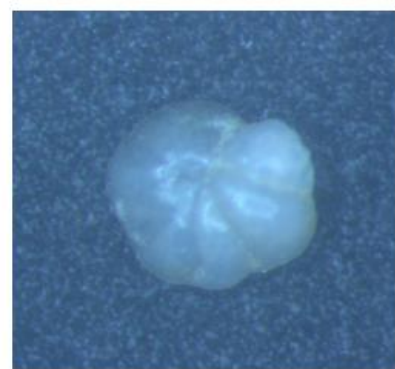
*Cassidulina reniforme*



*Cibicides refulgens*



*Cibicoides wuellerstorfi*



*Cassidulina neoteretis*: cm 3-4 (anno 1993) -(**Ingrandimento**) 7,5x.

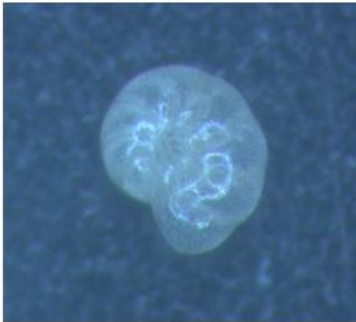
*Cassidulina reniforme*: cm 3-4 (anno 1993) -7,5x.

*Cibicides refulgens*: cm 1-1,5 (anno 2009) -7,5x (porzione ventrale).

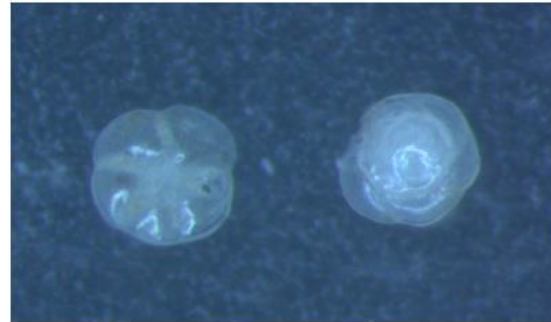
*Cibicoides wuellerstorfi*: cm 15-16 (anno 1870) -7x.

**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei perforati.**

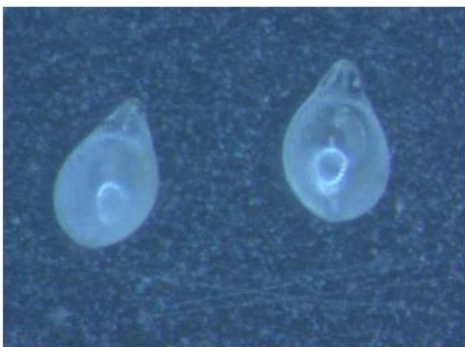
*Elphidium excavatum*



*Epistominella exigua*



*Fissurina* spp.



*Globobulimina auriculata* subsp. *artica*



*Elphidium excavatum*: cm 2-3 (anno 2000) -(**Ingrandimento**) 7,5x.

*Epistominella exigua*: cm 5-6 (anno 1974) -7,5x (porzione dorsale e ventrale).

*Fissurina* spp.: cm 6-7 (anno 1964) -7x (porzione dorsale e ventrale).

*Globobulimina auriculata* subsp. *Artica*: cm 3-4 (anno 1993) -6x.

**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei perforati.**

*Islandiella norcrossi*



**calcarei perforati.**

*Lagena* spp.



*Lenticulina gibba*



*Lenticulina* spp.



*Islandiella norcrossi*: cm 3-4 (anno 1993) -(**Ingrandimento**) 7,5x.

*Lagena* spp.: cm 0,5-1 (anno 2014) -6,5x.

*Lenticulina gibba*: cm 15-16 (anno 1870) -6x (porzione ventrale).

*Lenticulina* spp.: cm 14-15 (anno 1884) -7,5x.



**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei perforati.**

*Lobatula lobatula*



*Melonis affinis*



*Nonionella auricula*



*Nonionellina labradorica*



*Lobatula lobatula*: cm 1-1,5 (anno 2009) -(**Ingrandimento**) 7,5x (porzione ventrale e dorsale).

*Melonis affinis*: cm 1-1,5 (anno 2009) -6x.

*Nonionella auricula*: cm 8-9 (anno 1945) -7,5x (porzione ventrale).

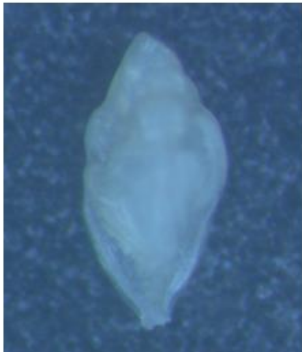
*Nonionellina labradorica*: cm 1-1,5 (anno 2009) -7,5x.

**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei perforati.**

*Pseudopolymorphina novaglie*



*Trifarina angulosa*



*Pullenia bulloides*



*Trifarina fluens*



*Pseudopolymorphina novaglie*: cm 15-16 (anno 1870) -(**Ingrandimento**) 7x.

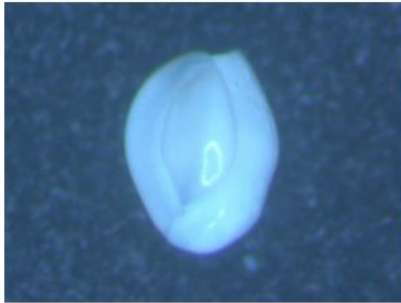
*Pullenia bulloides*: cm 1-1,5 (anno 2009) -7,5x.

*Trifarina angulosa*: cm 8-9 (anno 1945) -7x.

*Trifarina fluens*: cm 1,5-2 (anno 2005) -6,5.

**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi calcarei imperforati o miliolidi.**

*Miliolinella* spp.



*Pyrgo* spp.



*Triloculina tricarinata*



*Miliolinella* spp.: cm 0-0,5 (anno 2016) -(**Ingrandimento**) 7x (porzione ventrale).

*Pyrgo* spp.: cm 10-11 (anno 1927) -7x (porzione ventrale).

*Triloculina tricarinata*: cm 0,5-1 (anno 2014) -6,5x.

**Tavola rappresentante le specie più abbondanti di foraminiferi  
agglutinanti**

*Reophax fusiformis*



*Reophax scorpiurus*



*Reophax fusiformis*: cm 0-0,5 (anno 2016) -(**Ingrandimento**) 6x.

*Reophax scorpiurus*: cm 0-0,5 (anno 2016) -7x.

## **9. ALLEGATI DELLE MATRICI**

*Allegato 1:* Dato standardizzato del numero delle sferette totali presenti nella carota 21-5.

*Allegato 2:* Dato standardizzato del numero dei foraminiferi bentonici presenti nella carota 21-5.

*Allegato 3:* Dato in percentuale del numero dei foraminiferi bentonici presenti nella carota 21-5.

*Allegato 1:*

Tasso di sedimentazione	Nome dell'area	Dimensione campionata	Misure corrette a 0.8 cm	Peso secco pre-lavaggi	Peso iniziale prima di smear slide	Misura campionata	Profondità corrette mediate	Totale sferette	5 μ	7,5 μ	10 μ	11,4 μ	12,5 μ	15 μ	17,5 μ	19 μ	22,5 μ	25 μ	26,6 μ	30 μ	30,4 μ	50 μ	57 μ	62,5 μ	75 μ																					
2016	PS 99.1 21	0-0,5	0-0,5	0,46	0,058	0,2	0,25	140	40	45	25	0	25	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
2014	PS 99.1 21	0,5-1	0,5-1	0,57	0,069	0,2	0,75	110	10	40	15	0	25	0	5	0	0	5	0	0	0	0	5	0	5																					
2009	PS 99.1 21	1-1,5	1-1,5	0,5	0,083	0,2	1,25	55	0	10	5	0	30	0	0	0	5	5	0	0	0	0	0	0	0																					
2005	PS 99.1 21	1,5-2	1,5-2	0,51	0,068	0,2	1,75	30	0	5	5	0	5	0	5	0	0	5	0	0	0	0	0	5	0																					
2000	PS 99.1 21	2;3	2;3	0,94	0,083	0,2	2,50	30	5	5	5	0	0	5	0	0	0	5	0	5	0	0	0	0	0																					
1993	PS 99.1 21	3;4	3-3,8	1,18	0,088	0,2	3,40	20	0	5	0	0	10	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1983	PS 99.1 21	4;5	3,8-4,6	1,01	0,096	0,2	4,20	10	0	0	0	0	5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1974	PS 99.1 21	5;6	4,6-5,4	1,18	0,093	0,2	5,00	15	0	0	0	5	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1964	PS 99.1 21	6;7	5,4-6,2	1,1	0,09	0,2	5,80	10	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	0	0	0	0																					
1955	PS 99.1 21	7;8	6,2-7	1,05	0,122	0,2	6,60	10	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1945	PS 99.1 21	8;9	7-7,8	0,99	0,1	0,2	7,40	5	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1936	PS 99.1 21	9;10	7,8-8,6	1,14	0,081	0,2	8,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1927	PS 99.1 21	10;11	8,6-9,4	1,15	0,0532	0,2	9,00	10	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	0	0	0	0	0																					
1912	PS 99.1 21	11;12	9,4-10,2	1,27	0,0799	0,2	9,80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1898	PS 99.1 21	12;13	10,2-11	1,21	0,0814	0,2	10,60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1893	PS 99.1 21	13;14	11-11,8	1,31	0,093	0,2	11,40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1884	PS 99.1 21	14;15	11,8-12,6	1,18	0,0647	0,2	12,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
1870	PS 99.1 21	15;16	12,6-13,6	1,23	0,0884	0,2	13,10	45	0	0	0	0	0	0	0	25	0	0	0	0	5	0	5	0	0																					
1860	PS 99.1 21	16;17	13,6-15	1	0,0918	0,2	14,30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																					
								<b>490</b>	<b>Totale sferette di piccole dimensioni:</b>														<b>340</b>	<b>Totale sferette di medie dimensioni:</b>														<b>115</b>	<b>Totale sferette di grandi dimensioni:</b>							<b>25</b>

Allegato 2:

													CALCAREI													MILICIDI																	
													Guscio calcareo: perforato													Guscio calcareo: imperforato																	
																										AGGLUTINANTI																	
Nome dell'area	Dimensione campionata	Misure corrette a 0.8 cm	Peso secco	Setaccio 63-150 µm	Setaccio >150 µm	Split %	Profondità corrette mediate	Astrononion hamadaense	Cassidulina neoteretis	Cassidulina reniforme	Cibicides refolgens	Cibicides wuellerstorfi	Discorbis vilardeboanus	Elphidium excavatum	Epistominella exigua	Fissurina spp.	Globocassidulina subglobosa	Globobullina auriculata subsp. Arctica	Islandiella norcrossi	Islandiella helenae	Lagena spp.	Lenticulina gibba	Lenticulina spp	Lobatula lobatula	Melonis affinis	Nonionella auricula	Nonionella lirida	Nonionella labradorica	Patellina conugata	Pseudopolymorphina novangliae	Pulkenia bulboides	Trifarina angulosa	Trifarina fluens	Milolinella spp	Pyrgo spp.	Trifarina tricaninata	Reophax fusiformis	Reophax scoriurus	Totale calcarei	Totale milicidi	Totale agglutinanti	Totale foraminiferi	
PS99.1215 0-0.5	0-0.5		1,47	0,5	0,33	1,00	0,25	8,84	8,84	3,40	32,65	0,00	3,40	21,77	11,56	0,00	2,04	0,00	18,37	0,00	6,80	0,00	0,00	3,40	42,18	0,00	0,00	18,37	0,00	0,00	8,84	12,93	10,20	1,36	0,00	0,00	0,68	0,68	213,61	1,36	1,36	216,33	
PS99.1215 0.5-1	0.5-1		1,99	0,65	0,21	0,25	0,75	0,00	8,04	0,00	243,22	0,00	4,02	50,25	24,12	0,00	12,06	0,00	20,10	0,00	4,02	0,00	0,00	4,02	98,49	0,00	0,00	10,05	0,00	0,00	10,05	4,02	14,07	0,00	0,00	2,01	0,00	0,00	506,53	2,01	0,00	508,54	
PS99.1215 1-1.5	1-1.5		1,73	0,7	0,12	0,13	1,25	27,75	55,49	9,25	601,16	0,00	9,25	143,35	73,99	0,00	0,00	0,00	87,86	0,00	4,62	0,00	0,00	9,25	226,59	0,00	0,00	13,87	0,00	0,00	32,37	18,50	50,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1364,16	0,00	0,00	1364,16	
PS99.1215 1.5-2	1.5-2		2,45	1,01	0,2	0,08	1,75	39,18	39,18	4,90	391,84	0,00	24,49	156,73	58,78	0,00	9,80	0,00	181,22	0,00	9,80	0,00	0,00	24,49	195,92	0,00	0,00	39,18	0,00	0,00	24,49	39,18	24,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1302,86	0,00	0,00	1302,86	
PS99.1215 2-3	2-3		5,78	2	0,76	0,06	2,5	16,61	19,38	0,00	282,35	0,00	5,54	88,58	38,75	0,00	5,54	0,00	127,34	0,00	11,07	0,00	0,00	11,07	77,51	0,00	0,00	19,38	0,00	0,00	8,30	5,54	16,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	750,17	0,00	0,00	750,17	
PS99.1215 3-4	3-3.8		6,11	1,55	0,58	0,08	3,40	7,86	19,64	5,89	194,44	0,00	3,93	37,32	19,64	0,00	0,00	3,93	82,49	0,00	7,86	0,00	0,00	9,82	96,24	0,00	0,00	9,82	0,00	0,00	7,86	3,93	15,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	534,21	0,00	0,00	534,21	
PS99.1215 4-5	3.8-4.6		4,78	1,29	0,44	0,06	4,20	30,13	30,13	0,00	194,14	0,00	6,69	160,67	53,56	0,00	6,69	0,00	187,45	0,00	30,13	0,00	0,00	30,13	153,97	0,00	0,00	50,21	0,00	0,00	6,69	10,04	36,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1017,57	0,00	0,00	1017,57	
PS99.1215 5-6	4.6-5.4		7,09	1,47	0,52	0,13	5,00	6,77	27,08	9,03	74,47	0,00	2,26	39,49	13,54	0,00	3,39	0,00	46,26	0,00	6,77	0,00	0,00	6,77	53,03	0,00	0,00	7,90	0,00	0,00	6,77	10,16	18,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	331,73	0,00	0,00	331,73	
PS99.1215 6-7	5.4-6.2		3,6	0,84	0,31	0,13	5,80	13,33	20,00	2,22	115,56	0,00	4,44	66,67	42,22	4,44	13,33	0,00	122,22	0,00	8,89	0,00	0,00	24,44	115,56	0,00	0,00	37,78	0,00	0,00	11,11	6,67	22,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	631,11	0,00	0,00	631,11	
PS99.1215 7-8	6.2-7		5,61	1,34	0,55	0,06	6,60	5,70	8,56	0,00	131,19	17,11	2,85	96,97	45,63	5,70	0,00	0,00	176,83	0,00	8,56	2,85	0,00	17,11	111,23	8,56	0,00	48,48	0,00	0,00	17,11	25,67	19,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	761,50	0,00	0,00	761,50
PS99.1215 8-9	7-7.8		6,99	1,48	0,56	0,13	7,40	4,58	0,00	1,14	60,66	0,00	0,00	54,94	16,02	0,00	0,00	0,00	34,33	0,00	1,14	0,00	0,00	4,58	65,24	1,14	0,00	14,88	0,00	0,00	12,59	12,59	10,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	294,13	0,00	0,00	294,13	
PS99.1215 9-10	7.8-8.6		5,56	1,49	0,55	0,06	8,20	28,78	5,76	5,76	94,96	0,00	2,88	103,60	0,00	0,00	0,00	2,88	60,43	0,00	11,51	0,00	0,00	37,41	218,71	14,39	0,00	80,58	0,00	0,00	28,78	23,02	40,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	759,71	0,00	0,00	759,71
PS99.1215 10-11	8.6-9.4		6,18	1,5	0,75	0,06	9,00	12,94	20,71	0,00	116,50	15,53	2,59	88,03	36,25	0,00	0,00	0,00	139,81	2,59	2,59	0,00	0,00	18,12	160,52	2,59	7,77	64,72	0,00	0,00	31,07	36,25	10,36	0,00	2,59	0,00	0,00	0,00	0,00	768,93	2,59	0,00	771,52
PS99.1215 11-12	9.4-10.2		4,91	1,23	0,45	0,06	9,80	29,33	0,00	9,78	260,69	22,81	3,26	202,04	35,85	0,00	0,00	0,00	146,64	0,00	16,29	0,00	0,00	6,52	192,26	22,81	0,00	71,69	0,00	0,00	32,59	42,36	32,59	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1127,49	0,00	0,00	1127,49
PS99.1215 12-13	10.2-11		7,2	1,54	0,53	0,13	10,60	8,89	0,00	12,22	47,78	0,00	1,11	51,11	0,00	0,00	1,11	0,00	18,89	2,22	4,44	0,00	0,00	0,00	81,11	2,22	0,00	48,89	1,11	0,00	2,22	13,33	18,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	315,56	0,00	0,00	315,56	
PS99.1215 13-14	11-11.8		7,63	1,44	0,33	0,06	11,40	12,58	0,00	14,68	65,01	8,39	0,00	113,24	12,58	0,00	0,00	0,00	65,01	0,00	6,29	0,00	0,00	25,16	123,72	12,58	0,00	48,23	0,00	4,19	6,29	18,87	20,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	557,80	0,00	0,00	557,80	
PS99.1215 14-15	11.8-12.6		8,69	1,4	0,38	0,13	12,20	7,36	1,84	7,36	48,79	6,44	0,00	40,51	1,84	0,00	3,68	0,00	15,65	0,00	2,76	0,00	0,92	10,13	41,43	3,68	0,00	7,36	0,00	0,00	0,92	4,60	11,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	216,34	0,00	0,00	216,34	
PS99.1215 15-16	12.6-13.6		7,75	2,03	0,54	0,06	13,10	16,52	6,19	4,13	59,87	6,19	0,00	101,16	16,52	0,00	0,00	0,00	30,97	0,00	8,26	2,06	0,00	51,61	119,74	16,52	2,06	37,16	0,00	2,06	18,58	10,32	18,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	528,52	0,00	0,00	528,52	
PS99.1215 16-17 [FOND 13.6-15]			11,78	2,01	0,73	0,06	14,30	9,51	0,00	0,00	28,52	0,00	2,72	59,76	9,51	0,00	0,00	0,00	89,64	0,00	0,00	0,00	0,00	6,79	88,29	6,79	1,36	23,09	0,00	0,00	2,72	4,07	19,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	351,78	0,00	0,00	351,78	

**Allegato 3:**

Nome dell'area	Dimensione campionata	Misure corrette a 0,8 cm	Peso secco	Setaccio 63-150 µm	Setaccio >150 µm	Split %	CALCAREI																	MILIOIDI				AGGLUTINANTI		Totale foraminiferi														
							Guscio calcareo: perforato																	Guscio calcareo: imperforato																				
							<i>Profondità corrette mediate</i>	<i>Astronionion hamadaense</i>	<i>Cassidulina neoteretis</i>	<i>Cassidulina reniforme</i>	<i>Cibicides refulgens</i>	<i>Cibicides wuellerstorfi</i>	<i>Discorbis vilardeboanus</i>	<i>Elphidium excavatum</i>	<i>Epistominella exigua</i>	<i>Fissurina spp.</i>	<i>Globocassidulina subglobosa</i>	<i>Globobulimina auriculata subsp. Arctica</i>	<i>Islandiella norcrossi</i>	<i>Islandiella helena</i>	<i>Lagena spp.</i>	<i>Lenticulina gibba</i>	<i>Lenticulina spp.</i>	<i>Lobatula lobatula</i>	<i>Melonis affinis</i>	<i>Nonionella auricula</i>	<i>Nonionella iridea</i>	<i>Nonionella labradorica</i>	<i>Patellina corrugata</i>	<i>Pseudopolymorphina novangliae</i>	<i>Pullenia bullides</i>	<i>Trifarina angulosa</i>	<i>Trifarina fluens</i>	<i>Milionella spp.</i>	<i>Pyrgo spp.</i>	<i>Trifarina tricarinata</i>	<i>Reophax fusiformis</i>	<i>Reophax scoriurus</i>	Calcarei	Miliodidi	Agglutnanti			
PS 99.121.5 0-0,5	0-0,5		1,47	0,5	0,33	1,00	0,25	4,09	4,09	1,57	15,09	0,00	1,57	10,06	5,35	0,00	0,94	0,00	8,49	0,00	3,14	0,00	0,00	1,57	19,50	0,00	0,00	8,49	0,00	0,00	0,94	0,00	4,09	5,97	4,72	0,63	0,00	0,00	0,31	0,31	98,74	0,63	0,63	100,00
PS 99.121.5 0,5-1	0,5-1		1,99	0,65	0,21	0,25	0,75	0,00	1,58	0,00	47,83	0,00	0,79	9,88	4,74	0,00	2,37	0,00	3,95	0,00	0,79	0,00	0,00	0,79	19,37	0,00	0,00	1,98	0,00	0,00	1,98	0,79	2,77	0,00	0,00	0,40	0,00	0,00	99,60	0,40	0,00	100,00		
PS 99.121.5 1-1,5	1-1,5		1,73	0,7	0,12	0,13	1,25	2,03	4,07	0,68	44,07	0,00	0,68	10,51	5,42	0,00	0,00	0,00	6,44	0,00	0,34	0,00	0,00	0,68	16,61	0,00	0,00	1,02	0,00	0,00	2,37	1,36	3,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 1,5-2	1,5-2		2,45	1,01	0,2	0,08	1,75	3,01	3,01	0,38	30,08	0,00	1,88	12,03	4,51	0,00	0,75	0,00	13,91	0,00	0,75	0,00	0,00	1,88	15,04	0,00	0,00	3,01	0,00	0,00	1,88	3,01	1,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 2-3	2-3		5,78	2	0,76	0,06	2,50	2,21	2,58	0,00	37,64	0,00	0,74	11,81	5,17	0,00	0,74	0,00	16,97	0,00	1,48	0,00	0,00	1,48	10,33	0,00	0,00	2,58	0,00	0,00	1,11	0,74	2,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 3-4	3-3,8		6,11	1,55	0,58	0,08	3,40	1,47	3,68	1,10	36,40	0,00	0,74	6,99	3,68	0,00	0,00	0,74	15,44	0,00	1,47	0,00	0,00	1,84	18,01	0,00	0,00	1,84	0,00	0,00	1,47	0,74	2,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 4-5	3,8-4,6		4,78	1,29	0,44	0,06	4,20	2,96	2,96	0,00	19,08	0,00	0,66	15,79	5,26	0,00	0,66	0,00	18,42	0,00	2,96	0,00	0,00	2,96	15,13	0,00	0,00	4,93	0,00	0,00	0,66	0,99	3,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 5-6	4,6-5,4		7,09	1,47	0,52	0,13	5,00	2,04	8,16	2,72	22,45	0,00	0,68	11,90	4,08	0,00	1,02	0,00	13,95	0,00	2,04	0,00	0,00	2,04	15,99	0,00	0,00	2,38	0,00	0,00	2,04	3,06	5,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 6-7	5,4-6,2		3,6	0,84	0,31	0,13	5,80	2,11	3,17	0,35	18,31	0,00	0,70	10,56	6,69	0,70	2,11	0,00	19,37	0,00	1,41	0,00	0,00	3,87	18,31	0,00	0,00	5,99	0,00	0,00	1,76	1,06	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 7-8	6,2-7		5,61	1,34	0,55	0,06	6,60	0,75	1,12	0,00	17,23	2,25	0,37	12,73	5,99	0,75	0,00	0,00	23,22	0,00	1,12	0,37	0,00	2,25	14,61	1,12	0,00	6,37	0,00	0,00	2,25	3,37	2,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 8-9	7-7,8		6,99	1,48	0,56	0,13	7,40	1,56	0,00	0,39	20,62	0,00	0,00	18,68	5,45	0,00	0,00	0,00	11,67	0,00	0,39	0,00	0,00	1,56	22,18	0,39	0,00	5,06	0,00	0,00	4,28	4,28	3,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 9-10	7,8-8,6		5,56	1,49	0,55	0,06	8,20	3,79	0,76	0,76	12,50	0,00	0,38	13,64	0,00	0,00	0,00	0,38	7,95	0,00	1,52	0,00	0,00	4,92	28,79	1,89	0,00	10,61	0,00	0,00	3,79	3,03	5,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 10-11	8,6-9,4		6,18	1,5	0,75	0,06	9,00	1,68	2,68	0,00	15,10	2,01	0,34	11,41	4,70	0,00	0,00	0,00	18,12	0,34	0,34	0,00	0,00	2,35	20,81	0,34	1,01	8,39	0,00	0,00	4,03	4,70	1,34	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	99,66	0,34	0,00	100,00		
PS 99.121.5 11-12	9,4-10,2		4,91	1,23	0,45	0,06	9,80	2,60	0,00	0,87	23,12	2,02	0,29	17,92	3,18	0,00	0,00	0,00	13,01	0,00	1,45	0,00	0,00	0,58	17,05	2,02	0,00	6,36	0,00	0,00	2,89	3,76	2,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 12-13	10,2-11		7,2	1,54	0,53	0,13	10,60	2,82	0,00	3,87	15,14	0,00	0,35	16,20	0,00	0,00	0,35	0,00	5,99	0,70	1,41	0,00	0,00	0,00	25,70	0,70	0,00	15,49	0,35	0,00	0,70	4,23	5,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 13-14	11-11,8		7,63	1,44	0,33	0,06	11,40	2,26	0,00	2,63	11,65	1,50	0,00	20,30	2,26	0,00	0,00	0,00	11,65	0,00	1,13	0,00	0,00	4,51	22,18	2,26	0,00	8,65	0,00	0,75	1,13	3,38	3,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 14-15	11,8-12,6		8,69	1,4	0,38	0,13	12,20	3,40	0,85	3,40	22,55	2,98	0,00	18,72	0,85	0,00	1,70	0,00	7,23	0,00	1,28	0,00	0,43	4,68	19,15	1,70	0,00	3,40	0,00	0,00	0,43	2,13	5,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 15-16	12,6-13,6		7,75	2,03	0,54	0,06	13,10	3,13	1,17	0,78	11,33	1,17	0,00	19,14	3,13	0,00	0,00	0,00	5,86	0,00	1,56	0,39	0,00	9,77	22,66	3,13	0,39	7,03	0,00	0,39	3,52	1,95	3,52	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		
PS 99.121.5 16-17	13,6-15		11,78	2,01	0,73	0,06	14,30	2,70	0,00	0,00	8,11	0,00	0,77	16,99	2,70	0,00	0,00	0,00	25,48	0,00	0,00	0,00	0,00	1,93	25,10	1,93	0,39	6,56	0,00	0,00	0,77	1,16	5,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00		



