ISSN 2039-6651
anno 2024 numero 84



MISCELLANEA INGV

Un viaggio per conoscere il nostro pianeta tra aria, acqua, terra e fuoco: una selezione di articoli dal blog INGVambiente

ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

84

Direttore Responsabile
Daniela VERSACE

Editor in Chief
Milena MORETTI (editorinchief.collane-editoriali@ingv.it)

Editorial Board
Laura ALFONSI (laura.alfonsi@ingv.it)
Christian BIGNAMI (christian.bignami@ingv.it)
Simona CARANNANTE (simona.carannante@ingv.it)
Viviana CASTELLI (viviana.castelli@ingv.it)
Luca COCCHI (luca.cocchi@ingv.it)
Luigi CUCCI (luigi.cucci@ingv.it)
Lorenzo CUGLIARI (lorenzo.cugliari@ingv.it)
Alessia DI CAPRIO (alessia.dicaprio@ingv.it)
Roberto DI MARTINO (roberto.dimartino@ingv.it)
Domenico DI MAURO (domenico.dimauro@ingv.it)
Domenico DORONZO (domenico.doronzo@ingv.it)
Filippo GRECO (filippo.greco@ingv.it)
Alessandro IAROCCI (alessandro.iarocci@ingv.it)
Mario MATTIA (mario.mattia@ingv.it)
Daniele MELINI (daniele.melini@ingv.it)
Anna NARDI (anna.nardi@ingv.it)
Lucia NARDONE (lucia.nardone@ingv.it)
Marco OLIVIERI (marco.olivieri@ingv.it)
Nicola PAGLIUCA (nicola.pagliuca@ingv.it)
Pierangelo ROMANO (pierangelo.romano@ingv.it)
Maurizio SOLDANI (maurizio.soldani@ingv.it)
Sara STOPPONI (sara.stopponi@ingv.it)
Umberto TAMMARO (umberto.tammaro@ingv.it)
Andrea TERTULLIANI (andrea.tertulliani@ingv.it)
Stefano URBINI (stefano.urbini@ingv.it)

Ufficio Editoriale
Francesca DI STEFANO - Coordinatore
Rossella CELI - Segreteria di Redazione
Produzione e grafica-redazionale
Barbara ANGIONI
Massimiliano CASCONE
Rossella CELI
Francesca DI STEFANO
Patrizia PANTANI

REGISTRAZIONE AL TRIBUNALE DI ROMA N.174 | 2014, 23 LUGLIO
© 2014 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia | Rappresentante legale:
Carlo DOGLIONI
Sede: Via di Vigna Murata, 605 | Roma



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA

ISSN 2039-6651
anno 2024 numero 84

MISCELLANEA INGV

Un viaggio per conoscere il nostro pianeta tra aria, acqua, terra e fuoco: una selezione di articoli dal blog INGVambiente

A journey to learn about our planet among air, water, earth and fire: a selection of articles from the INGVambiente blog

Lili Cafarella[1], Stefania Amici[2], Igino Coco[1], Domenico Di Mauro[1], Anita Grezio[3], Ingrid Hunstad[1], Isabella Munda[4], Silvia Pau[1]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2
[2]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti
[3]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna
[4]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Palermo

Accettato 10 agosto 2024 | *Accepted 10 August 2024*
Come citare | *How to cite* Cafarella L., Amici S., Coco I., Di Mauro D., Grezio A., Hunstad I., Munda I., Pau S., (2024). Un viaggio per conoscere il nostro pianeta tra aria, acqua, terra e fuoco: una selezione di articoli dal blog INGVambiente. Misc. INGV, 84: 1-244, https://doi.org/10.13127/misc/84

In copertina Foto di Stein Egil Liland | *Cover Photo by Stein Egil Liland*

84

Direttore Responsabile Dipartimento Ambiente
Massimo CHIAPPINI

Coordinamento scientifico del blog
Lili CAFARELLA e Leonardo SAGNOTTI

Redazione scientifica
Lili CAFARELLA, Chiara CARICCHI, Igino COCO, Domenico DI MAURO, Maria Di NEZZA, Ingrid HUNSTAD, Paolo MADONIA, Silvia PAU

Blog administrator
Lili CAFARELLA

Supporto grafico
Barbara ANGIONI

La piattaforma di comunicazione INGVambiente si articola nei seguenti social media:
Facebook: https://www.facebook.com/INGVambiente
Instagram: https://www.instagram.com/ingvambiente/
Threads: https://www.threads.net/@ingvambiente
Twitter/X: https://x.com/INGVambiente
Mastodon: https://mastodon.uno/@INGVambiente
Youtube: https://www.youtube.com/c/ingvambiente

Blog: https://ingvambiente.com

MISTO
Carta | A sostegno della gestione forestale responsabile
FSC® C111769

INDICE

Prefazione 9

Preface *10*

Introduzione 11

Introduction *12*

ARIA 13

Misteri magnetici nel sistema solare: alla scoperta dei campi planetari 15
Paola De Michelis

Danzando tra le stelle: lo spettacolo delle aurore 20
Fabio Giannattasio

L'inquinamento luminoso dallo spazio 27
Dario Stelitano e Luca Merucci

Stupefacenti scariche elettriche dalle nubi verso la ionosfera 32
Carlo Scotto

Onda su Onda: la radio 35
Enrico Zuccheretti

La catastrofe del dirigibile Italia di Umberto Nobile: perché i naufraghi non furono ascoltati? 38
Bruno Zolesi e Michael Pezzopane

Ozono, il fragile guscio che circonda la Terra 42
Maria di Nezza e Giovanni Muscari

Perché mantenere il riscaldamento globale sotto 1.5°C 48
Ingrid Hunstad

Perché i cambiamenti climatici odierni sono diversi da quelli del passato? 53
Leonardo Sagnotti

Le variazioni del clima possono influenzare l'evoluzione di una civiltà? 58
Antonio Cascella

La geoingegneria in aiuto al clima: lo stoccaggio della CO_2 64
Monia Procesi, Barbara Cantucci e Mario Anselmi

Foglie e licheni per il biomonitoraggio delle "polveri sottili" 70
Aldo Winkler

ACQUA 77

Oceano e clima, un legame indissolubile 79
Vincenzo Artale

Mediterraneo: siamo consapevoli dei rischi dell'aumento del livello del mare indotti dai cambiamenti climatici? 85
Marco Anzidei

Impatto dei cambiamenti climatici nel Mediterraneo 89
Tommaso Alberti

Che clima ci attende? Ce lo dice il mare profondo 93
Nadia Lo Bue e Alessandra Giuntini

Ciclo idrologico e riscaldamento globale 98
Annalisa Cherchi

La distribuzione non casuale delle sorgenti termali sulla Terra 102
Giancarlo Tamburello, Giancarlo Ciotoli, Monia Procesi, Dmitri Rouwet e Laura Sandri

Il rischio nascosto tra le profondità del Lago Albano 105
Dmitri Rouwet

La storia geologica del lago Trasimeno 111
Chiara Caricchi e Massimiliano Rinaldo Barchi

L'Era della plastica 117
Marina Locritani e Silvia Merlino

Qual è lo stato di salute dei ghiacciai continentali? 123
Daniele Melini

Qual è lo stato di salute dei ghiacciai alpini? Ci aiuta la radar glaciologia 128
Achille Zirizzotti, Stefano Urbini e Cesidio Bianchi

TERRA 133

L'asse vagante, ovvero la rotazione mutevole della Terra 135
Gaia Soldati

I poli della Terra 141
Laura Alfonsi

Le inversioni del campo magnetico terrestre: cosa sappiamo? 147
Lili Cafarella, Chiara Caricchi, Domenico Di Mauro e Leonardo Sagnotti

Il campo magnetico terrestre dà i numeri! 152
Laura Alfonsi e Domenico Di Mauro

Il magnetismo e l'espansione dei fondali oceanici 156
Chiara Caricchi

La Val Padana è africana! La convergenza tra Africa e Eurasia nel Mediterraneo 160
Gaia Siravo

I gradienti e la dinamica del pianeta Terra 165
Carlo Doglioni

I luoghi nascosti della Terra 171
Ilaria Isola

Quando la vita comparve sulla Terra 176
Antonio Cascella

Strabone, Plinio e il mistero delle isole scomparse 181
Michele Caputo e Adriano Nardi

Non siamo tutti uguali davanti ai cambiamenti climatici 185
Giuliana Rubbia e Anita Grezio

FUOCO 189

Attività solare: quanto influenza il clima terrestre? 191
Fabio Giannattasio

Monitoraggio da satellite degli incendi boschivi 195
Stefania Amici

Dimmi che CO_2 sei e ti dirò da dove vieni 199
Giorgio Capasso e Roberto Di Martino

Emissione di gas da pozzo alle pendici dei Colli Albani: il blowout di Ciampino del giugno 2020 203
Maria Luisa Carapezza, Massimo Ranaldi e Luca Tarchini

Nuove mappe di dettaglio sulla pericolosità da Radon nella regione Lazio 208
Alessandra Sciarra e Livio Ruggiero

I "preziosi" vulcani del Mar Tirreno: il Marsili e il Palinuro 212
Luca Cocchi

Quando il vulcano ci nutre 218
Salvatore Giammanco

Vulcani di fango: il fango dalle viscere della Terra 222
Alessandra Sciarra e Tullio Ricci

Impariamo a conoscere l'energia geotermica e l'uso che se ne può fare 226
Monia Procesi

Scorie radioattive e Deposito Nazionale: facciamo chiarezza 230
Monia Procesi

Tra storia e geologia: il fascino del cratere di Castiglione e delle antiche cave di Lapis Gabinus nel Lazio 236
Patrizia Macrì, Chiara Andreotti e Rocco Bochicchio

Prefazione

Il 29 settembre 2024, l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) festeggia 25 anni dalla sua fondazione, ma l'INGV ha radici che partono dal 1800 con i primi osservatori vulcanologici mondiali, sull'Etna e sul Vesuvio, la fondazione dell'Osservatorio Vesuviano nel 1841, l'istituzione dell'ING per volontà di Guglielmo Marconi nel 1936, oltre a vari altri importanti istituti del CNR a Milano, Palermo e Catania, coagulatisi nell'attuale istituto a costituire il più importante ente pubblico di ricerca in Europa nel campo delle geoscienze. L'INGV è un albero che fortunatamente continua a crescere.

L'uomo è attratto più da ciò che vede e l'interno della Terra rimane osservabile solo con osservazioni indirette, speculazioni e interpretazioni basate sui dati di varia natura che il pianeta ci offre. Nonostante anche il nostro corpo sia fatto di atomi del mantello terrestre che rappresenta circa l'80% della massa terrestre, siamo troppo poco consapevoli e interessati a comprendere la struttura e i meccanismi di funzionamento della Terra. Eppure, le risorse e i rischi naturali vengono dal pianeta, ma forse siamo ancorati all'idea che sottoterra vi sia l'inferno, mentre continuiamo a guardare alle stelle come al paradiso. In realtà il nostro paradiso è proprio la Terra, ed è qui che dobbiamo conoscerla per conviverci nel modo più sicuro, e per rispettarla.

L'INGV, svolge funzioni cruciali per la ricerca scientifica e opera come struttura operativa del sistema nazionale di protezione civile: lo fa tramite le sue oltre 1100 unità di personale motivato nel contribuire alla crescita culturale e al bene pubblico, e grazie allo sviluppo delle sue reti di monitoraggio e sorveglianza, coordinate dai tre Dipartimenti (Ambiente, Terremoti, Vulcani) e le sue dieci sezioni (Osservatorio Nazionale Terremoti, Osservatorio Vesuviano, Osservatorio Etneo, Milano, Bologna, Pisa, Roma 1, Roma 2, Irpinia, Palermo). Le infrastrutture quali per esempio le reti sismica, geodetica, idrogeochimica, magnetica, gravimetrica, ionosferica, ecc. registrano ogni variazione dei parametri terrestri, oltre a tutti i terremoti (in media oltre 15.000 l'anno in Italia, circa uno ogni 30 minuti). Una missione portante dell'INGV è trasmettere al pubblico le notizie sugli eventi che registriamo ogni giorno, su come si sviluppano le eruzioni, sul perché avvengono i terremoti, su tutte le metodologie che ci permettono di muoverci con un GPS nel nostro telefono, e allo stesso tempo misurano gli spostamenti delle placche tettoniche che aprono gli oceani, formano le catene montuose e generano i terremoti e i vulcani.

I ricercatori dell'INGV lavorano con entusiasmo a rilevare tutti i segnali che la Terra emette e per scoprirne l'origine. Con la stessa passione investono parte del loro tempo a diffondere queste conoscenze ai cittadini, per coinvolgerli nell'affascinante viaggio che è la comprensione del nostro paradiso, per informarli sugli eventi che scandiscono la vita quotidiana, ma anche per istruirli nel comportamento utile a vivere i terremoti, gli tsunami, le eruzioni o qualsiasi altro evento calamitoso in modo consapevole, per proteggersi nel miglior modo possibile. Dobbiamo imparare quanto sia fondamentale lo studio della Terra, trasmettere alle future generazioni le nozioni e la passione per continuare il nostro viaggio di conoscenza del pianeta, per difenderci, per difenderlo, per reperire le risorse indispensabili per il vivere di una nazione, ma anche dell'intera umanità.

Josè Saramago dice che "*fisicamente abitiamo uno spazio, ma sentimentalmente siamo abitati da una memoria*", di tutto quello che la Terra ci ha fatto vivere. Questa collana rappresenta una raccolta preziosa dei tanti contributi divulgativi che l'INGV ha voluto offrire ai cittadini che sostengono le attività dell'istituto. Agli autori un grazie sentito per il loro impegno incondizionato.

Il Presidente dell'INGV
Prof. Carlo Doglioni

Preface

On Sept. 29, 2024, the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) celebrates 25 years since its founding, but the INGV has roots that go back to the 1800s with the world's first volcanological observatories, on Mount Etna and Mount Vesuvius, the founding of the Vesuvius Observatory in 1841, the establishment of the ING at the behest of Guglielmo Marconi in 1936, as well as several other important CNR institutes in Milan, Palermo and Catania, which coalesced into the current institute to form the most important public research institution in Europe in the geosciences. INGV is a tree that fortunately continues to grow.

Man is attracted more by what he sees, and the Earth's interior remains observable only by indirect observations, speculations and interpretations based on the various kinds of data the planet offers us. Although our bodies are also made of atoms from the Earth's mantle, which accounts for about 80 percent of the Earth's mass, we are too little aware of and interested in understanding the Earth's structure and workings. Yet, natural resources and hazards come from the planet, but perhaps we are anchored in the idea that there is hell underground, while we continue to look to the stars as paradise. Actually, our paradise is the Earth itself, and this is where we need to know it in order to live with it in the safest way, and to respect it.

The INGV performs crucial scientific research functions and operates as an operational structure of the national civil protection system: it does so through its more than 1100 staff motivated in contributing to cultural growth and the public good, and through the development of its monitoring and surveillance networks, coordinated by its three Departments (Environment, Earthquakes, Volcanoes) and its ten sections (National Earthquake Observatory, Vesuvius Observatory, Etna Observatory, Milan, Bologna, Pisa, Rome 1, Rome 2, Irpinia, Palermo). Infrastructures such as seismic, geodetic, hydrogeochemical, magnetic, gravimetric, ionospheric, etc. networks record every variation in Earth parameters, as well as all earthquakes (averaging more than 15,000 a year in Italy, about one every 30 minutes). A leading mission of the INGV is to transmit to the public the news about the events we record every day, how eruptions develop, why earthquakes occur, and all the methodologies that allow us to move with a GPS in our phones, and at the same time measure the movements of the tectonic plates that open the oceans, form mountain ranges and generate earthquakes and volcanoes.

INGV researchers work enthusiastically to detect all the signals the Earth emits and to discover their origin. With the same passion they invest part of their time to disseminate this knowledge to citizens, to involve them in the fascinating journey that is the understanding of our paradise, to inform them about the events that mark our daily life, but also to educate them in the useful behavior to experience earthquakes, tsunamis, eruptions or any other calamitous event in a conscious way, to protect themselves in the best way possible. We need to learn how fundamental the study of the Earth is, to transmit to future generations the notions and passion to continue our journey of knowing the planet, to defend ourselves, to defend it, to find the resources that are indispensable for the living of a nation, but also of all humanity.

*Jose Saramago says that "*physically we inhabit a space, but sentimentally we are inhabited by a memory*", of all that the Earth has made us live. This series represents a valuable collection of the many popular contributions INGV has made to citizens who support the institute's activities. To the authors a heartfelt thanks for their unconditional commitment.*

Il Presidente dell'INGV
Prof. Carlo Doglioni

Introduzione

Negli ultimi decenni, le tematiche e le questioni ambientali sono diventate sempre più centrali nelle discussioni globali. Governi, organizzazioni nazionali e internazionali, enti di ricerca e cittadini di tutto il mondo sono coinvolti nella formulazione di soluzioni sostenibili per il nostro pianeta. In questo scenario, la divulgazione scientifica e la partecipazione pubblica hanno acquisito un ruolo fondamentale.

Per avvicinare il pubblico non esperto alla ricerca scientifica sull'ambiente condotta dall'INGV, è nato nel 2018 il blog INGVambiente, con l'idea di raccontare la ricerca, le sfide, i successi e i progetti che ricercatori, tecnici e tecnologi affrontano e portano avanti ogni giorno.

Il nostro blog ha l'obiettivo di rendere comprensibili e coinvolgenti le complesse dinamiche di alcuni fenomeni naturali che studiamo. Ogni articolo non solo diffonde conoscenze scientifiche, ma stimola anche il dibattito e la partecipazione attiva dei cittadini. Per questo scopo utilizziamo anche alcuni social media per raggiungere un pubblico più ampio e variegato possibile.

La struttura partecipativa della piattaforma di comunicazione INGVambiente, costituita da blog e social media, permette ai lettori di interagire direttamente con gli autori, creando un dialogo su temi come il cambiamento climatico, l'inquinamento, le energie rinnovabili e i fenomeni fisici che consentono la vita sul nostro pianeta e che raccontano la sua storia e la sua evoluzione. Attraverso commenti, discussioni e condivisioni, i canali di comunicazione di INGVambiente sono diventati in questi anni un vero e proprio laboratorio di idee, dove ogni voce può contribuire a un dibattito globale più ampio.

Il blog in particolare e la piattaforma di comunicazione più in generale, hanno l'ambizioso proposito di offrire un ponte tra il mondo della ricerca e la società civile, attraverso cui ricercatori e scienziati comunicano direttamente i risultati del loro lavoro, in modo chiaro e comprensibile. Questo scambio continuo di informazioni e opinioni è oggi essenziale per costruire una cultura scientifica condivisa e più ampia, anche per contrastare la mala informazione e le fake news dilaganti diffuse spesso al solo scopo di ottenere visibilità in rete.

Questo volume raccoglie alcuni dei contributi pubblicati sul blog del Dipartimento Ambiente del nostro ente. Con questa pubblicazione vogliamo offrire una panoramica delle tematiche trattate dalla nostra ricerca, sperando così di contribuire a costruire un mondo più consapevole e sostenibile.

Introduction

In recent decades, environmental issues and concerns have become increasingly central to global discussions. Governments, national and international organizations, research institutions and citizens worldwide are engaged in formulating sustainable solutions for our planet. In this context, scientific communication and public participation have acquired a fundamental role.

In order to bring the general public closer to the environmental research conducted by INGV, the INGVambiente blog was launched in 2018. Its aim is to narrate the research, challenges, successes, and projects that researchers, technicians, and technologists face and advance every day.

Our blog aims to make the complex dynamics of a number of natural phenomena, topics of our studies, comprehensible and engaging. Each article not only disseminates scientific knowledge but also stimulates debate and active participation from citizens. We also utilize INGVambiente's social media platforms to reach a broader and more diverse audience.

The participative structure of the blog and social media allows readers to interact directly with the authors, creating a dialogue on topics such as climate change, pollution, renewable energy, and the physical phenomena that allow life on our planet and that tell its history and evolution. Through comments, discussions and sharing, INGVambiente's communication channels have, over the years, become a true laboratory of ideas, where every voice can contribute to a broader global debate.

The blog, in particular, and the social media communication platforms, in general, ambitiously aim to offer a bridge between the scientific world and society. This allows researchers and scientists to communicate their work results directly and clearly. This continuous exchange of information and opinions is essential today for building a shared and broader scientific culture, also to contrast misinformation and the widespread fake news, often created solely to gain online visibility.

This volume collects some of the contributions published on the blog of our institute's Environment Department. With this publication, we aim to provide an overview of the topics covered by our research, hoping to contribute to building a more aware and sustainable world.

Keywords Cambiamenti climatici; Geofisica; Rischi ambientali | Climatic change; Geophysics; Environmental risks

ARIA

Misteri magnetici nel sistema solare: alla scoperta dei campi planetari

Paola De Michelis

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Sebbene sulla Terra ci affidiamo al campo magnetico per la navigazione, esistono pianeti dove sarebbe facile perdersi. Il campo magnetico terrestre è cruciale per proteggerci dai raggi cosmici e dalla radiazione solare, ma non tutti i pianeti godono di questa difesa.

Tutti sappiamo usare una bussola, affidandoci così al campo magnetico per orientarci. Tuttavia non è noto a tutti che il campo magnetico terrestre è cruciale soprattutto per un altro motivo: ci protegge costantemente dai raggi cosmici e dalla radiazione solare, garantendo così sul nostro pianeta le condizioni ottimali per il prosperare della vita. Non tutti i pianeti hanno la fortuna di godere di questa difesa!

Come si differenziano i campi magnetici dei pianeti nel nostro sistema solare?

I campi magnetici planetari variano ampiamente tra i diversi pianeti, riflettendo le diverse caratteristiche dei corpi celesti. Nei pianeti rocciosi come la Terra, Mercurio, Venere e Marte, il campo magnetico si forma principalmente dall'interazione tra **materiali elettricamente conduttivi** all'interno del pianeta e la **rotazione planetaria**.



Figura 1 Montaggio di immagini planetarie scattate da navicelle spaziali gestite dal Jet Propulsion Laboratory di Pasadena, in California. Sono incluse (dall'alto al basso) le immagini di Mercurio, Venere, Terra (e Luna), Marte, Giove, Saturno, Urano e Nettuno. (Crediti: NASA/JPL).
Figure 1 *This is a montage of planetary pictures taken by spacecraft managed by the Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, CA. Included are (from top to bottom) images of Mercury, Venus, Earth (and Moon), Mars, Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune. (Credits: NASA/JPL).*

Nei giganti gassosi come **Giove** e **Saturno**, invece, la storia è diversa. Si pensa che i loro campi magnetici, dato che questi giganti sono composti principalmente **da idrogeno ed elio** senza una superficie solida, siano generati da **correnti di idrogeno metallico liquido** all'interno dei loro mantelli gassosi. Questi campi magnetici sono incredibilmente potenti: Giove, ad esempio, vanta un campo magnetico circa 10 volte più intenso della Terra. Saturno, sebbene meno intenso, mantiene comunque un magnetismo notevole.
Tuttavia, non tutti i pianeti possono contare su campi magnetici così intensi. **Mercurio**, con la sua lenta rotazione, mostra un campo magnetico debole. **Venere**, invece, sembra non possedere un campo magnetico globale, forse a causa di una limitata attività di convezione nel suo nucleo interno fuso. Allo stesso modo, **Marte** presenta segni di un campo magnetico frammentato e debole, sebbene in passato ne avesse uno; col tempo, però, il suo interno si è solidificato, compromettendo la forza del campo magnetico.

L'inclinazione del campo magnetico rispetto l'asse di rotazione è importante

Una peculiarità affascinante dei campi magnetici planetari è la loro **inclinazione rispetto all'asse di rotazione dei pianeti**. Questa diversa angolazione ha un ruolo cruciale nel comportamento magnetico planetario e nell'interazione con lo spazio circostante.
Sulla Terra, con un campo magnetico inclinato di circa 9 gradi rispetto all'asse di rotazione, il campo mantiene nel tempo una configurazione stabile che ci protegge in modo continuativo dai raggi cosmici e dalle particelle energetiche del vento solare.
Invece, su Urano, dove l'inclinazione del campo magnetico è di circa **60 gradi rispetto all'asse di rotazione**, il campo magnetico sembra muoversi lateralmente rispetto al modo di rotazione del pianeta. Questo movimento crea **oscillazioni nel campo magnetico**, generando effetti magnetici unici e complessi che influenzano le interazioni con **il vento solare**.
Il vento solare costituito da particelle energetiche cariche provenienti dal Sole interagisce con il campo magnetico planetario, formando una sorta di guscio magnetico chiamato **magnetosfera**. L'orientamento dell'asse magnetico gioca un ruolo fondamentale nella forma e nella stabilità di questa magnetosfera, influenzando la difesa del pianeta dal vento solare e plasmando l'ambiente spaziale circostante.

Campi magnetici planetari e abitabilità

I campi magnetici planetari svolgono un ruolo cruciale nell'atmosfera e nella protezione planetaria. Influenzano la capacità di mantenere un'atmosfera densa, proteggendo i pianeti dalle radiazioni cosmiche e dal vento solare. Gli atomi di gas leggeri, come l'idrogeno e l'elio, possono infatti essere particolarmente suscettibili all'erosione atmosferica causata dal vento solare. Senza un campo magnetico, questi gas leggeri possono sfuggire nello spazio, portando a una perdita significativa di atmosfera nel corso del tempo. L'assenza o la debolezza dei campi magnetici planetari può incidere sull'**abitabilità** di un pianeta e sull'esistenza di **acqua liquida in superficie**. Ad esempio, la mancanza di un campo magnetico significativo su Venere potrebbe aver contribuito allo stato attuale della sua atmosfera estremamente ostile, caratterizzata da temperature superficiali incredibilmente alte e una densa copertura di anidride carbonica. Analogamente, Marte, che ha un campo magnetico molto debole, ha visto la sua atmosfera venire erosa dal vento solare nel corso di miliardi di anni, portando alla perdita di gran parte della sua acqua superficiale.

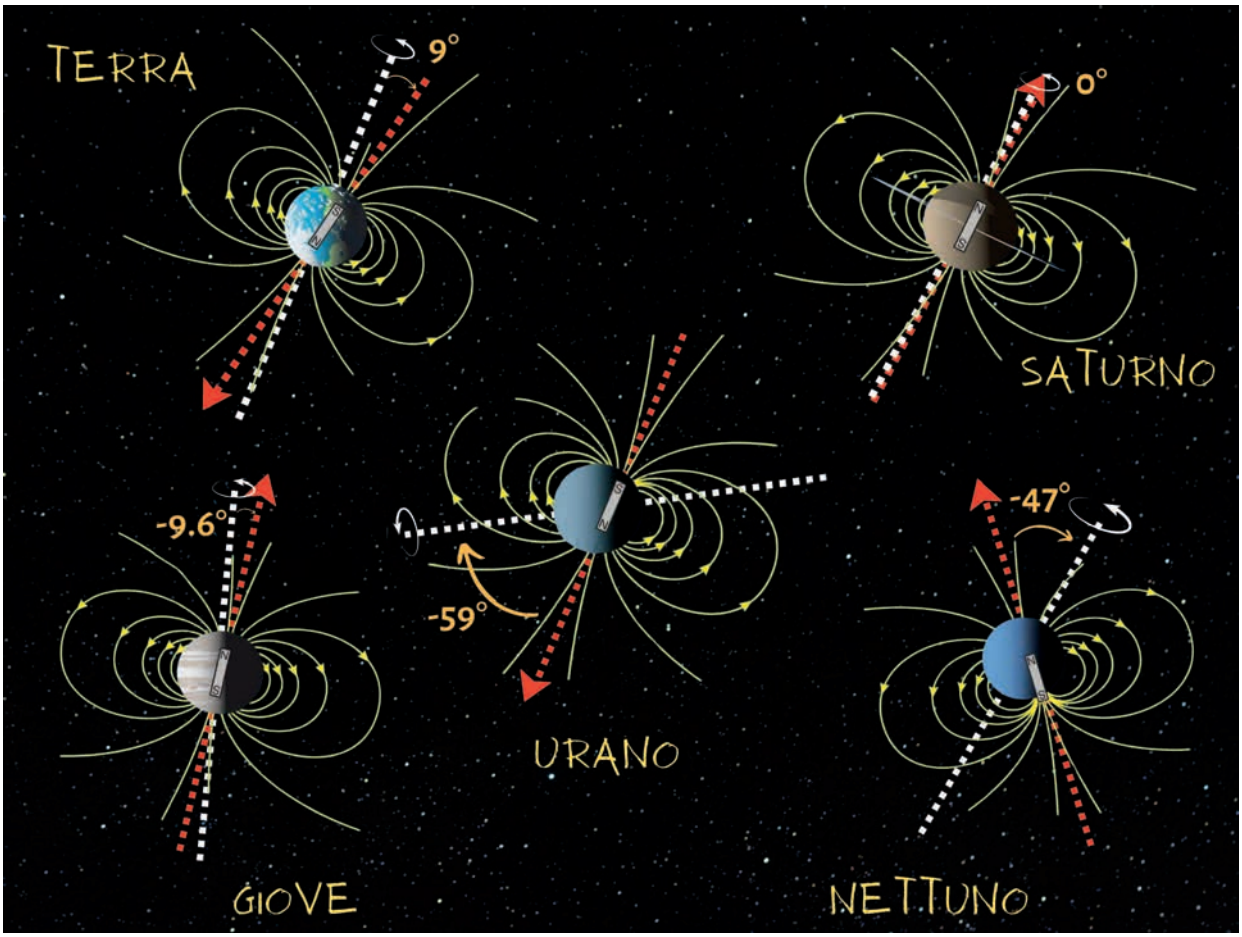


Figura 2 Campo magnetico: Inclinazione dell'asse (in rosso) rispetto all'asse di rotazione (in bianco) di alcuni pianeti nel sistema solare. (L. Cafarella, ridisegnato da Fran Bagenal & Steve Bartlett, University of Colorado Boulder).
Figure 2 *Magnetic field: Inclination of the axis (in red) with respect to the rotation axis (in white) of some planets in the solar system. (L. Cafarella, re-drawn by Fran Bagenal & Steve Bartlett, University of Colorado Boulder).*

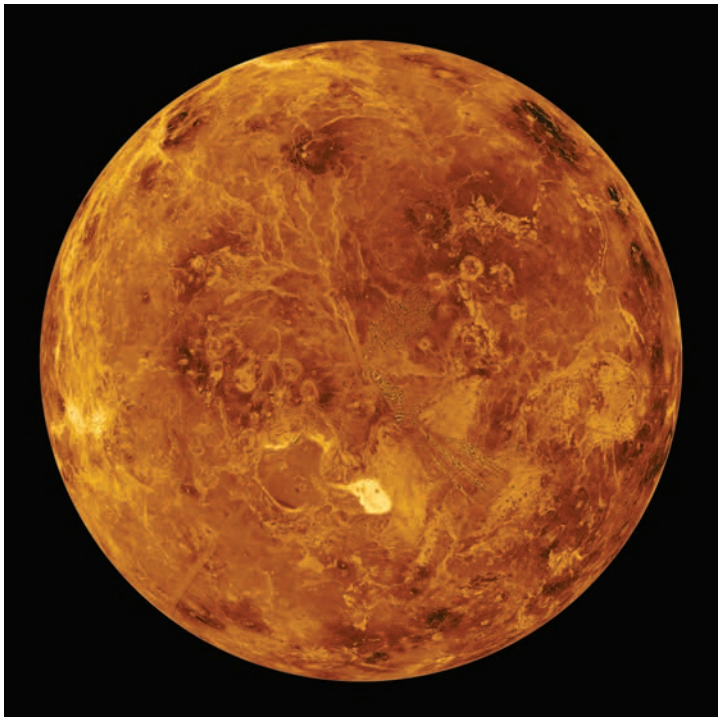


Figura 3 Un'immagine di Venere risultato di dati provenienti dal satellite Magellano della NASA e dal Pioneer Venus Orbiter. (Crediti: NASA/JPL-Caltech).
Figure 3 *A picture of Venus resulting from data of NASA's Magellano satellite and Pioneer Venus Orbiter. (Credits: NASA/JPL-Caltech).*

Le missioni spaziali e la nostra comprensione dei campi magnetici planetari

Le missioni spaziali sono state cruciali per studiare i campi magnetici dei pianeti del nostro sistema solare. La missione **Cassini-Huygens** [1] ha fornito dati chiave esplorando Saturno, i suoi anelli e lune. Le sonde **Voyager 1 e 2** [2] hanno esplorato vari pianeti, offrendo informazioni sui campi magnetici di Giove, Saturno, Urano e Nettuno. La sonda **Galileo** [3] e la missione **Juno** [4] hanno ampliato la comprensione del campo magnetico di Giove e delle sue lune. La **Mars Global Surveyor** [5] si è dedicata allo studio del campo magnetico marziano, mentre missioni come **Cluster** [6] e **THEMIS** [7] hanno esplorato i fenomeni magnetici nello spazio, contribuendo a comprendere le interazioni tra il vento solare e i campi magnetici planetari.

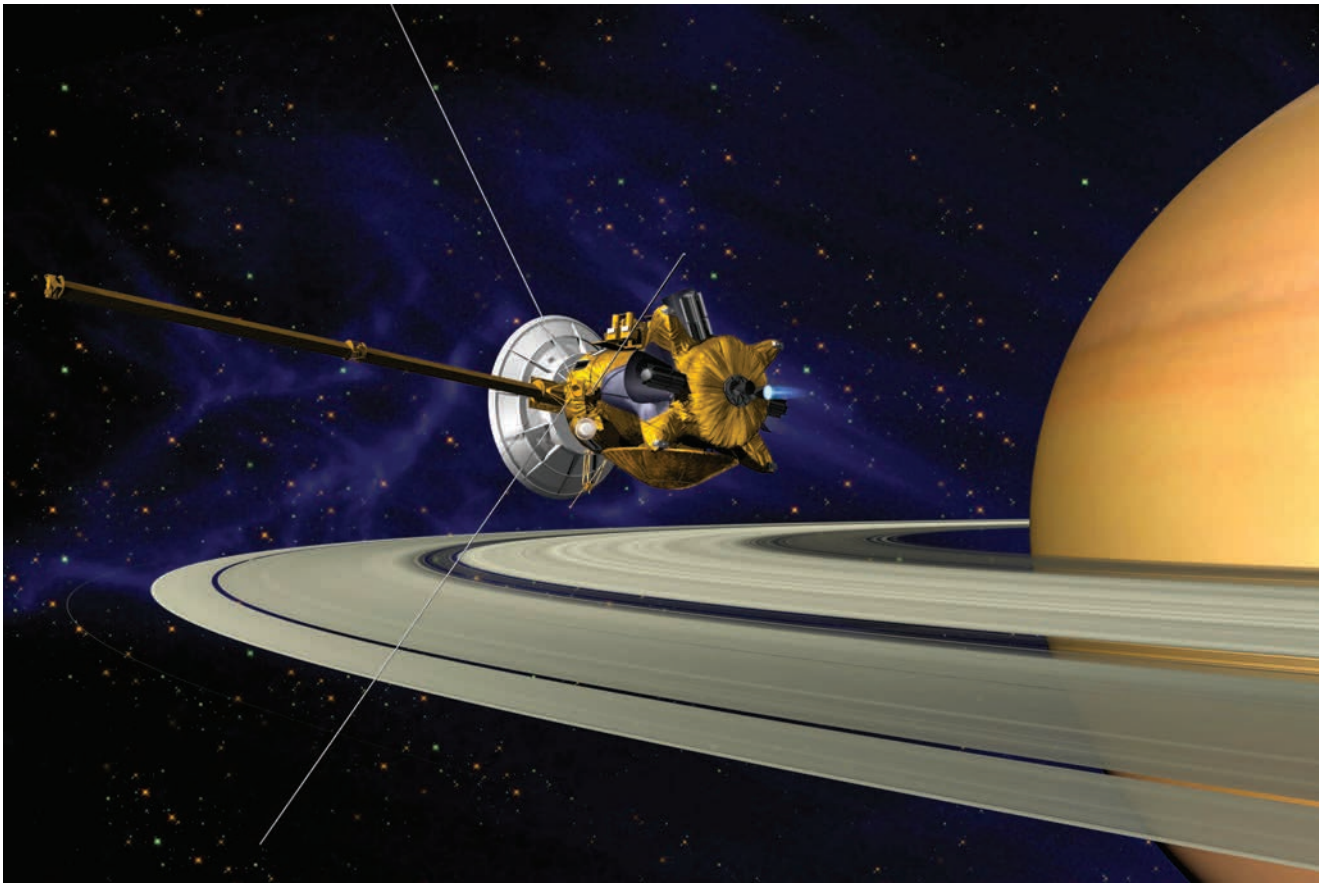


Figura 4 Nell'immagine, la sonda Cassini-Huygens lanciata il 15 ottobre 1997 con il compito di studiare il sistema di Saturno, comprese le sue lune e i suoi anelli. Questa missione interplanetaria è stata un progetto collaborativo che ha coinvolto tre agenzie spaziali NASA, ESA e ASI. (Crediti: NASA/JPL).

Figure 4 *In the image, the Cassini-Huygens probe launched on October 15, 1997 with the task of studying the Saturn system, including its moons and rings. This interplanetary mission was a collaborative project involving three space agencies: NASA, ESA and ASI. (Credits: NASA/JPL).*

L'importanza della ricerca

L'analisi e la comprensione approfondita del campo magnetico terrestre hanno giocato e giocano un ruolo fondamentale in questo campo di ricerca in quanto ci consentono di elaborare teorie e modelli essenziali per interpretare e comprendere i campi magnetici presenti nel nostro sistema solare e al di là di esso. In particolare, lo studio del campo magnetico terrestre portato avanti da anni anche all'interno dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia fornisce dati e conoscenze cruciali che possono essere applicate allo studio dei campi magnetici degli altri pianeti. Questo campo di ricerca in continua evoluzione apre nuove strade nella comprensione dei misteri nascosti degli ambienti spaziali e delle intricatissime relazioni tra i pianeti e il loro magnetismo. La ricerca continua sull'argomento non solo migliora la nostra conoscenza sulla diversità e sull'evoluzione dei pianeti, ma offre anche una preziosa **prospettiva sull'abitabilità** e sulla **potenziale presenza di vita** al di là della Terra.

Sitografia

[1] https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/La_sonda_Cassini-Huygens_in_orbita_attorno_al_pianeta_degli_anelli
[2] https://voyager.jpl.nasa.gov/
[3] https://science.nasa.gov/mission/galileo/
[4] https://science.nasa.gov/mission/juno/
[5] https://science.nasa.gov/mission/mars-global-surveyor/
[6] https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Italy/Cluster_una_flotta_di_satelliti_per_studiare_il_tempo_nello_spazio
[7] https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Themis

Danzando tra le stelle: lo spettacolo delle aurore

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Chi ha avuto la fortuna di assistere dal vivo alle *aurore polari* potrà dire quanto uniche e spettacolari siano. Ma quali sono i meccanismi principali alla base dell'apparizione e dei colori dell'aurora, magnifici nastri colorati che solcano il cielo notturno?

Il **Sole**. Sempre lui. Anche alla base di questo incredibile fenomeno c'è il fatto che la nostra stella è un corpo estremamente dinamico. Molti fenomeni interessanti a cui dà luogo sono da attribuire all'energia immagazzinata e liberata dalla sua atmosfera e all'interazione di questa energia con il campo magnetico e l'atmosfera del nostro pianeta.
Così può accadere che dalla parte più esterna dell'atmosfera solare, la *corona*, vengano espulse in grande quantità particelle cariche ad alta energia (principalmente protoni ed elettroni) proiettate nello spazio in tutte le direzioni, anche verso la Terra.

Cosa accade quando le particelle di origine solare si scontrano con il campo magnetico terrestre?

Il campo magnetico terrestre si può rappresentare come una grande bolla di forma allungata, idealmente simile alla forma di una cometa, che avvolge il nostro pianeta e che viene chiamata "magnetosfera".

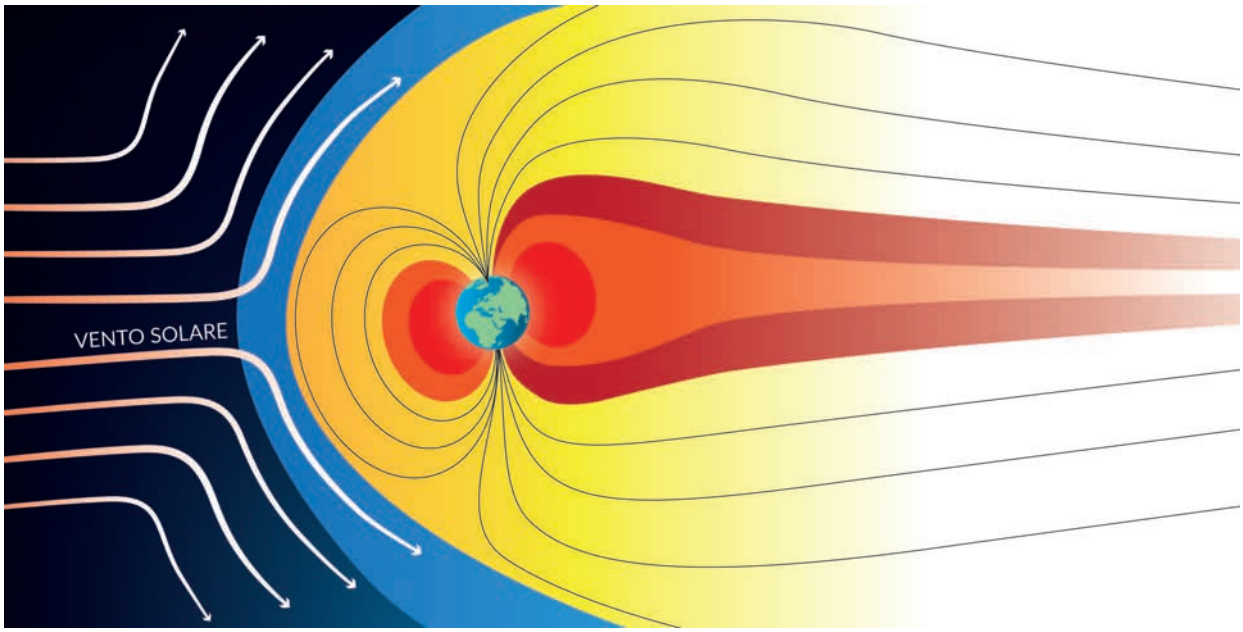


Figura 1 Il vento solare che incide sul campo magnetico terrestre. (Grafica di B. Angioni)
Figure 1 *The solar wind that flows around the Earth's magnetic field. (Graphics by B. Angioni)*

Questa bolla costituisce una vera e propria **barriera** che protegge il nostro pianeta come uno scudo protettivo, impedendo alle particelle di entrare e raggiungere l'atmosfera, facendole fluire

lungo la superficie della bolla come lungo dei binari. Tuttavia, alcune particelle riescono ad entrare nell'atmosfera terrestre in corrispondenza delle **regioni polari**, dove precipitando incontrano i gas presenti nell'atmosfera, per lo più l'**azoto** e l'**ossigeno**, che inizialmente sono nel loro stato "a riposo" o "fondamentale".

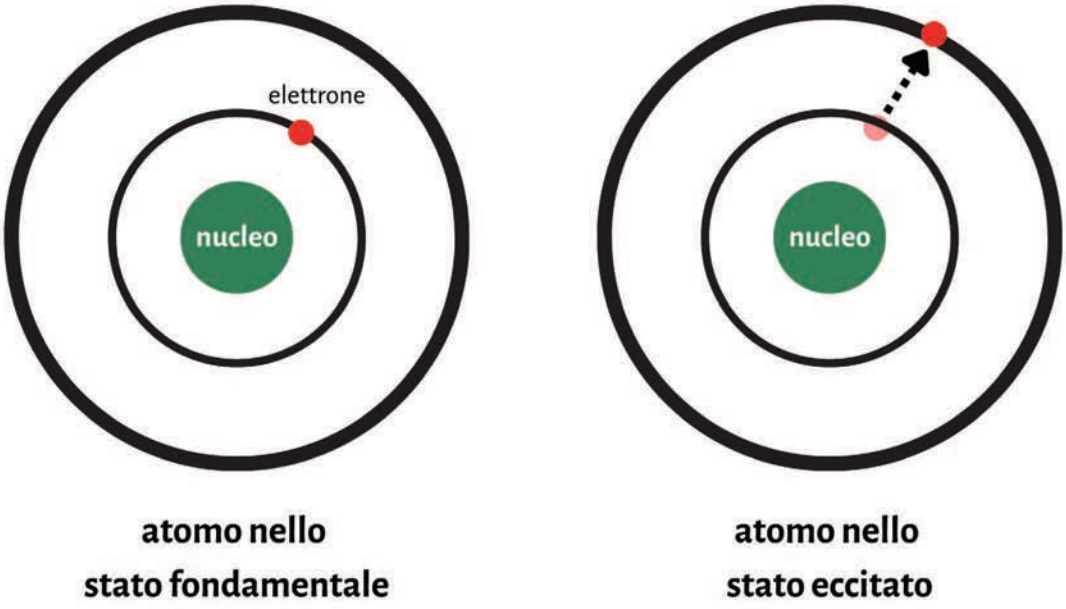


Figura 2 schema di eccitazione di un livello atomico. (Grafica L. Cafarella).
Figure 2 *scheme of the excitation of an atomic level. (Graphics by L. Cafarella).*

Questo incontro tra particelle solari e particelle dell'atmosfera terrestre dà vita a un meccanismo per il quale, se l'energia trasferita è sufficientemente elevata, porta gli atomi dell'atmosfera (inizialmente a riposo) ad eccitarsi, ad accendersi, rispetto allo stato fondamentale.Tuttavia questa nuova condizione di stato eccitato, ovvero a più alta energia, **non è stabile**, in quanto le particelle tendono a voler tornare nello stato fondamentale meno energetico. Per far ciò devono quindi liberarsi dell'eccesso di energia che hanno ricevuto. Lo fanno ad esempio attraverso l'emissione di **onde elettromagnetiche**, che nella parte dello spettro catturata dai nostri occhi, è comunemente chiamata "luce visibile".

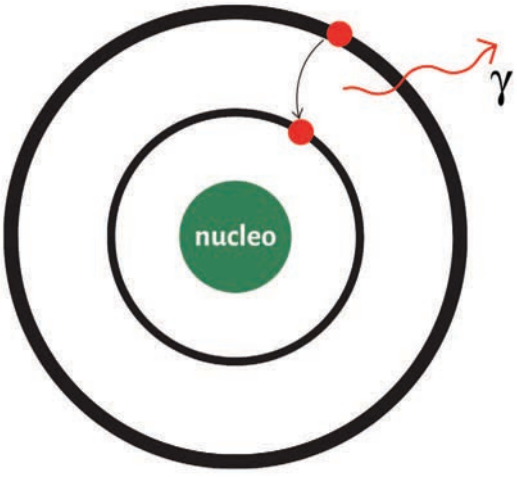


Figura 3 Ritorno allo stato stabile di un livello atomico eccitato tramite emissione di fotoni (Grafica L. Cafarella).
Figure 3 *Decay of an excited atomic level to its stable state through photon emission. (Graphics by L. Cafarella).*

Cosa definisce i colori dell'aurora?

Abbiamo visto come gli atomi eccitati dalle particelle solari emettano luce nel momento in cui tornano allo stato fondamentale. Naturalmente la luce emessa dipende da vari fattori, tra cui la tipologia dell'atomo eccitato. Ad esempio, l'**ossigeno** emette principalmente una luce nelle gradazioni del **verde-giallo**, mentre l'**azoto** irradia una luce nelle gradazioni del **rosso-viola**. E questo spiega perché le aurore polari si presentano solitamente in colori dalle tonalità del verde, giallo, rosso e viola. Quindi è questo è uno dei meccanismi che definisce i colori dell'aurora!



Figura 4 Aurora polare nei cieli dell'Europa del Nord. (Foto di Andrei Baskevich per Canva)
Figure 4 *Polar aurora above Northern Europe. (Photo by Andrei Baskevich, Canva archive)*

Altri fattori che definiscono i colori dell'aurora

Ci sono altri fattori importanti che determinano i colori dell'aurora come la **quota** a cui questi urti avvengono. Infatti, va ricordato che la composizione della nostra atmosfera **non è la stessa** allontanandoci dalla superficie terrestre. Pertanto, la miscela di atomi di azoto, ossigeno ed altre specie meno abbondanti (come, ad esempio, l'idrogeno e l'elio) varia via via che ci spostiamo in altezza. Sopra i **240 km** di quota le aurore sono generate principalmente da transizioni energetiche dell'azoto, che abbiamo detto dare origine a emissioni di luce color rosso quando investito di energia di origine solare.
A quote più basse, dai **160 km** circa, le aurore sono generate principalmente dalle transizioni energetiche dell'ossigeno, esibendo quindi principalmente un colore verde. Ancora più in basso, intorno ai **95 km** di quota, le aurore appariranno per lo più di colore **blu/viola**, e dominerà il blu più in basso e il viola più in alto di questa quota.

Altro fattore importante che determina il colore delle aurore è l'**energia delle particelle solari**. Una stessa specie, ad esempio l'ossigeno, può originare aurore di diversi colori se investita da particelle a più bassa o a più alta energia.



Figura 5 Immagine dell'aurora australe dalla Stazione Spaziale Internazionale. (Crediti: NASA)
Figure 5 *A picture of the Southern hemisphere aurora from the International Space Station. (Credits: NASA)*

Il mistero dell'arancione

Tuttavia non è sempre così semplice trovare una spiegazione ai colori dell'aurora. Recentemente per esempio sono state osservate in Canada delle aurore del tutto particolari, poiché esibivano un nastro centrale di uno spettacolare **colore arancione**. Eppure non dovrebbero in quanto nell'atmosfera terrestre non ci sono particelle che eccitandosi e poi rilassandosi emettono luce di quella specifica gradazione. Più precisamente, le molecole di azoto e gli ioni di azoto, nonché l'ossigeno molecolare, potrebbero in teoria produrre emissioni alle lunghezze d'onda corrispondenti al colore arancione. Tuttavia, tali emissioni dovrebbero essere molto più deboli di quelle associate ai colori tipicamente prodotti da quelle specie, sarebbero per questo motivo "nascoste".
Un'analisi più attenta delle aurore osservate potrebbe rivelare la **soluzione** all'arcano. Se aurore rosse appaiono a quote più alte e aurore verdi a quote più basse, la **sovrapposizione dei due colori** potrebbe aver prodotto le gradazioni arancioni-gialle osservate. Infatti, si possono originare aurore rosse a quote tra i 200 e i 400 km per via dell'eccitazione degli atomi di ossigeno da parte di elettroni a bassa energia, mentre si possono generare aurore verdi a quote più basse, tra i 100 e i 150 km, per via dell'eccitazione sempre degli atomi di ossigeno da parte di elettroni a più alta energia. Nel mezzo, quindi, potrebbero essere presenti entrambi i processi e risultare in una combinazione che i nostri occhi percepiscono come aurore arancioni.

Dove si possono osservare le aurore?

Le *aurore polari*, come suggerisce il nome, sono visibili tipicamente ad **alte latitudini**. Il motivo risiede nella forma che ha il campo magnetico terrestre. Infatti in zona polare il campo magnetico è più intenso. Qui è in grado di guidare più facilmente le particelle cariche giù nell'atmosfera, dove collideranno con le particelle che costituiscono l'alta atmosfera terrestre.
Quando l'evento solare all'origine delle aurore è particolarmente intenso, non è da escludere la possibilità di osservare aurore anche a **latitudini ben più basse**. È il caso, ad esempio, di due eventi tra i più intensi mai osservati e registrati sulla Terra. Si tratta dell'evento del **Marzo 1989** [1] che provocò un vasto blackout nella regione canadese del Québec e quella che è passata alla storia come **tempesta di Halloween** [2] a cavallo tra l'Ottobre e il Novembre del 2003. In entrambi i casi le aurore polari furono visibili anche a basse latitudini, nei cieli della Florida e di Cuba, nei cieli del Texas. Al riguardo, è possibile trovare ulteriori approfondimenti in [3].
L'agenzia americana *Space Weather Prediction Center* [4] fornisce previsioni a breve termine (tipicamente a 30 minuti) dell'occorrenza di aurore nei cieli polari terrestri, liberamente consultabili.

Quando si possono osservare le aurore?

Le aurore si verificano tipicamente **seguendo le variazioni dell'attività solare**. In prossimità dei periodi di massima attività del Sole le aurore sono più comuni. È infatti più probabile che in questo periodo si verifichino eventi intensi di espulsione di particelle energetiche dall'atmosfera della nostra stella. Al contempo, ciò non esclude del tutto la possibilità di osservarle anche in periodi di attività solare relativamente quieti. Inoltre, i periodi migliori per osservare le aurore sono **intorno agli equinozi di primavera e autunno**, dove seppure le ore di buio sono ridotte rispetto all'inverno, l'orientamento reciproco tra il campo magnetico terrestre e quello di origine solare è più favorevole ad un eventuale ingresso di particelle nell'atmosfera terrestre. Dopodiché in inverno la maggiore lunghezza della notte e la sua maggiore "oscurità" favoriscono la possibilità di contemplare aurore. Ovviamente si devono scegliere notti senza luna. Insomma, i migliori periodi per godersi lo spettacolo delle aurore sono da **fine agosto – primi giorni di settembre fino ai primi giorni di aprile**. Una grande opportunità per gli appassionati!

Si possono osservare aurore polari su altri pianeti del Sistema Solare?

Già le sonde *Pioneer* e *Voyager* negli anni '70 e '80 avevano dimostrato l'esistenza di aurore sui giganti gassosi di Giove, Saturno, Urano e Nettuno. Le osservazioni di *Pioneer Venus Orbiter* avevano mostrato poi le emissioni alle frequenze dell'ultravioletto dell'atmosfera notturna di Venere, a volte talmente intense da coprire l'intero emisfero. Altre scoperte emozionanti sono seguite all'avvento dell'era del telescopio spaziale *Hubble*. Ad esempio, **Ganimede**, la luna vulcanica di Giove, è sede di aurore di colore verde con processi generativi del tutto simili a quelli terrestri.

I colori dell'aurora su Marte, Venere e Giove…

Anche **Marte e Venere**, che non hanno un nucleo fuso fluido come la Terra e dunque non hanno un campo magnetico globale che li avvolge, mostrano aurore, seppur molto deboli. Al contrario, le aurore di **Giove** sono spettacolari per intensità (fino a 30 volte maggiore di quelle osservate

a Terra) e vastità (hanno un'estensione diverse volte le dimensioni della Terra). Giove, il più grande dei pianeti del Sistema Solare, è in grado di generare un campo magnetico circa 16 volte più intenso di quello della Terra. Le aurore su quel pianeta sono generate dalla compressione della magnetosfera ad opera del vento solare ad alta densità.

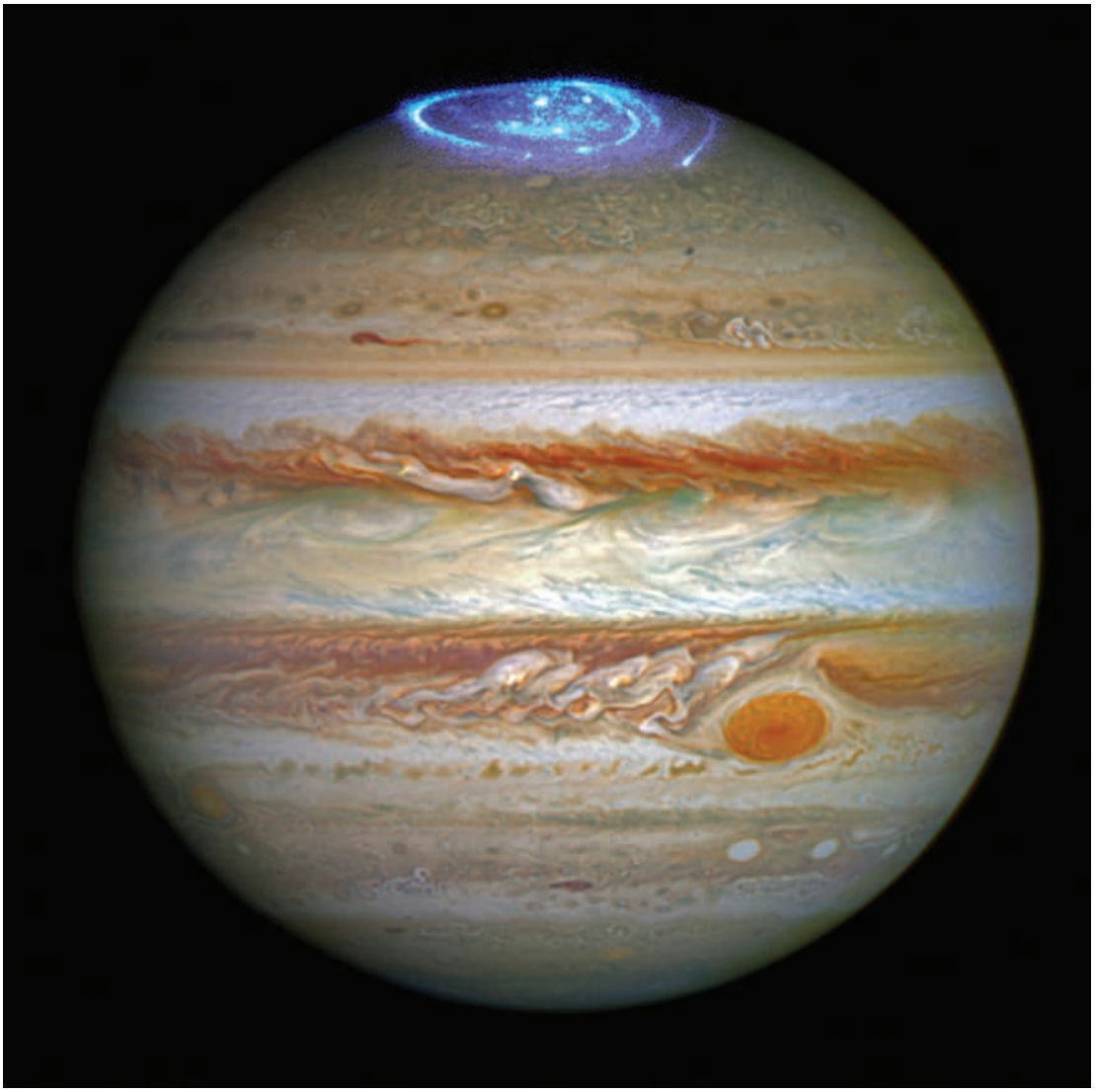


Figura 6 Immagine nella banda del lontano ultravioletto di un'aurora su Giove, ripresa dal telescopio spaziale Hubble. (Crediti: NASA).
***Figure 6** Picture in the far ultraviolet band of an aurora on Jupiter, taken by the Hubble space telescope. (Credits: NASA).*

… e su Saturno, Urano e Nettuno

E le aurore su **Saturno** non sono di certo meno spettacolari, e anche in questo caso avvengono secondo meccanismi simili a quelli che osserviamo sul nostro pianeta. Tuttavia, nel caso dei giganti gassosi, la maggior parte dell'energia è emessa alle frequenze infrarosse dello spettro elettromagnetico e in misura minore nel visibile, nei raggi X e alle frequenze radio. Per continuare, nell'atmosfera di **Urano** i gas più abbondanti sono idrogeno ed elio, e le aurore sono generate principalmente alle frequenze dell'ultravioletto e del radio nello spettro elettromagnetico, risultando dunque invisibili all'occhio umano. Infine, la complessa magnetosfera di **Nettuno** è tale da creare diverse regioni aurorali sparse nell'atmosfera del pianeta.

Pertanto, le aurore esistono e sono osservate (non solo nel visibile) anche sugli altri pianeti, ciascuno con le proprie peculiarità e caratteristiche.
Intanto, chi ha la fortuna di ammirarle dal vivo nei suoi colori multiformi se le gode qui, sul nostro piccolo, blu e accogliente patrimonio da preservare chiamato Terra.

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2023/03/13/la-grande-tempesta-magnetica-del-13-marzo-1989/
[2] https://ingvambiente.com/2018/10/31/le-tempeste-di-halloween/
[3] https://ingvambiente.com/2021/12/16/che-tempo-fa-nello-spazio/
[4] https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast

L'inquinamento luminoso dallo spazio

Dario Stelitano e Luca Merucci

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

I sensori a bordo dei satelliti spaziali dedicati all'osservazione della Terra offrono immagini sorprendenti e dettagliate dell'inquinamento luminoso del nostro pianeta. Un problema che non riguarda solo gli astronomi e gli astrofili, ma tocca il nostro benessere, gli equilibri ecologici, la nostra economia.

L'**Italia** è il Paese, tra i 20 più industrializzati, con il **più alto tasso di inquinamento luminoso**. Lo sappiamo dal 2016 quando, grazie al "New World Atlas of Artificial Night Sky Brightness" [Falchi et al., 2016] uscito sulla rivista scientifica Science Advances, è stata affrontata con una visione globale questa problematica.

Cos'è l'inquinamento luminoso?

L'inquinamento luminoso è prodotto dalle luci artificiali, soprattutto se usate, come accade spesso inconsapevolmente, in modo errato o sovradimensionato rispetto le necessità.
Cosa significa? Una lampadina deve emettere luce dove serve, ovvero illuminare verso il basso o, al più, non oltre la linea di orizzonte. Spesso invece, a causa di posizionamento o cattivo design, la luce viene dispersa in altre direzioni, anche verso il cielo. Per fare un paragone, è come se per lavarci i denti svuotassimo una piscina usando un tubo pieno di buchi. A noi arriverebbe sempre pochissima acqua, quella realmente necessaria, ma ne avremmo usata tanta, disperdendone molta di più lungo il percorso.
L'inquinamento luminoso, fino a qualche anno fa, era argomento di discussione solo all'interno delle comunità di astronomi e astrofili, i primi a sperimentare cosa significhi non poter lavorare sotto un cielo buio. **In questi anni lo studio dell'inquinamento luminoso ha trovato spazio in diversi settori.** Ci si sta accorgendo che non è più una questione rilevante solo per una ristretta comunità di persone.

I problemi legati all'illuminazione

Le implicazioni dovute al fatto di essere sottoposti ad un flusso luminoso costante giorno e notte riguardano molteplici ambiti, **che includono la salute dell'uomo** e l'impatto sull'ambiente circostante. La **componente blu della luce**, quella nello spettro elettromagnetico compresa tra 440 e 500 nanometri, **inibisce la produzione di melatonina**, un ormone prodotto dalla ghiandola pineale nel cervello e che influisce sul ciclo circadiano con cui il nostro corpo regola la sua funzionalità in base all'alternanza giorno/notte.
Anche in ambito naturale molte specie di animali sono influenzate dall'inquinamento luminoso, basti pensare a tutti i mammiferi e uccelli che usano le ore notturne per cacciare o alle tartarughe *Caretta Caretta*, molto sensibili alla presenza di fonti luminose nei pressi delle loro spiagge di nidificazione (per approfondire leggi Mazor et al. [2013]).



Figura 1 Liberazione di una tartaruga Caretta Caretta presso Brancaleone (RC) dopo le cure presso il centro di recupero www.crtmbrancaleone.it. (Foto di D. Stelitano).
Figure 1 *The release of a turtle Caretta Caretta near Brancaleone (RC) after treatment at the recovery center www.crtmbrancaleone.it. (Photo by D. Stelitano).*

E il cambiamento della tecnologia con cui illuminiamo i nostri ambienti non sta portando solo benefici: l'uso che si sta facendo delle **lampadine LED**, anche se più direzionali, paradossalmente **incrementa l'inquinamento luminoso**.
Ma come?! Ci dicevi che non dobbiamo puntare luci verso l'alto e adesso neanche i LED vanno bene?
I LED hanno una luce spettralmente molto selettiva e questo è il loro vantaggio in termini economici perché permette di raggiungere efficienze molto alte. Purtroppo, è anche uno svantaggio nel caso in cui si abbia a che fare con i cosiddetti "LED a luce fredda", quelli più comunemente venduti in commercio. La luce prodotta da questi LED ha una forte componente di radiazione alla lunghezza di 400-500 nm, la "luce blu", proprio quella della quale abbiamo già detto che i medici indicano quale soppressore della melatonina.
Ma la parte dello spettro visibile a lunghezza d'onda minore è anche quella che in atmosfera si diffonde maggiormente, a causa dello *scattering di Rayleigh*. È lo stesso principio in base al quale vediamo il cielo di colore blu, e che governa anche la diffusione delle emissioni dei LED a "luce fredda" nell'atmosfera.

La scelta del LED giusto

Basterebbe quindi usare dei LED a "luce calda"? Certamente avremmo un gran vantaggio in termini di inquinamento luminoso.

Un'altra azione che potremmo fare per combattere questo tipo di inquinamento è spegnere le luci quando non servono, sfruttando un altro grande vantaggio dei LED: il fatto di poterli accendere ed avere subito la massima intensità luminosa.
Oggi invece lasciamo le luci LED, ad esempio i lampioni, accesi tutta la notte anche se non c'è nessuno che si trovi a transitare in strada. Per tornare al paragone iniziale, è come se, finito di lavare i denti andassimo via lasciando il rubinetto dell'acqua aperto, aspettando che nostro fratello vada, tra magari mezz'ora o più.

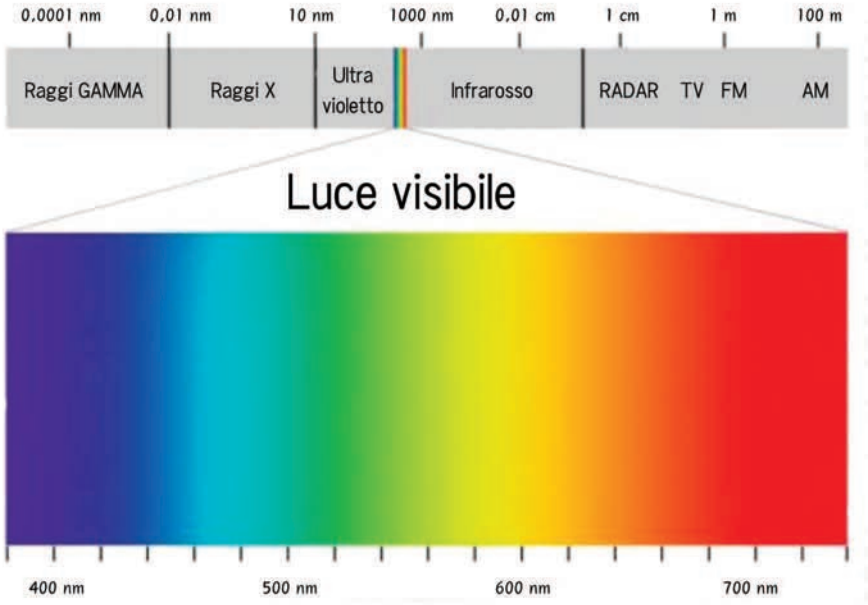


Figura 2 Lo spettro elettromagnetico con evidenziata la porzione della luce visibile.
La componente blu ha lunghezza d'onda tra i 400-450 nanometri.
(Crediti: adattato da Foto Sabatini Fotografia).
Figure 2 *The electromagnetic spectrum with highlighted portion of visible light.*
The blue component has a wavelength between 400-450 nanometers.
(Credits: Foto Sabatini Fotografia).

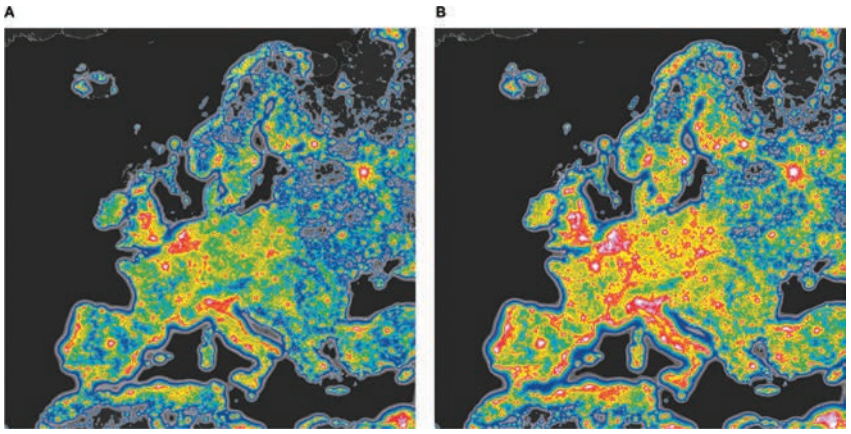


Figura 3 A sinistra l'attuale livello di inquinamento luminoso, a destra se sostituissimo tutte le luci attuali con luci LED a "luce fredda" 4000 K.
(Crediti: Falchi et al. [2016]).
Figure 3 *On the left the current level of light pollution, on the right if we replaced all the current lights with LED lights "cold light" 4000 K.*
(Credits: Falchi et al. [2016]).

Incuriositi dal capire se anche nei giorni difficili del **coronavirus,** nonostante il lockdown della maggior parte delle attività, si continuasse a sprecare luce e denaro illuminando male i nostri ricercatori della sede **INGV** di Roma hanno acquisito ed elaborato, tramite il nostro sistema di ricezione dei dati satellitari MAST (Multimission Acquisition SysTem, Stelitano et al. [2020; 2023]), le immagini del sensore VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite) a bordo dei satelliti americani NOAA-20 e Suomi NPP la notte tra il **23 e il 24 marzo 2020.**
In basso è riportata l'acquisizione di una immagine più recente, del 06 giugno 2024, notte di Luna nuova, e con un composite delle Day-Night Band, pur con la presenza di nubi in alcune parti del paese (alcune zone opache dell'immagine). Nonostante il sensore non sia sensibile a lunghezze d'onda minori di 400 nanometri, **è chiaramente visibile quanto ancora ci sia da fare per combattere l'inquinamento luminoso nel nostro Paese.**

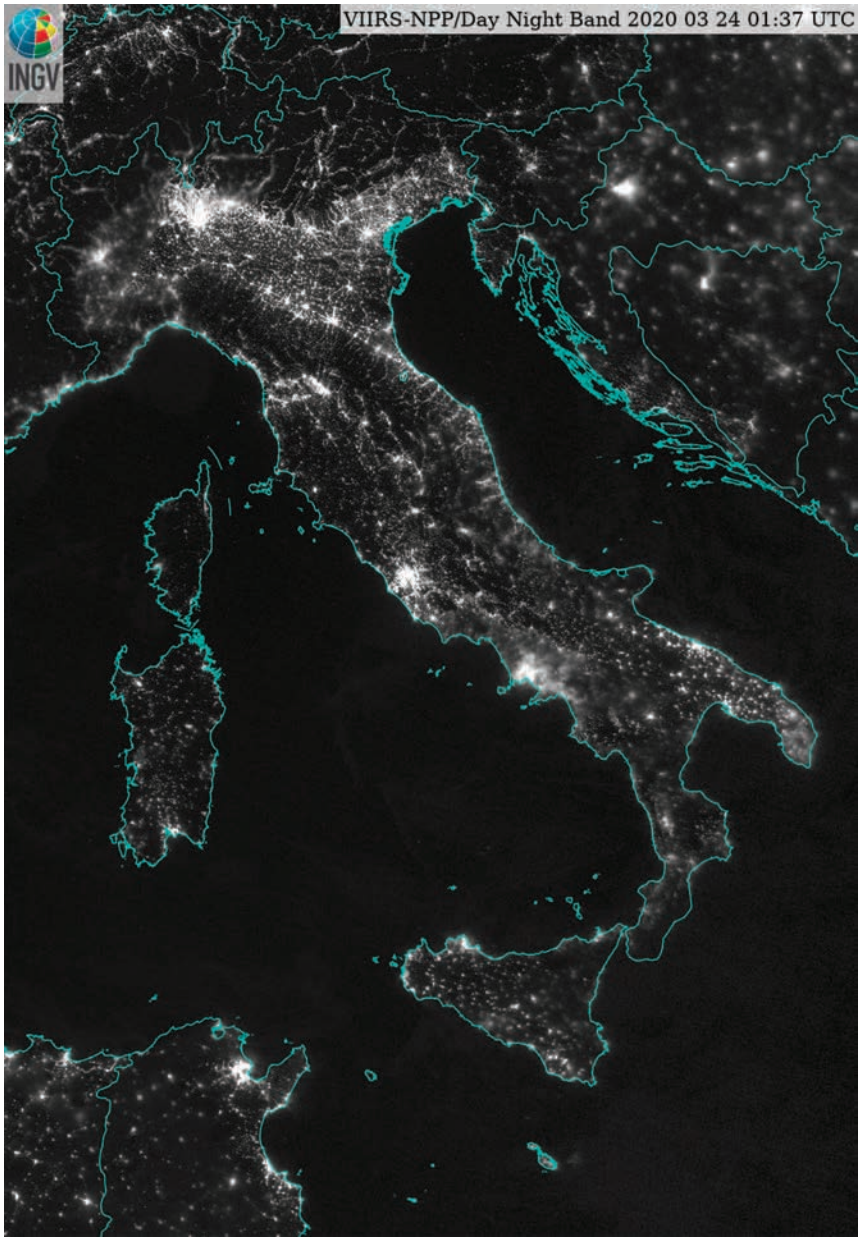


Figura 4 Histogram composite della Day-Night band del sensore VIIRS a bordo del satellite Suomi-NPP. Immagine acquisita la notte tra il 23 e il 24 marzo 2020.

Figure 4 *Histogram composite of Day-Night Band VIIRS sensor onboard Suomi-NPP satellite. Image acquired on 23 March 2020.*

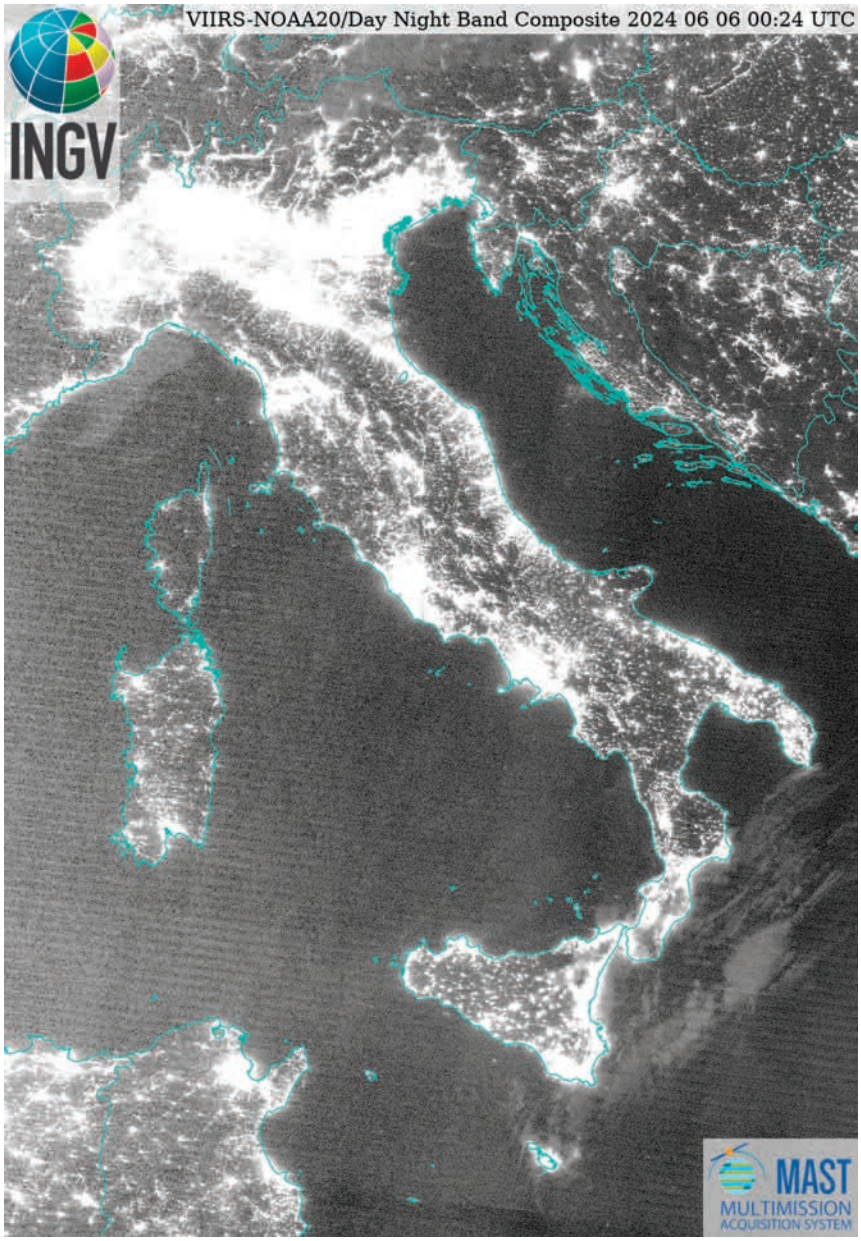


Figura 5 Composite della Day-Night band del sensore VIIRS a bordo del satellite NOAA-20. Immagine acquisita il 6 Giugno 2024.
***Figure 5** Composite of Day-Night Band VIIRS sensor onboard NOAA-20 satellite. Image acquired on 06 June 2024.*

Bibliografia

Falchi F., Cinzano P., Duriscoe D., Elvidge C., Bough K., Portnov B.A., Ribnikova N.A., Furgoni R., (2016). *The new world atlas of artificial night sky brightness*.Sci. 2(6), http://doi.org/10.1126/sciadv.1600377

Mazor T., Levin N., Possingham H.P., Levy Y., Rocchini D., Richardson A.J., Kark S., (2013). *Can satellite-based night lights be used for conservation? The case of nesting sea turtles in the Mediterranean*, Biological Conservation, 159, 63-72. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2012.11.004

Stelitano D., Corradini S., Merucci L., Guerrieri L., (2020). *Procedure automatiche per la rilevazione e la stima dei parametri delle nubi vulcaniche da satellite*. In: AA. VV., (2020). Progetto "Sale Operative Integrate e Reti di monitoraggio del futuro: l'INGV 2.0". Report finale. Editors: L. Margheriti, F. Cirillo, F. Guglielmino, M. Moretti. Misc. INGV, 57: 1186, https://doi.org/10.13127/misc/57/20

Stelitano D., Merucci L., Ficeli P., Zanolin F., (2023). *Satellite Acquisition System at INGV Rome headquarters*. Rapp. Tec. INGV, 470: 134, https://doi.org/10.13127/rpt/470

Stupefacenti scariche elettriche dalle nubi verso la ionosfera

Carlo Scotto

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

È noto che i fulmini, visti usualmente durante un temporale, sono scariche elettriche che avvengono fra il suolo, conduttivo, e le nuvole temporalesche cariche di elettricità. Meno noti sono i fulmini che si verificano nell'alta atmosfera, scoperti solo alla fine degli anni '80 del secolo scorso.

Il fulmine è un fenomeno atmosferico che consiste in un'enorme scarica elettrica tra due corpi carichi. Questo fenomeno si può originare tra una nuvola ed il suolo, tra due nuvole o all'interno di una stessa nuvola.
Esistono, però, scariche elettriche che invece di scoccare fra la nuvola ed il suolo, sono dirette verso l'alto, scoccando fra le nuvole e la ionosfera, quella zona dell'atmosfera che comincia a 50 km di quota e che è in grado di condurre correnti elettriche come la superficie terrestre.
Fu il famoso fisico scozzese **Charles Thomson Rees Wilson** a predire, nel 1920, l'esistenza di questi portentosi fenomeni della natura, detti *Transient Luminous Events* (TLE). La loro osservazione era stata sporadicamente riportata da piloti di aeroplani, ma la loro esistenza non venne considerata reale fino al 1989, quando ve ne fu la prima evidenza fotografica nel corso di una missione dello Space Shuttle. I TLE assumono varie forme e natura. Essi sono relativamente rari: capitano con una frequenza pari a circa l'1% di quella dei fulmini comuni. I TLE possono essere suddivisi in *sprite*, *jet* ed ELVES.

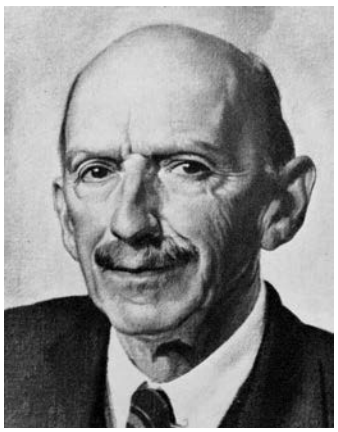


Figura 1 Charles Thomson Rees Wilson, premio Nobel per la fisica nel 1927, è stato il primo a predire l'esistenza di gigantesche scariche elettriche fra le nuvole temporalesche e la ionosfera. Il nome di Wilson è legato principalmente all'invenzione della camera a nebbia, strumento che consentì progressi importanti nel campo della fisica delle particelle elementari. (Crediti ritratto: Niels Bohr Library and Archives).
***Figure 1** Charles Thomson Rees Wilson, Nobel Prize winner for physics in 1927, was the first to predict the existence of gigantic electrical discharges between storm clouds and the ionosphere. Wilson's name is mainly linked to the invention of the cloud chamber, an instrument that allowed important progress in the field of elementary particle physics. (Portrait credits: Niels Bohr Library and Archives).*

Gli sprite

Gli *sprite* sono tra i più comuni: essi si presentano a grappoli e danno luogo a una vasta gamma di forme con colori fra il rosso-arancio ed il blu-verde. Gli *sprite* rossi appaiono nell'alta atmosfera, generalmente da 50 a 100 km di quota, al di sopra dei sistemi temporaleschi, con strutture contorte, che si estendono verso il basso, con forme simili ai tralci della vigna. Solitamente gli *sprite* sono associati a fulmini da nube a terra. Quando un fulmine colpisce il terreno trasferendovi una carica positiva, infatti, lascia l'apice della nuvola carico negativamente. Poi, se in questo apice si accumula abbastanza carica negativa, una scarica elettrica scocca verso la ionosfera sovrastante e dà luogo ad uno *sprite* rosso. È possibile vedere gli *sprite* rossi ad occhio nudo, ma speciali attrezzature video e fotografiche, abbinate a stazioni di osservazione in quota, aumentano la probabilità di osservare questi sfuggenti ed affascinanti bagliori scarlatti.

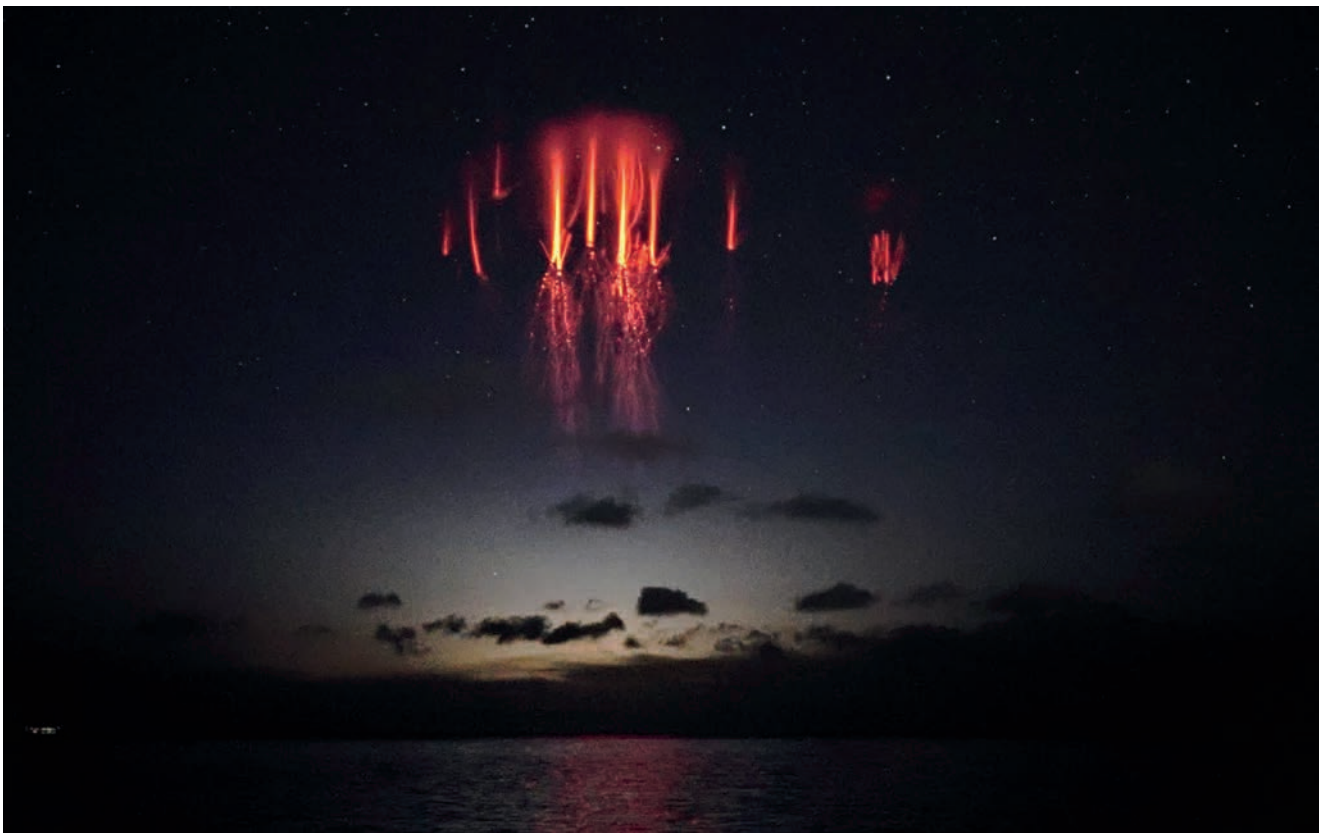


Figura 2 Una serie di sprite particolarmente luminosi osservati nel cielo sopra il Texas nell'aprile del 2024. (Foto di Paul M. Smith @PaulMSmithphoto).
***Figure 2** A series of particularly brightening sprites observed above Texas in April 2024. (Photo by Paul M. Smith @PaulMSmithphoto).*

I blue jet

A volte gli sprites vengono osservati subito dopo un particolare tipo di fulmine nube-ionosfera, detto *blue jet*. La prima osservazione di un *blue jet* risale al 21 ottobre 1989 quando venne ripreso in un video di un temporale dallo *Space Shuttle* in volo sopra l'Australia. I *blu jet* si verificano molto meno frequentemente degli *sprite*, tanto che, fino al 2007, ne erano state ottenute in totale meno di cento immagini. I *blu jet* si propagano verso l'alto, da sistemi temporaleschi attivi. Possono estendersi fino a 20 km sopra il vertice della nuvola temporalesca. I *blu jet* non sono necessariamente associati a un fulmine nuvola-terra. I ricercatori hanno osservato che i *blu jet* durano solo un decimo di secondo, cosa che li rende difficili da vedere ad occhio nudo. Sussistono ancora diverse incertezze riguardo ai loro meccanismi di formazione.

Gli ELVES

Gli ELVES (*Emission of Light and Very Low Frequency perturbations due to Electromagnetic Pulse Sources*) sono impulsi elettromagnetici generati da fulmini. Sembrano bagliori a forma di ciambella che si espandono lateralmente fino a 300 km di altitudine. La ricerca atmosferica indica che gli ELVES sono il tipo più diffuso di TLE nell'atmosfera.
Inaspettati fenomeni luminosi transienti vengono scoperti ogni anno e la ricerca in questo settore promette di scoprire sempre nuovi, sfuggenti, fantasmi luminosi che popolano l'atmosfera sopra la nostra testa.



Figura 3 "È stata un'esperienza incredibile quella che ho vissuto attraverso i miei occhi... giganteschi jet sono stati catturati solo una volta e questa notte ho avuto la fortuna di vederne sei". Così commentò il fotografo Jeff Miles il 28 marzo 2017, quando catturò l'immagine di questo blue jet nell'Australia occidentale. (Foto di CATER NEWS Agency).

Figure 3 *"It was an incredible experience that I lived through my eyes...gigantic jets have only been captured once and tonight I was lucky enough to see six of them." So commented photographer Jeff Miles on March 28, 2017, when he captured the image of this blue jet in Western Australia. (Photo by CATER NEWS Agency).*

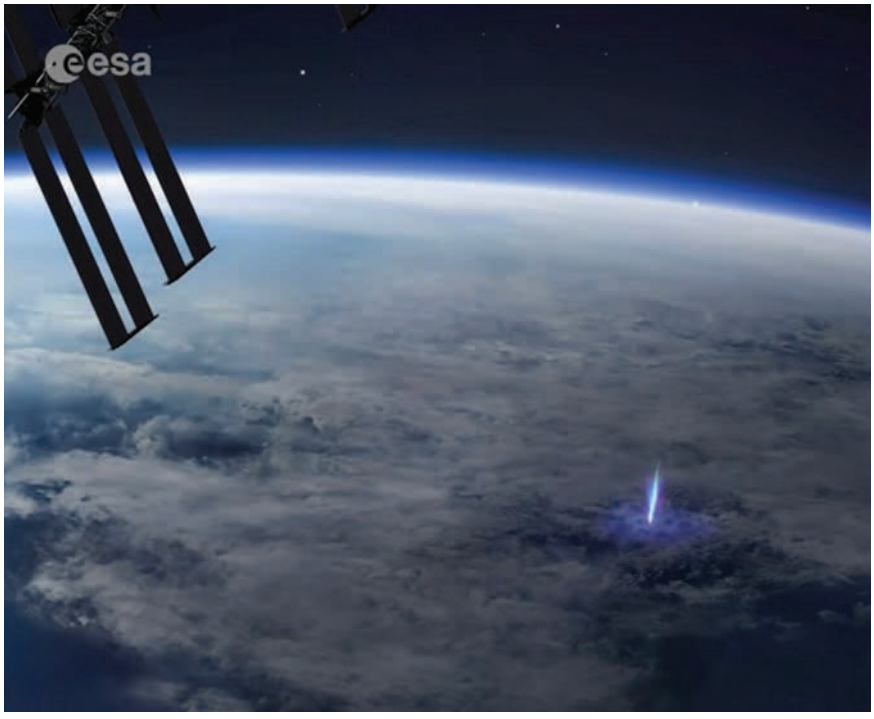


Figura 4 Un blue jet fotografato dalla Stazione Spaziale Internazionale. (Foto di European Space Agency DTU Space, Mount Visual, Daniel Schmelling).

Figure 4 *A blue jet photographed from the International Space Station. (Photo by European Space Agency DTU Space, Mount Visual, Daniel Schmelling).*

Onda su onda: la radio

Enrico Zuccheretti

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L'Assemblea Generale dell'ONU ha riconosciuto l'importanza della radio istituendo, nel 2012, il World Radio Day (WRD) con ricorrenza il giorno 13 febbraio.

La radio è ormai nelle nostre vite da oltre cento anni. Nonostante l'avvento di nuove tecnologie per la comunicazione essa ha ancora un ruolo di rilievo nella nostra società.
Anche L'Assemblea Generale dell'ONU (Organizzazione delle Nazioni Unite) ne ha riconosciuto l'importanza istituendo, nel 2012, il World Radio Day (WRD). Il 13 febbraio, con un tema diverso ogni anno, si celebra questo mezzo di comunicazione.

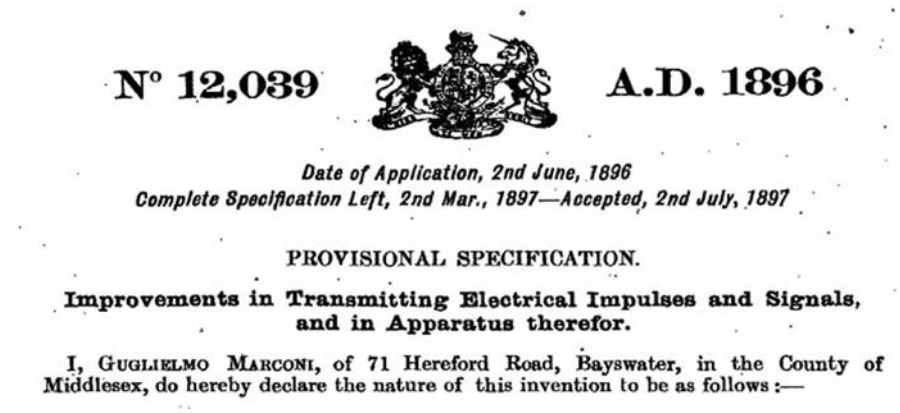
Ma perché proprio il 13 febbraio?

Perché il 13 febbraio del 1946 andò in onda la prima trasmissione radio ONU con il seguente messaggio vocale: "Qui, sono le Nazioni Unite che parlano ai popoli di tutto il mondo."
Nel 2011 anche la Conferenza Generale dell'UNESCO riconobbe l'importanza di quel primo messaggio e della radio come mezzo di unificazione dei popoli della Terra.
Gli obiettivi del WRD sono principalmente quelli di sensibilizzare il pubblico e i media sull'importanza della radio, nonché di incoraggiare i governi a stabilire e fornire l'accesso alle informazioni attraverso la radio, a migliorare il networking e la cooperazione internazionale tra le emittenti.
Ogni anno, in occasione del WRD, l'UNESCO offre alle stazioni radio materiale privo di copyright e suggerisce alcune idee che le stazioni radio potrebbero includere, nei loro palinsesti, seguendo i temi annuali decisi dal Comitato WRD.

Quando è nata la radio?

Come tutte le grandi intuizioni che hanno rivoluzionato la nostra vita anche quella della radio non è appannaggio di una sola persona. L'invenzione della radio è legata almeno a due nomi: l'italiano autodidatta Guglielmo Marconi e il fisico russo Aleksandr Stepanovič Popov. Entrambi, negli stessi anni, lavorarono, indipendentemente, alla realizzazione e messa a punto di un sistema in grado di inviare e ricevere segnali radio a distanza.
Il primo a costruire un ricevitore per captare le onde radio che circolano liberamente nell'aria è stato Popov, tra il 1895 e il 1896. Egli si era concentrato sulla propagazione delle onde radio derivanti da disturbi elettrici atmosferici ideando, a tale scopo, un dispositivo per rilevare temporali fino ad una distanza di 50 chilometri. Tale dispositivo era pensato per essere utilizzato anche per la ricezione di segnali da fonte artificiale.
Tuttavia si ritiene che il regime di stretta segretezza a cui Popov era vincolato, lavorando per la Marina russa, gli abbia impedito di divulgare i risultati dei suoi esperimenti e quindi di essere riconosciuto a livello internazionale come il primo vero inventore della radio.
Nel marzo 1896 Popov riuscì a trasmettere un breve messaggio Morse sulla distanza di 250 m.
Ma il 5 marzo 1896, anticipando l'esperimento di Popov di pochi giorni, Marconi presentò, in Inghilterra, la prima richiesta provvisoria di brevetto, con il numero 5028 e con il titolo "Miglioramenti nella telegrafia e relativi apparati".

Lettera di risposta alla presentazione di brevetto provvisorio: la domanda era stata accettata. Successivamente, il 2 giugno 1896, Marconi depositò all'Ufficio Brevetti di Londra una domanda definitiva per un sistema di telegrafia senza fili dal titolo "Perfezionamenti nella trasmissione degli impulsi e dei segnali elettrici e negli apparecchi relativi" ottenendo il brevetto il 2 luglio 1897 con il numero 12039.



N° 12,039 A.D. 1896

Date of Application, 2nd June, 1896
Complete Specification Left, 2nd Mar., 1897—Accepted, 2nd July, 1897

PROVISIONAL SPECIFICATION.

Improvements in Transmitting Electrical Impulses and Signals, and in Apparatus therefor.

I, GUGLIELMO MARCONI, of 71 Hereford Road, Bayswater, in the County of Middlesex, do hereby declare the nature of this invention to be as follows :—

Figura 1 Intestazione del brevetto rilasciato il 2 luglio 1897. (Courtesy of European Patent Office).
Figure 1 Heading of the patent issued on 2 July 1897. (Courtesy of European Patent Office).

È probabile che negli stessi anni vennero fatti progressi sull'argomento anche da altri scienziati come, ad esempio, Nikolas Tesla. Il geniale inventore serbo, naturalizzato americano, contende la paternità della radio a Marconi, almeno secondo i suoi sostenitori statunitensi. Sembra infatti che l'inventore italiano avesse usato molti dei brevetti di Tesla per realizzare il telegrafo senza fili da cui la radio direttamente discende.

La prima trasmissione transoceanica

Comunque sia andata, Marconi continuò a perfezionare i suoi apparati fino a che, il 12 dicembre 1901, riuscì a effettuare la prima trasmissione e ricezione di un segnale radio transoceanico. Il messaggio, i tre punti della lettera S del codice Morse, trasmesso da Poldhu, in Cornovaglia, Inghilterra, venne ricevuto sull'isola canadese di Terranova dove Marconi e i suoi assistenti Kemp e Paget erano in ascolto. Marconi valutò che per il successo della trasmissione fossero necessarie 2 antenne con diversa struttura. Il trasmettitore, a Poldhu, si avvalse di una antenna multifilare sorretta da quattro torri da 50 m l'una, mentre il ricevitore, a St. John di Terranova, era collegato ad un'antenna filare tenuta a circa 120 m dal suolo da un aquilone.
Pur alla luce degli evidenti successi, Marconi non cessò di sperimentare per rendere la sua invenzione sempre più affidabile e competitiva rispetto alla telegrafia tradizionale che, per diversi anni, continuò a essere preferita per rapidità e affidabilità. La telegrafia senza fili, tuttavia, trovò immediatamente notevoli applicazioni navali: è l'unico strumento che consente la comunicazione tra imbarcazioni tra loro e con stazioni a terra. L'utilità del radio soccorso in mare si dimostrò già il 23 gennaio del 1909 quando portò al salvataggio di 1700 passeggeri del transatlantico statunitense "Republic", speronato dal piroscafo italiano "Florida".
Nel 1912, inoltre, nell'affondamento del Titanic, per la prima volta, fu usato il messaggio SOS tramite il telegrafo senza fili.
Il 10 dicembre 1909 a Stoccolma Guglielmo Marconi fu il **primo italiano a ricevere il Premio Nobel per la fisica,** condiviso con il tedesco Karl Ferdinand Braun, con la seguente motivazione "in riconoscimento del loro contributo allo sviluppo della telegrafia senza fili".



Figura 2 Un viaggio di oltre 3000 km che segna una nuova era nelle telecomunicazioni!
(Immagine di E. Zuccheretti).
Figure 2 *A journey of over 3000 km that marks a new era in telecommunications!*
(Image by E. Zuccheretti).

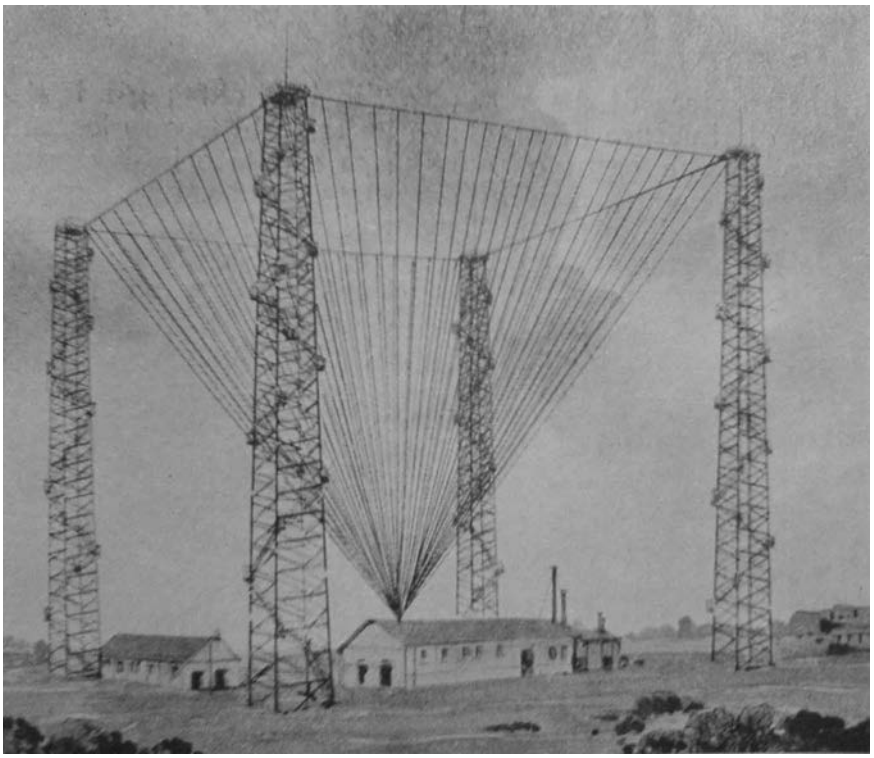


Figura 3 Ricostruzione pittorica dell'impianto di antenna presente a Poldhu. Affinché il segnale potesse coprire una distanza così grande, l'antenna che lo irradiava doveva essere molto più complessa e robusta, come si può vedere dall'immagine. (Courtesy of Marconi's Wireless Telegraph Company).
Figure 3 *Pictorial reconstruction of the antenna system present in Poldhu. To make the signal cover such a large distance, the emitting antenna had to be much more complex and robust, as can be seen from the image. (Courtesy of Marconi's Wireless Telegraph Company).*

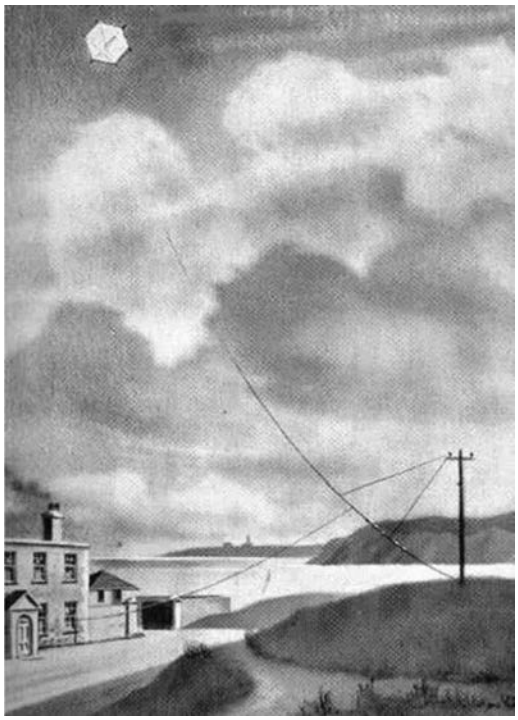


Figura 4 Disegno dell'antenna ricevente (Courtesy of Marconi's Wireless Telegraph Company). Per la ricezione del segnale Marconi valutò (correttamente) che un semplice filo, purché molto lungo, potesse bastare.
Figure 4 *Drawing of the receiving antenna (Courtesy of Marconi's Wireless Telegraph Company). To receive the signal, Marconi estimated (correctly) that a simple and very long wire could be enough.*

La catastrofe del dirigibile Italia di Umberto Nobile: perché i naufraghi non furono ascoltati?

Bruno Zolesi e Michael Pezzopane

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Una ricostruzione delle condizioni di radiopropagazione ionosferica dell'epoca dà una verosimile spiegazione della tardiva ricezione dell'SOS lanciato dai superstiti a seguito della catastrofe del Dirigibile Italia.

Il **25 maggio 1928** il **Dirigibile Italia**, dopo aver sorvolato il Polo Nord e sulla via del ritorno verso la base logistica a NyÅlesund, urtò e precipitò sulla banchisa Artica, in una zona a circa 100 km a nord-est delle isole Svalbard.
I superstiti avevano a disposizione una radio HF portatile, sbalzata anch'essa fuori dalla cabina durante l'incidente. Con questa tentarono di trasmettere ripetutamente un messaggio di soccorso. Ma l'SOS fu intercettato **solo dopo nove giorni dalla catastrofe**, il 3 giugno 1928, da un radioamatore russo vicino alla città di Arkangelesk, distante 1900 km dal luogo del disastro.



Figura 1 Foto originale d'epoca del dirigibile Italia in Artide. (Crediti: Maurizio Piazzai, Flick).
Figure 1 *Original picture of the Italia airship in the Arctic. (Credits: Maurizio Piazzai, Flickr).*

Un SOS caduto nel vuoto

A seguito del naufragio, 10 uomini guadagnarono la banchisa, tra cui lo stesso ufficiale della Regia Aeronautica **Umberto Nobile**, ideatore del dirigibile e al comando della spedizione. Dopo

l'impatto il dirigibile aveva ripreso il volo. Degli altri 6 uomini dell'equipaggio rimasti a bordo del dirigibile stesso non si ebbe più notizia.
I superstiti trovarono rifugio in quella che divenne poi famosa come la *Tenda Rossa*. Da qui tentarono, senza successo, di telegrafare richieste di soccorso alla nave Città di Milano della Regia Marina, ancorata poco distante a NyÅlesund, a circa 400 km. Ma nessuno rispose alla richiesta di aiuto. Come mai nessuno rispose all'SOS?
Uno studio dell'**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia** ricostruisce le condizioni della ionosfera all'epoca del naufragio, con il preciso intento di dare una risposta a questa domanda.

Una ionosfera disturbata

La **ionosfera**[1] è lo strato di atmosfera, compreso tra i 50 e i 1000 km di altezza, che condiziona significativamente la propagazione delle onde radio.
L'applicazione di moderni modelli fisico-matematici (*mapping ionosferico*) ha consentito ai ricercatori di ottenere, per quell'epoca, i valori della massima frequenza utilizzabile (MUF) per comunicare ad una determinata distanza, nonché una mappa della corrispondente **zona d'ombra**, ossia la regione all'interno della quale, per una determinata frequenza, non si può comunicare.
Questi dati, insieme all'analisi delle condizioni del campo geomagnetico dell'epoca, hanno permesso di determinare che la radio frequenza di **9.4 MHz** utilizzata dai sopravvissuti **non poteva essere ricevuta nella regione delle Isole Svalbard** dove si trovava la nave appoggio Città di Milano. A tale frequenza, infatti, le condizioni dello strato riflettente della ionosfera permettevano solo comunicazioni su distanze più lunghe. La località di Arkangelesk, trovandosi in una posizione geografica più idonea rispetto al luogo del disastro, poteva quindi ricevere i radio segnali trasmessi dai naufraghi, anche se di debole intensità.

Il salvataggio dei superstiti

Anche la comunicazione per onda di terra (un'onda che non si riflette per via ionosferica ma si propaga vicino alla superficie della Terra) tra la Tenda Rossa e la nave Città di Milano non funzionò. I motivi sono legati probabilmente al precario sistema di antenna messo su dai naufraghi e alla debole potenza erogata dall'apparecchiatura stessa. Il segnale inoltre probabilmente risultava molto attenuato a causa della presenza di montagne le cui altezze superano i 1000 m.
Ci vollero ben **48 giorni** prima che tutti i superstiti venissero salvati. Nove soccorritori persero nelle ricerche. Tra questi Roald **Amundsen**[2] disperso nel corso delle operazioni.

Le conseguenze del disastro

L'episodio scatenò tantissime polemiche, discussioni e controversie. Le ipotesi, le critiche e gli argomenti a sostegno sono state raccontate negli anni in memoriali, articoli di giornale, processi giudiziari e film. L'impatto della tragedia fu enorme, tanto che l'accaduto mise fine all'impiego dei dirigibili nelle operazioni militari italiane.
Il contributo dei ricercatori INGV sui motivi della mancata comunicazione, si inserisce in questa cornice per fornire un tassello aggiuntivo al quadro generale.

[1]https://ingvambiente.com/2018/06/07/cosa-ce-sopra-le-nuvole/
[2]https://ingvambiente.com/nascita-di-roald-amundsen/

La ricostruzione dello stato della ionosfera e delle condizioni che impedirono la comunicazione tra la Tenda Rossa e la nave appoggio Città di Milano, fa capire quello che con molta probabilità accadde in quei giorni.
Dopo 90 anni, finalmente è possibile dare una giustificazione scientifica allo sconforto vissuto dai superstiti per l'impossibilità di inviare alla nave Città di Milano la loro richiesta di soccorso.

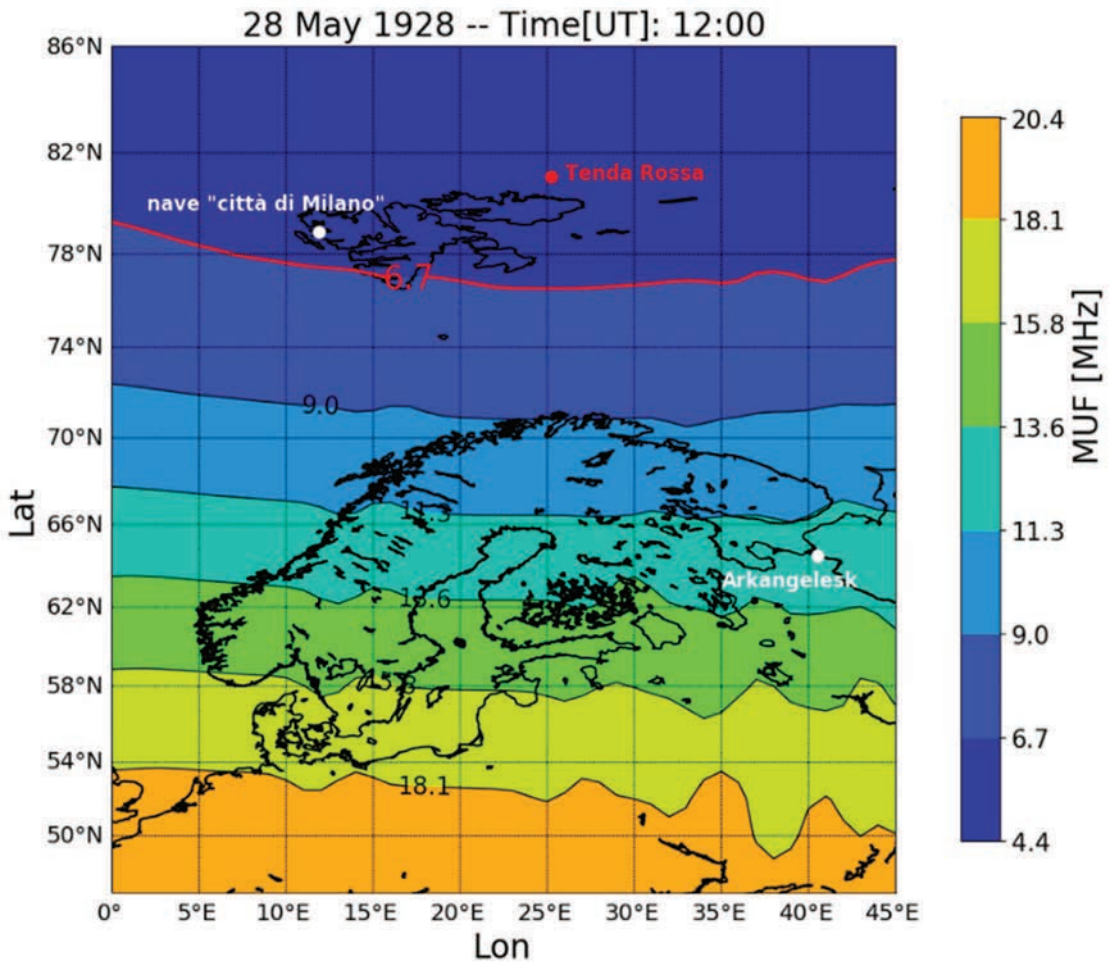


Figura 2 Isolinee della MUF e della corrispondente zona d'ombra calcolate per il 28 maggio 1928, al variare della radio frequenza trasmessa dal punto ove era situata la Tenda Rossa. La zona racchiusa dall'isolinea a 6.7 MHz (in rosso), che comprende le isole Svalbard, e quindi la nave Città di Milano, poteva essere raggiunta dalla Tenda Rossa solo con frequenze più basse di 6.7 MHz e quindi notevolmente più basse della frequenza di 9.4 MHz utilizzata dai naufraghi. Al contrario la città di Arkangelesk, che si trova ben oltre l'isolinea di 11.3 MHz, era in grado di ascoltare la richiesta di aiuto dei naufraghi. La mappa in figura si riferisce alle ore 12:00, per le altre ore del giorno la situazione è pressoché simile, e lo stesso vale anche per il mese di giugno 1928. (Crediti M. Pezzopane e B. Zolesi)

Figure 2 *Isolines of the MUF and the corresponding shadow zone calculated for 28 May 1928, as the radio frequency transmitted from the point where the Red Tent was located varied. The area enclosed by the 6.7 MHz isoline (in red), which includes the Svalbard islands, and therefore the Città di Milano ship, could be reached by the Red Tent only with frequencies lower than 6.7 MHz and therefore considerably lower than the frequency of 9.4 MHz used by the castaways. On the contrary, the city of Arkangelesk, which is located well beyond the 11.3 MHz isoline, was able to hear the shipwrecked people's call for help. The map in the figure refers to 12:00, for the other hours of the day the situation is almost similar, and the same also applies to the month of June 1928. (Credits M. Pezzopane e B. Zolesi)*



Figura 3 Copertina della "Domenica del Corriere" del 23 febbraio 1964 che rievoca il naufragio del dirigibile Italia.
Figure 3 *"Domenica del Corriere" cover from 23 february 1964, recalling the Italia shipwreck.*

Bibliografia

Sicolo C., (2017). *Le onde smarrite della Tenda Rossa*. Sandit SRL: Albino (Bergamo), Italy (in Italian), ISBN 978-88-6928-259-1

Zolesi B., Pezzopane M., Bianchi C., Meloni A., Cander L.R., Tozzi R. (2020). *The shipwreck of the airship "Dirigibile Italia" in the 1928 polar venture: A retrospective analysis of the ionospheric and geomagnetic conditions*. Space Weather, 18, e2020SW002459. https://doi.org/10.1029/2020SW002459

Ozono, il fragile guscio che circonda la Terra

Maria Di Nezza e Giovanni Muscari

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La salvaguardia dello "scudo naturale" della Terra dai raggi ultravioletti del Sole è ricordata il 16 settembre, Giornata Internazionale per la Preservazione dello Strato d'Ozono.

Il **16 settembre** di ogni anno è celebrata la **Giornata Internazionale per la Preservazione dello Strato d'Ozono**, istituita dall'Assemblea Generale delle Nazioni Unite nel 1994. È stata fissata in questa data per celebrare la firma del **Protocollo di Montreal**, ratificata da numerose nazioni, avvenuta nel 1987.

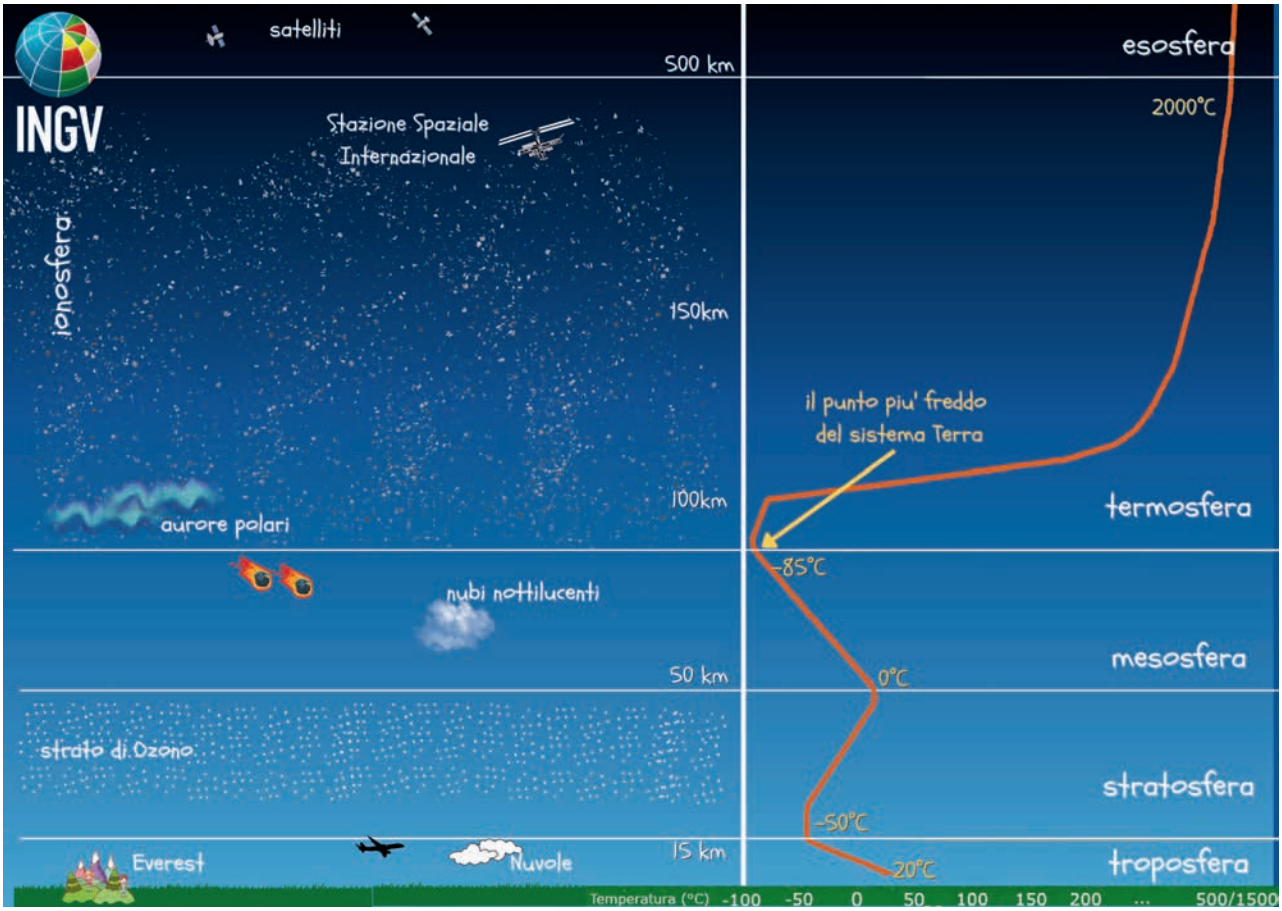


Figura 1 Gli strati dell'atmosfera terrestre. (Grafica di L. Cafarella)
***Figure 1** Layers of the Earth's atmosphere. (Graphics by L. Cafarella)*

Il protocollo è lo strumento operativo per ridurre l'utilizzo da parte dell'uomo di quelle sostanze chimiche che assottigliano lo strato di ozono stratosferico. Principalmente ricorda cosa è necessario fare per tutelare i suoi ecosistemi. Onorare il Protocollo di Montreal è l'esempio tangibile dell'impegno internazionale per la protezione del nostro ambiente.

Cos'è l'ozono?

L'ozono è un gas atmosferico capace di filtrare i raggi ultravioletti (UV) nocivi per l'uomo. È un vero e proprio "scudo naturale". La molecola, costituita da tre atomi di ossigeno (O_3), è concentrata in uno strato dell'atmosfera tra i 14 e 30 km di quota. Questo strato è fondamentale perché non permette il passaggio della parte più nociva della componente ultravioletta (UV) della radiazione solare. In particolare l'ozono stratosferico trattiene completamente le radiazioni UVC, il 95% di UVB e il 5% di UVA. Queste radiazioni sono dannose per cute ed occhi come riscontrato dall'**Organizzazione mondiale della sanità** (OMS). La formazione dello strato protettivo di ozono ha permesso inoltre lo sviluppo della vita sulla Terra.
Nella stratosfera le molecole di ozono assorbono radiazione UV e vengono scisse in una molecola di ossigeno (O_2) ed un atomo di ossigeno (O). Quest'ultimo urta contro una molecola di O_2 formando di nuovo una molecola di ozono. In questo modo l'alternarsi di creazione e distruzione continua di molecole di ozono garantisce che ci sia sempre uno strato di ozono stratosferico a difesa della vita sulla Terra.

La storia delle scoperte

Negli anni '70 del secolo scorso, la scoperta casuale che i clorofluorocarburi (CFC) fossero dannosi per l'ambiente fu fatta da Paul J. Crutzen, chimico olandese dell'Università di Oxford. Scoprì che il protossido di azoto (N_2O) prodotto dai batteri del suolo aveva la capacità di ridurre la concentrazione di ozono e ipotizzò che lo strato di ozono potesse essere messo in pericolo dall'emissione dello stesso composto da parte di aerei in grado di volare a quote stratosferiche. Crutzen coniò il termine "Antropocene" per descrivere l'era geologica influenzata dall'umanità.

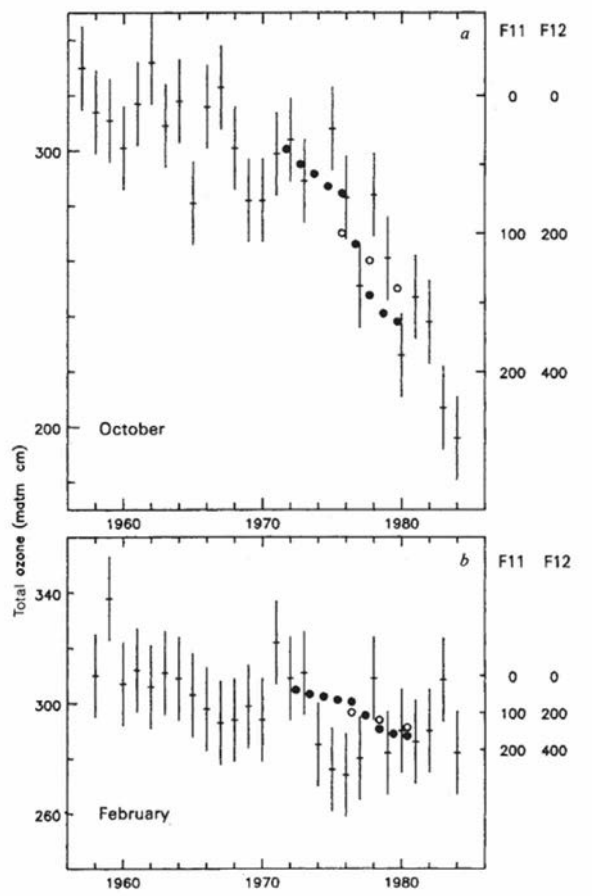


Figura 2 Diminuzione mensile della quantità totale di ozono (O_3) in Antartide, nella Baia di Halley e nell'Emisfero meridionale, di CFC-11 (parti per mille in volume di $CFCl_3$, pallino pieno) e CFC-12 (parti per mille in volume di CF_2Cl_2, pallino vuoto), nel periodo di ottobre 1957-84 (in alto) e febbraio 1958-84 (in basso), [Farman et al., 1985].
Figure 2 *Monthly means of total of ozone (O_3) decrease in Antarctica, at Halley Bay and Southern. Hemisphere, of F-11 (parts per thousand by volume of $CFCl_3$ or CFC, solid dot) and F-12 (parts per thousand by volume in volume of CF_2Cl_2, empty dot), in the period of October 1957-84 (top) and February 1958-84 (bottom), [Farman et al., 1985].*

Successivamente, il professor Frank Sherwood Rowland e il suo collaboratore Mario Molina, dell'Università della California, verificarono che i CFC rilasciavano atomi di cloro nella stratosfera, danneggiando la molecola di ozono.
Spiegarono il meccanismo di cattura da parte del cloro di uno dei tre atomi di ossigeno della molecola di ozono (O_3), causa dell'assottigliamento dello strato di ozono.
Nel 1995, per questa importante scoperta, Molina e Rowland insieme a Crutzen ricevettero il Premio Nobel per la Chimica "per il loro lavoro sulla chimica dell'atmosfera, in particolare riguardo alla formazione e la decomposizione dell'ozono".
A metà degli anni Ottanta del secolo scorso, per la prima volta, furono riscontrati i primi segnali di danneggiamento dello strato di ozono. Nella base antartica del British Antarctic Survey, nel 1985, Joseph Charles Farman scoprì una progressiva diminuzione della quantità totale di ozono in Antartide. Le misure registrate ogni mese di ottobre dal 1957 attestano un decremento rapido a partire dalla metà degli anni '70.
Oggi sappiamo che il buco dell'ozono è un fenomeno **stagionale**. Negli ultimi decenni si è verificato tutti gli anni a partire dal mese di agosto, quando il sole torna ad illuminare la regione antartica, e persiste fino approssimativamente ai primi di dicembre, mostrando un minimo nel contenuto di ozono in stratosfera nel mese di ottobre.
Veder comparire il buco dell'ozono anche al Polo Nord è invece un fenomeno più raro. Qui la perdita di ozono stratosferico è stata individuata per la prima volta nell'inverno del 1991-92. Tra gli episodi più recenti c'è quello dell'inverno del 2015-2016 e del 2010-2011. Nel marzo 2011 è registrata una perdita di ozono comparabile a quella del buco antartico (leggi un approfondimento, *Il buco dell'ozono e l'Artide*, [1]).

Da cosa è causato il "buco dell'ozono"

L'ozono stratosferico, oltre a essere coinvolto in dinamiche di creazione-distruzione nelle interazioni dell'ossigeno atomico e molecolare, viene distrutto anche quando reagisce con molecole che contengono azoto, idrogeno, cloro o bromo. L'immissione di CFC in atmosfera ad opera dell'uomo ha alzato la concentrazione di alcune di queste molecole causando lo straordinario assottigliamento dell'ozono stratosferico sopra l'Antartide.
I CFC sono degli idrocarburi nella cui struttura molecolare gli atomi di idrogeno sono sostituiti in parte o del tutto da atomi di cloro e fluoro. È proprio l'atomo libero di cloro che, entrando in circolo nella stratosfera, crea lo smembramento della molecola dell'ozono.
I CFC avevano una vasta gamma di applicazioni in ambito industriale. Erano utilizzati per nebulizzare i prodotti contenuti nelle bombolette spray come deodoranti e prodotti per la casa, come refrigeranti nei frigoriferi e negli impianti di climatizzazione o per gli estintori, per la realizzazione di materie plastiche in quanto stabili strutturalmente e dal punto di vista termico.

Decisione internazionale

La relazione tra attività umane e ripercussioni su scala globale dell'equilibrio dell'atmosfera è il primo segnale tangibile di un cambiamento climatico di origine antropica. La spiegazione scientifica di Molina e Rowland imponeva misure drastiche a livello mondiale per bandire l'utilizzo dei CFC. La consapevolezza dell'assottigliamento o addirittura della distruzione temporanea dello strato di ozono ha portato alla firma del Protocollo di Montréal il 16 settembre del 1987. Entrato in vigore nel 1989 il protocollo, firmato da 46 Paesi, imponeva la progressiva riduzione della produzione di CFC.
Nel 1989 gli Stati Uniti e l'Unione Europea dichiararono che avrebbero cessato la produzione

dei cinque più comuni CFC entro il 2000. La decisione fu condivisa a Londra nel 1990 da oltre 90 Paesi del mondo. Qui è stata sottoscritta la sospensione della produzione di gas CFC dopo che la scoperta del fenomeno cominciò ad apparire anche sopra il polo Nord. Tale accordo è stato raggiunto grazie anche alla costituzione di un fondo per sostenere la conversione dai CFC ad altri prodotti.
L'attuazione dell'accordo internazionale prevedeva di adottare misure drastiche per la riduzione globale della produzione e del consumo di sostanze che impoveriscono lo strato di ozono. L'obiettivo era però l'eliminazione totale di quelle sostanze sulla base degli sviluppi delle conoscenze scientifiche e delle informazioni tecnologiche.

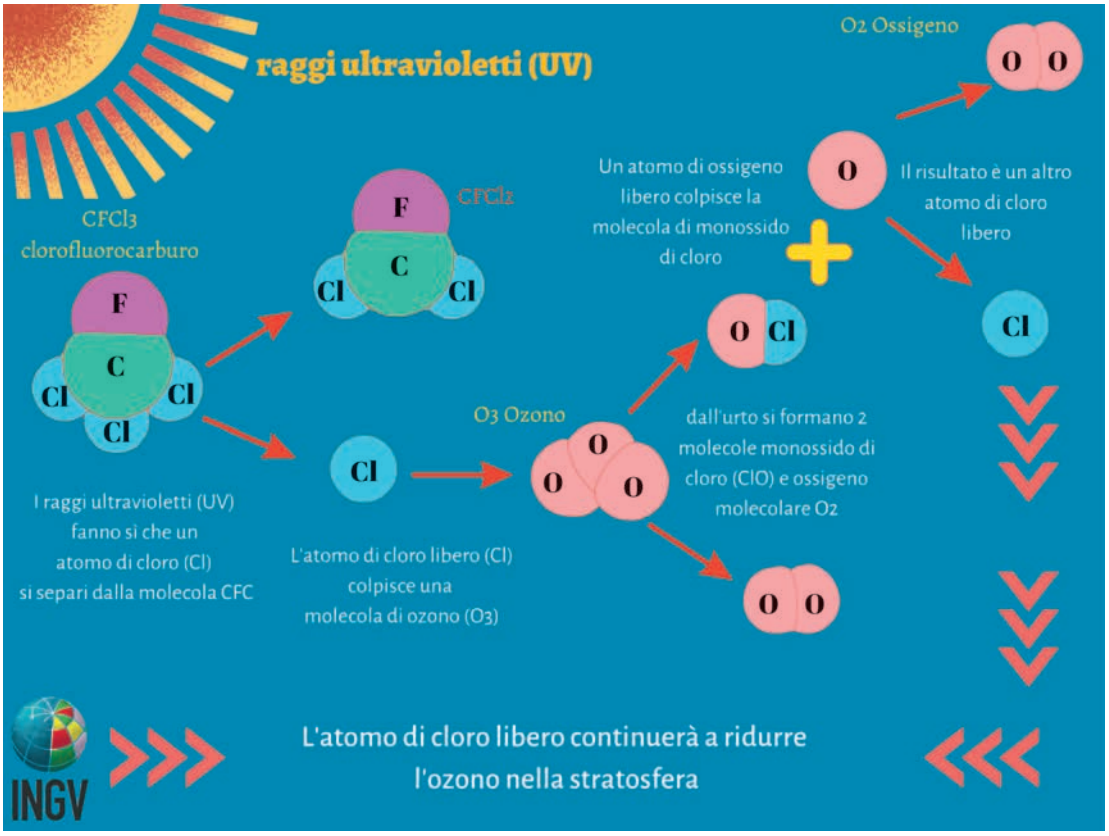


Figura 3 CFC gassosi possono ridurre lo strato di ozono quando salgono lentamente nella stratosfera, e divise da forti radiazioni ultraviolette, rilasciano atomi di cloro (Cl) e quindi reagiscono con le molecole di ozono (O_3). (Grafica di M. Di Nezza)
Figure 3 *Gaseous CFCs can deplete the ozone layer when they slowly rise into the stratosphere, are broken down by strong ultraviolet radiation, release chlorine atoms (Cl), and then react with ozone molecules (O_3). (Graphics by M. Di Nezza)*

Monitoraggio satellitare

Con il lancio in orbita dei satelliti artificiali intorno alla Terra si iniziò ad avere informazioni più dettagliate sulle variazioni a scala globale dello strato di ozono stratosferico.
L'Agenzia Spaziale Europea (ESA), come il National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), monitora i cambiamenti dello strato di ozono su scala globale utilizzando i dati della costellazione satellitare Copernicus con Sentinel-5P. Dal 1995 grazie al Global Ozone Monitoring Experiment–2 (GOME-2) è possibile ottenere serie temporali europee. GOME-2 è uno spettrometro ottico che permette di ottenere un quadro dettagliato del contenuto atmosferico totale di ozono e del profilo verticale dell'ozono nell'atmosfera.

La missione Atmospheric Limb Tracker for Investigation of the Upcoming Stratosphere (ALTIUS), il cui lancio è previsto nel 2026, fornirà contenuti di azoto ed altri gas in traccia nell'alta atmosfera. Questa missione utilizzerà spettrometri ad alta risoluzione per previsioni meteorologiche e monitorare le tendenze a lungo termine.

Prospettive future

Secondo le ultime valutazioni scientifiche presentate all'ONU, grazie alle misure adottate in seguito alla firma del Protocollo di Montreal, il buco dell'ozono si starebbe riducendo.
Ad affermarlo lo scienziato Paul A. Newman che, alla guida di un team di 300 scienziati, ha recentemente pubblicato il rapporto condotto dal Programma delle Nazioni Unite per l'ambiente (UNEP) e l'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM), con la partecipazione della NASA, della Commissione europea e del National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).
Se le misure adottate dai diversi Paesi saranno mantenute in vigore, come da Protocollo di Montreal, entro il 2066 lo strato di ozono sopra l'Antartide si sarà completamente riformato, tornando ai livelli pre-1980, entro il 2045 sopra l'Artico e nel 2040 per il resto del mondo.

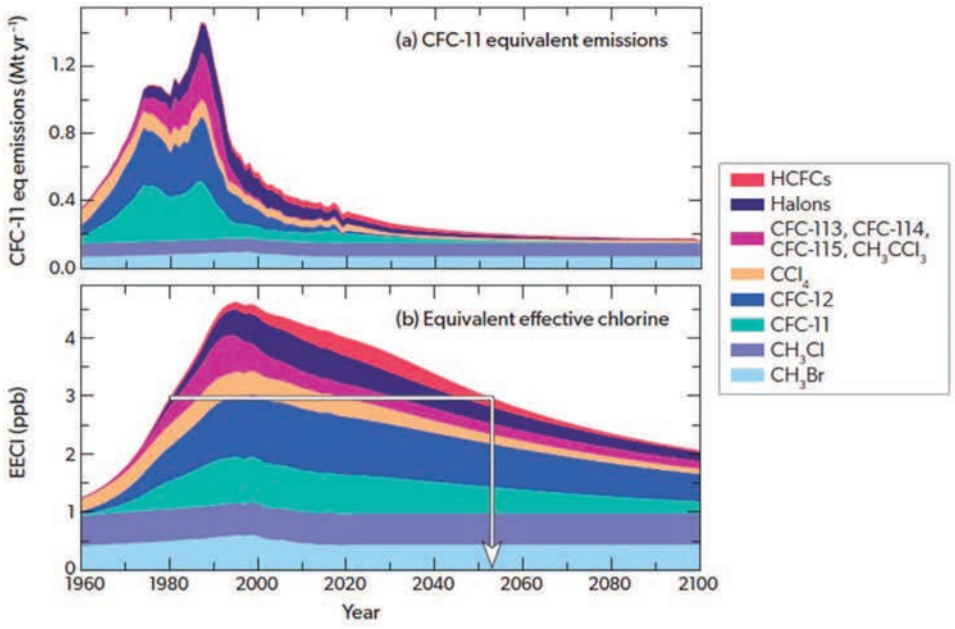


Figura 4 Variazione dello strato di ozono (O_3) misurato e predetto a scala globale nella zona Antartica in base all'immissione di CFC nell'atmosfera (a). L'attuazione del Protocollo di Montreal ha consentito, dal 1986 al 2016, di ridurre di oltre il 98 per cento la produzione e il consumo di CFC e quindi le emissioni nell'atmosfera. (Rapporto UNEP e OMM consultabile [2])

Figure 4 *Change in the ozone layer (O3) measured and predicted on a global scale in the Antarctic area based on the release of CFCs into the atmosphere (a). The implementation of the Montreal Protocol made it possible, from 1986 to 2016, to reduce the production and consumption of CFCs and therefore emissions into the atmosphere by more than 98 percent. (UNEP and WMO report available [2])*

Tuttavia, ha precisato il direttore esecutivo di Unep, Achim Steiner, esistono enormi sfide ancora in atto e il successo del Protocollo di Montreal dovrebbe incoraggiare ulteriori azioni non solo sulla protezione dell'ozono ma anche sul clima. Il Protocollo di Montreal è un esempio di eccezionale cooperazione internazionale, probabilmente l'accordo di maggior successo tra Nazioni, come ha ricordato Kofi Annan, ex segretario dell'ONU.

L'impegno INGV

Dal 2009 personale dell'INGV raccoglie dati circa la distruzione dell'ozono stratosferico. Le misure vengono eseguite presso la base aerea americana di Thule (adesso rinominata Pituffik Space Base), in Groenlandia (76.5°N 68.8°O). L'osservatorio Thule High Arctic Atmospheric Observatory [3] dedicato a studi atmosferici, è gestito in collaborazione con ENEA, Sapienza Università di Roma, Università di Firenze e con gli enti americani NCAR e NSF.



Figura 5 La base aerea americana di Thule, Pituffik Space Base, in Groenlandia. (Foto di G. Muscari)
Figure 5 *The American Thule air base, Pituffik Space Base, in Greenland. (Photo by G. Muscari)*

Bibliografia

Farman J.C., Gardiner B.G., Shanklin J.D., (1985). *Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction*, Nature, 315, 207–210. https://doi.org/10.1038/315207a0

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2020/03/20/il-buco-dellozono-e-lartide/
[2] https://ozone.unep.org/system/files/documents/Scientific-Assessment-of-Ozone-Depletion-2022-Executive-Summary.pdf
[3] https://www.thuleatmos-it.it/

Perché mantenere il riscaldamento globale sotto 1.5°C

Ingrid Hunstad

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L'Accordo di Parigi del 2015 ha come obiettivo quello di mantenere l'innalzamento della temperatura media globale del nostro pianeta sotto i 2°C. In particolare, ha lo scopo di guidare gli sforzi per limitare il riscaldamento globale sotto 1.5°C rispetto ai livelli preindustriali. Sembrano valori di temperatura di piccola entità, eppure realizzare l'obiettivo significa limitare i rischi e gli effetti dei cambiamenti climatici.

Il dato di fatto secondo cui molti ghiacciai stanno fondendo a ritmi che non hanno precedenti è noto a tutti. Nonostante questo, soprattutto al di fuori della comunità scientifica, c'è ancora chi preferisce negare l'evidenza. Ne è un esempio il fatto che non tutte le Nazioni hanno adottato l'accordo di Parigi [1] del dicembre 2015, il cui obiettivo centrale include il proseguimento degli sforzi per mantenere il riscaldamento globale sotto 1.5°C. Per questo motivo è doveroso, soprattutto da parte degli scienziati, confermare instancabilmente sulla base di dati, che il cambiamento climatico esiste e rappresenta una minaccia urgente e potenzialmente irreversibile per le società umane e le specie viventi di questo pianeta.

In particolare, grande attenzione deve essere rivolta alla **fusione dei ghiacci.** Le parti ghiacciate del pianeta (la **criosfera**) infatti hanno un ruolo fondamentale nel regolare il clima. Questa enorme massa di ghiaccio regola il bilancio termico della Terra e gran parte della circolazione oceanica. Influenza il clima di tutta la Terra grazie al candore della superficie che riflette quasi completamente i raggi solari verso lo spazio (albedo > 80 %) con un trascurabile apporto di calore.

I segnali di cambiamento della criosfera

La criosfera è costituita dalle regioni sulla superficie della Terra dove l'acqua si presenta in forma solida (ghiaccio marino e di acqua dolce, manto nevoso, permafrost). I suoi cambiamenti influenzano la vita di milioni di persone e di molti ecosistemi direttamente e indirettamente. La neve stagionale e quella perenne coprono circa 45 milioni di kmq. I ghiacciai e le calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide coprono 15 milioni di kmq. **Insieme coprono circa il 40% della superficie terrestre**.

Una delle conseguenze del riscaldamento globale che viene osservato è quello che gli scienziati chiamano "**amplificazione artica**" [3]. Questo significa che l'Artico sta cambiando più velocemente di qualsiasi altra regione del pianeta. Il rapido declino osservato nell'estensione del ghiaccio marino è parte integrante dei processi che portano all'amplificazione artica e a dare origine al ben noto feedback dell'albedo del ghiaccio marino. Man mano che il ghiaccio marino si ritira, l'oceano, che è scuro, è sempre più esposto provocando un maggiore assorbimento della radiazione solare incidente e accelerando il riscaldamento.
Il fenomeno è ben visibile nella Figura 2 in cui vengono riportate le temperature misurate nel 2023 e confrontate con le misure del periodo 1991-2020. Come è evidente le regioni soggette ad un riscaldamento maggiore rispetto ad ogni altra parte del pianeta sono proprio quelle che contengono la maggiore quantità di ghiaccio.

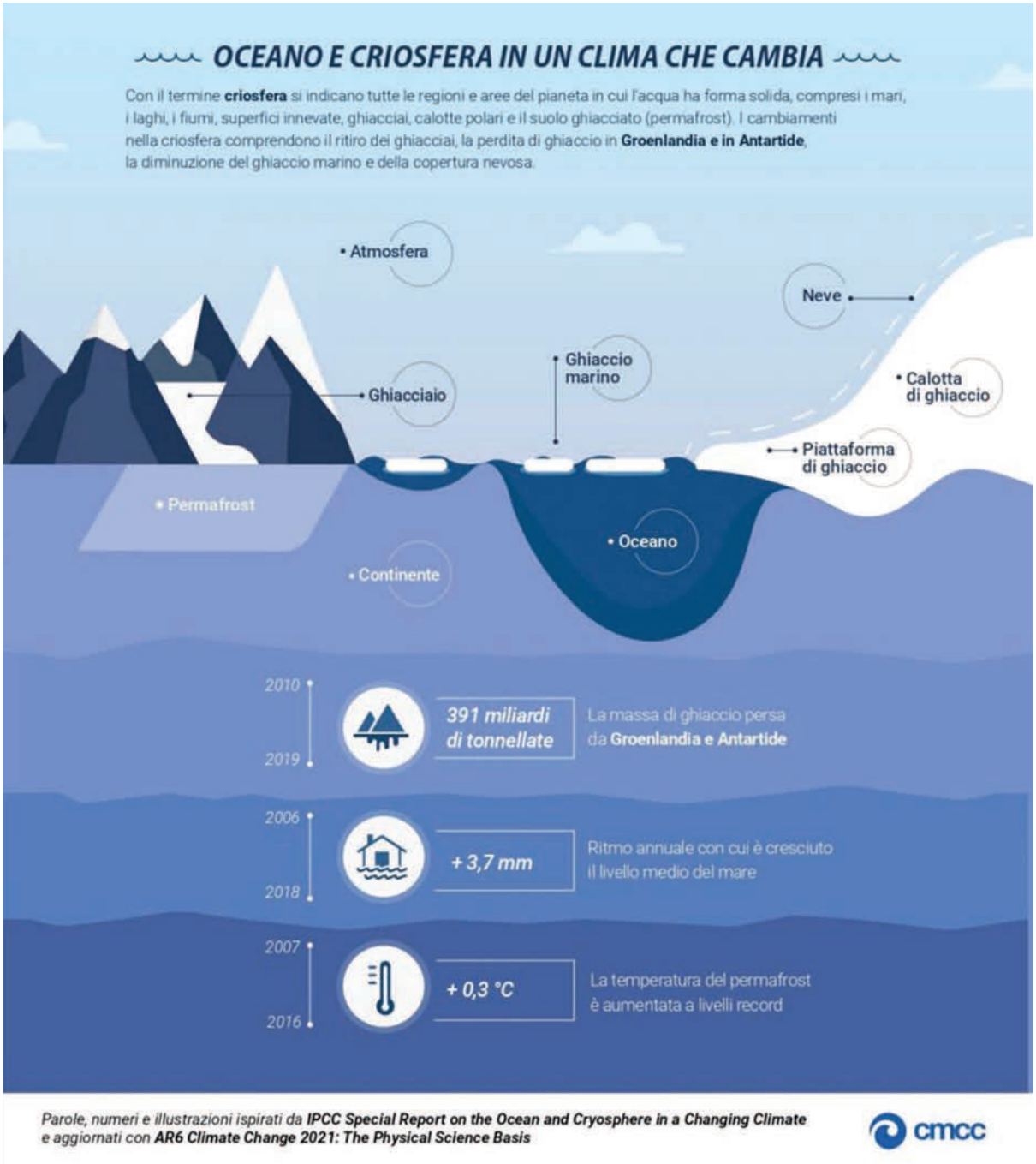


Figura 1 Oceano e Criosfera in un clima che cambia. (Crediti: IPCC Special Report [2])
Figure 1 *Ocean and Cryosphere in a changing climate. (Credits: IPCC Special Report* [2])

Il livello del mare aumenta

La fusione dei ghiacciai e delle due calotte glaciali in Groenlandia e in Antartide **contribuisce per più della metà** all'innalzamento del livello marino attualmente misurato.
L'altra metà è causata **dall'espansione termica** perché l'oceano, come tutti i fluidi, scaldandosi si espande. Questo fenomeno rappresenta un problema per tutte le persone che risiedono lungo le coste **anche se vivono molto lontano dall'Artico**. È quindi un problema che riguarda tutti.
L'**International Panel on Climate Change** [5] (IPCC) è il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici. Le stime dell'IPCC sull'innalzamento del livello medio del mare affermano che **questo aumenterà di circa 1 metro entro il 2100.** Questo nell'ipotesi secondo cui l'umanità continui ad emettere gas a effetto serra ai ritmi attuali.

Per capire la portata del problema, se la calotta glaciale Antartica fondesse completamente l'oceano si innalzerebbe di circa 60 m, mandando sotto l'acqua le città costiere di tutto il pianeta.

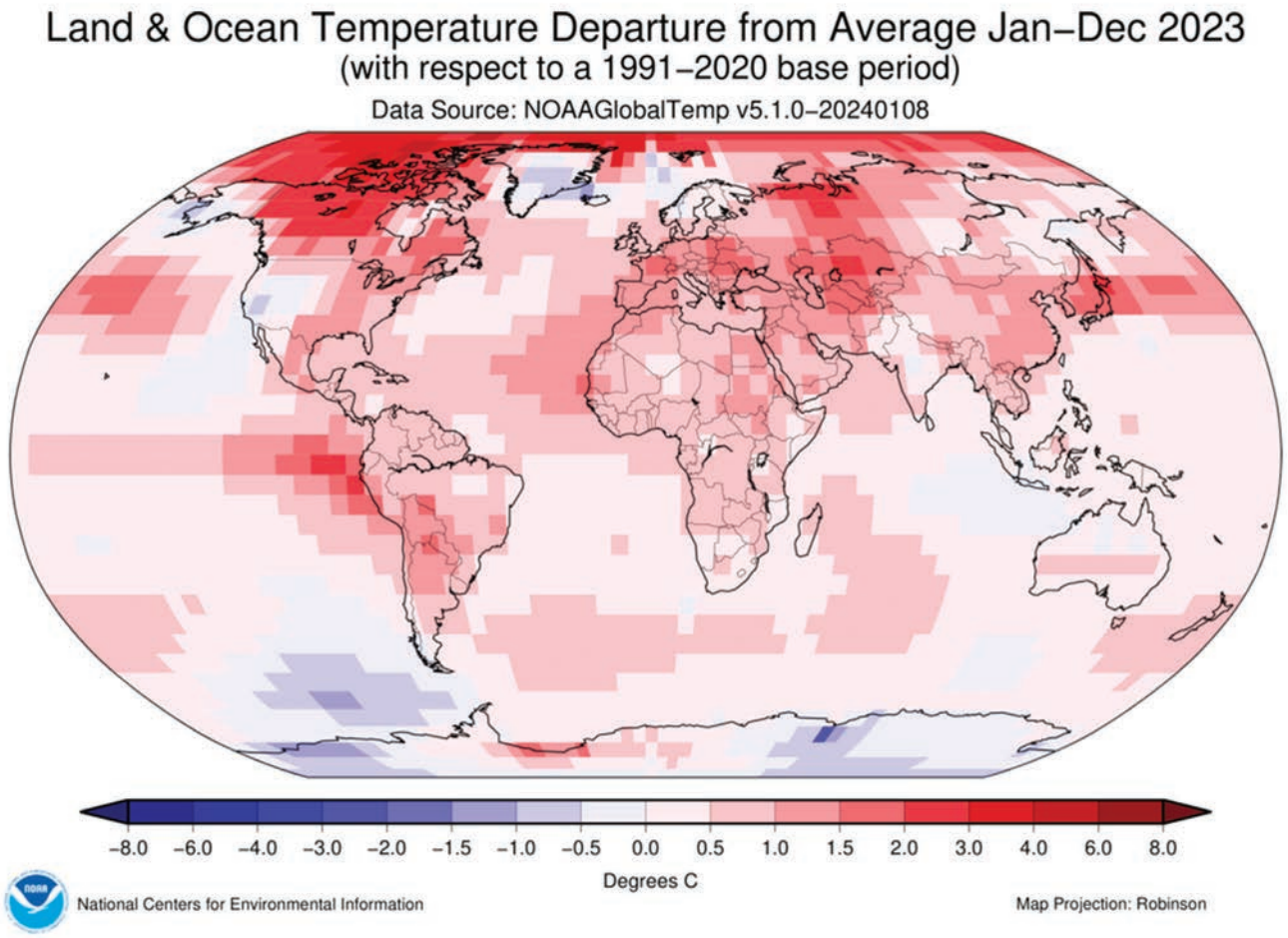


Figura 2 Anomalie di temperatura misurate dal NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration [4]) per il periodo gennaio-dicembre 2023 calcolate rispetto al periodo 1991-2020. Il rosso indica che la temperatura nel 2023 è stata più alta del periodo 1991-2020, il blu indica che la temperatura è stata più bassa.

***Figure 2** Temperature anomalies measured by NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration [4]) for January-December 2023 compared to 1991-2020. Red indicates that the temperature in 2023 was higher than the period 1991-2020, blue indicates that the temperature was lower.*

Cambiamento climatico indotto

Quando si parla di cambiamenti climatici, spesso si sente utilizzare il termine **punto di non ritorno** per riferirsi a quella situazione che renderebbe questi fenomeni irreversibili, ma questo non è il termine utilizzato in ambito scientifico. Gli scienziati del IPCC hanno infatti introdotto il termine **cambiamento climatico indotto**. Questa espressione sta ad indicare che il riscaldamento dovuto alle emissioni antropogeniche dal periodo preindustriale ad oggi **ha indotto una variazione nel clima che comunque persisterà per un periodo lungo (secoli) e continuerà a influenzare il sistema climatico**.

La causa del cambiamento climatico indotto sta nell'**inerzia termica dell'oceano** e nei lenti processi sia nella criosfera che sulla superficie terrestre. Per questo il clima continuerà a cambiare anche se da questo momento in poi l'umanità sarà capace di mantenere le emissioni di gas serra nell'atmosfera al livello odierno. In un certo senso **è il prezzo da pagare per i danni fatti nel secolo e nei decenni passati**.

Quale futuro?

Partendo da questi presupposti, per quanto riguarda il futuro, l'IPCC ha studiato diversi scenari di impatto sulla vita del pianeta legati a quanto gas serra l'umanità deciderà di immettere ancora nell'atmosfera, da oggi in poi. Il primo scenario prevede **nessuna mitigazione** della produzione di gas serra, con una crescita delle emissioni agli stessi ritmi attuali. Un secondo scenario è quello in cui c'è invece una forte mitigazione e si suppone che vengano messe in atto iniziative di **controllo sulle emissioni**, producendo energia con sistemi diversi dall'uso dei combustibili fossili. Ciascuno di questi scenari prevede impatti diversi sulla vita della popolazione del nostro pianeta ed è la politica di ciascun paese che deciderà quale di questi scenari si realizzerà.
Gli studi fatti dal **IPCC** dicono che le attività umane hanno già causato un riscaldamento globale di circa 1.0°C rispetto ai livelli preindustriali. Se **l'immissione di gas serra in atmosfera dovesse continuare al tasso attuale** è probabile che non riusciremo a mantenere il riscaldamento globale sotto 1.5°C e che raggiungeremo il valore limite già tra il 2030 e il 2052.
Se questo avvenisse le manifestazioni del cambiamento climatico, già evidenti negli eventi meteorologici e climatici, diventerebbero sempre più estremi così come aumenterebbe ulteriormente il livello del mare. È chiaro che i rischi legati al clima per i sistemi naturali e umani dipendono dall'entità e dalla rapidità del riscaldamento, dalla localizzazione geografica, dai livelli di sviluppo e vulnerabilità e dalle scelte di adattamento e mitigazione percorse dai governi.

Perché è necessario e persino vitale tenere il riscaldamento globale al di sotto di 1.5°C?

Perché per variazioni di temperatura inferiori a 1.5°C l'adattamento sarebbe meno difficile e la possibilità di sopravvivenza di specie a rischio aumenterebbe. Il nostro mondo subirebbe impatti meno negativi sull'intensità e la frequenza degli eventi estremi, sulle risorse, sugli ecosistemi, sulla biodiversità, sulla sicurezza alimentare, sulla esistenza delle città costiere.

La relazione speciale dell'IPCC del 2020 sull'oceano e la criosfera afferma che il cambiamento climatico causerà fino all'80% di perdita di ghiacciai in alcune regioni entro il 2100.

I livelli di anidride carbonica sono molto più alti di quanto non siano stati sul pianeta Terra nell'ultimo milione di anni. Questo significa che il nostro clima è in una fase di cui non abbiamo alcuna esperienza storica per costruire statistiche solide su eventi estremi. Quindi, dobbiamo monitorare con grande accuratezza quello che sta succedendo ora per poi modellare meglio gli scenari futuri.
A questo scopo l'Unione Europea ha lanciato una flotta di satelliti con il programma **Copernicus** [7] chiamati Sentinel. Queste costellazioni satellitari aiutano a sviluppare modelli e strategie per adattarsi ai cambiamenti climatici a lungo termine.
Oltre all'impegno che i governi prenderanno c'è poi quello che ognuno di noi, con grandi e piccole azioni, può fare. Non utilizzare la plastica monouso, preferire i prodotti con imballaggio ridotto, utilizzare il meno possibile l'aria condizionata, sono azioni che possono aiutare affinché i rischi futuri correlati al clima siano minore possibile per tutti gli ecosistemi che popolano il pianeta Terra.



Figura 3 Cosa cambia se la temperatura aumenterà di 1.5° o di 2°. (Crediti: IPCC Special Report [6])
Figure 3 *What changes if the temperature increases by 1.5° or 2°. (Credits: IPCC Special Report [6])*

Sitografia

[1] https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20191115STO66603/l-ue-e-l-accordo-di-parigi-verso-la-neutralita-climatica
[2] https://ipccitalia.cmcc.it/oceano-e-criosfera-in-un-clima-che-cambia/
[3] https://ingvambiente.com/2019/06/25/lamplificazione-polare/
[4] https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202313
[5] https://www.ipcc.ch/
[6] https://ipccitalia.cmcc.it/ipcc-special-report-global-warming-of-1-5-c/
[7] https://climate.copernicus.eu/

Perché i cambiamenti climatici odierni sono diversi da quelli del passato?

Leonardo Sagnotti

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il clima della Terra è sempre cambiato seguendo cicli naturali, ma i cambiamenti climatici che viviamo oggi hanno caratteristiche diverse da quelli che hanno caratterizzato il passato geologico. Cosa sta succedendo?

Una delle affermazioni più diffuse in tema di cambiamenti climatici è quella secondo cui il cambiamento climatico che stiamo vivendo negli ultimi decenni fa parte delle fasi naturali di variazione del clima della Terra. Spesso a questa affermazione si accompagna quella che sostiene che il cambiamento osservato è analogo a variazioni avvenute nel passato geologico del pianeta. Vediamo insieme, attraverso l'esame dei dati disponibili, cosa ci dicono gli studi scientifici e la documentazione geologica sul variare del clima della Terra. Possiamo anticipare che, purtroppo, la variabilità climatica che stiamo vivendo oggi si sviluppa su ritmi diversi da quelli che hanno caratterizzato il passato geologico. Ma andiamo con ordine.

Come è variato il clima nel passato?

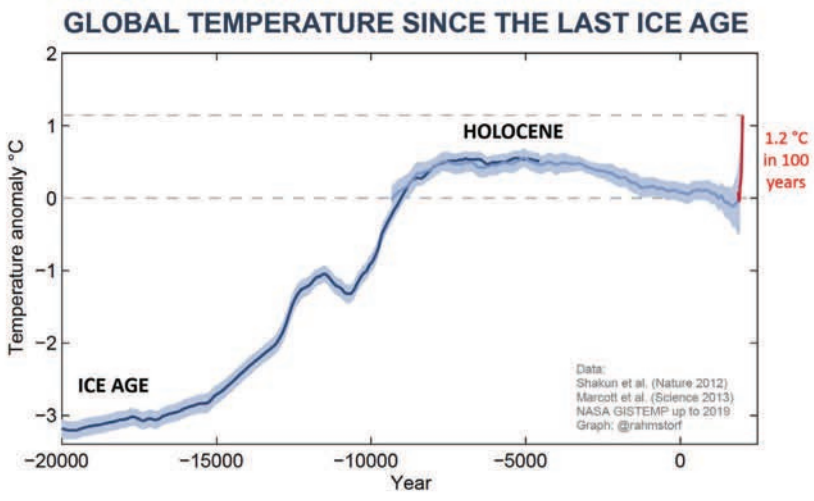
I sedimenti e i ghiacciai preservano tracce del clima del nostro pianeta nel corso del tempo geologico e ci permettono di studiare l'evoluzione del clima nel passato del nostro pianeta (si veda anche questo articolo del nostro blog: prima parte [1] e seconda parte [2]). Attraverso studi multidisciplinari è possibile ricostruire l'evoluzione del clima della Terra. I dati stratigrafici e geologici indicano che **il clima della Terra non è stabile**. Nei circa 4.5 miliardi di anni di storia del nostro pianeta le condizioni climatiche hanno oscillato enormemente. La gran parte degli studi sul clima del nostro pianeta nel passato geologico riguardano intervalli temporali che spaziano dalle recenti epoche glaciali del Quaternario (gli ultimi 2.5 milioni di anni, quelli che hanno visto l'evoluzione del genere Homo) al Fanerozoico (gli ultimi 542 milioni di anni, circa); la risoluzione ovviamente si fa via via più accurata man mano che ci avviciniamo ai nostri tempi (qui parliamo del tempo in geologia [3]).
Si ritiene che per oltre il 75% del Fanerozoico la Terra abbia avuto un clima più caldo dell'attuale. Quando si estinsero i **dinosauri**, circa 65 Milioni di anni fa, si stima che la Terra avesse in media una **temperatura superiore a quella attuale di circa 6-8°C**. Con queste temperature le aree polari erano prive di ghiacci ed il livello del mare era più alto di circa 60 m.
Spostandoci su tempi più recenti, le variazioni del clima durante gli ultimi milioni di anni sono avvenute secondo cicli controllati dai moti orbitali del nostro pianeta (eccentricità, obliquità, precessione, noti anche come cicli di Milanković) con periodicità prevalenti di 100mila e 41mila anni (ne abbiamo parlato in questo post [4]). Queste hanno dato luogo all'alternanza di fasi glaciali ed interglaciali nel corso del Quaternario.
L'impatto di queste variazioni sul clima globale è stato enorme; basti pensare, ad esempio, che durante i picchi di glaciazione nel Quaternario l'area dove ora sorge New York era ricoperta da una coltre di ghiaccio con oltre 3 km di spessore.
Il picco dell'ultima glaciazione si è verificato intorno ai 20mila anni fa. La deglaciazione è stata geologicamente molto rapida e intorno a 11-12mila anni fa siamo entrati in una fase interglaciale, un'epoca geologica detta **Olocene**. Negli ultimi 10mila anni, in particolare, il clima globale è stato

nel complesso stabile in maniera anomala se raffrontato alle ampie oscillazioni climatiche del Quaternario. Il massimo di riscaldamento su questo intervallo temporale si è registrato intorno agli 8mila anni fa (precisamente in un intervallo compreso tra 8 e 5 mila anni fa). Il periodo è noto come "**Ottimo Climatico dell'Olocene**".



Figura 1 Nel Cretaceo superiore, prima dell'estinzione dei Dinosauri, si stima che la Terra avesse in media una temperatura superiore a quella attuale di circa 6-8°C. (Immagine: Canva, science photo library)
Figure 1 *In the Late Cretaceous, before the extinction of the Dinosaurs, it is estimated that the Earth had an average temperature approximately 6-8°C higher than the current one. (Immagine: Canva, science photo library)*

Figura 2 Variazione della temperatura media globale dal culmine dell'ultima glaciazione. (Immagine di Stefan Rahmstrof)
Figure 2 *Variation of the global average temperature since the last glacial maximum. (Image by Stefan Rahmstorf)*



Durante quest'ultima fase interglaciale la civiltà umana ha avuto una evoluzione rapidissima, grazie allo sviluppo progressivo dell'agricoltura, dell'allevamento e delle società che hanno accompagnato l'uomo nel passaggio dalla preistoria alla storia.

L'anidride carbonica e i gas serra

Durante le fasi glaciali ed interglaciali del Quaternario la concentrazione di anidride carbonica (o biossido di carbonio, CO_2) in atmosfera, misurata nelle carote di ghiaccio prelevate nelle aree polari [5], è variata in un intervallo di circa 100 parti per milione (ppm), oscillando tra circa 190 e circa 290 ppm, come illustrato nel grafico sottostante.
Nella parte finale del grafico è riportato l'attuale incremento nella concentrazione di CO_2 in atmosfera che risulta essere stabilmente ben oltre i 400 ppm. Si nota nel grafico **un incremento di oltre 120 ppm nell'arco di un solo secolo**. Si passa dalle 290-300 ppm dei primi del '900 alle attuali 417 ppm, con una notevole accelerazione negli ultimi 2-3 decenni. Oggi siamo ormai stabilmente oltre i 410 ppm.

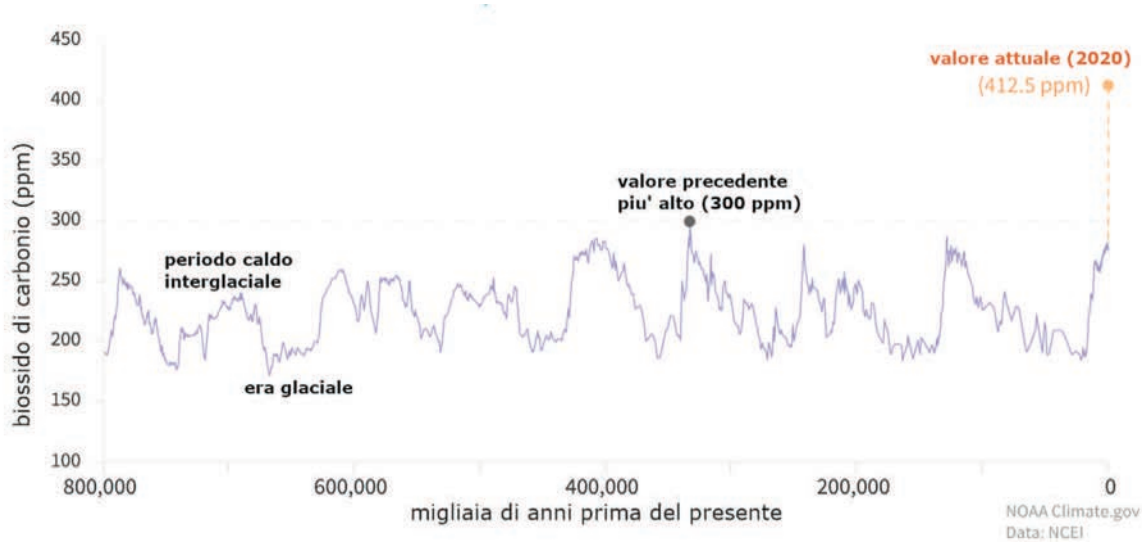


Figura 3 Concentrazioni di biossido di Carbonio (CO_2) negli ultimi 800.000 anni. (NOAA Climate.gov)
***Figure 3** Carbon Dioxide (CO_2) concentrations over the past 800,000 years. (NOAA Climate.gov)*

Cosa sta accadendo ora? Quali analogie con il passato e quali scenari per il futuro?

Recenti studi indicano un significativo incremento, tra il 2005 e il 2019, nello squilibrio energetico della Terra (Earth's Energy Imbalance - EEI). Questo significa che si osserva uno squilibrio nella differenza tra il calore solare assorbito e l'energia emessa dal pianeta sotto forma di radiazione infrarossa nello spazio circostante.
I dati indicano che **il pianeta si sta riscaldando significativamente negli ultimi due decenni.** Le proiezioni climatiche per la fine di questo secolo indicano che il pianeta **potrebbe scaldarsi tra 1.6°C e 4.3°C**. I modelli climatici indicano che in questa situazione si osserverebbe un effetto di amplificazione del riscaldamento nella regione artica, di un fattore tra 2 e 3 (ovvero con un incremento medio di temperatura tra i 3 e 12°C). È facile immaginare che questo riscaldamento

avrebbe conseguenze di vasta portata per gli ecosistemi, per tutti gli insediamenti urbani e le infrastrutture costiere (a causa dell'innalzamento del livello del mare legato sia al riscaldamento degli oceani che alla fusione di parte delle calotte glaciali polari) e per le società umane nel loro insieme.
I dati sul cambiamento climatico di questi ultimi decenni indicano che viviamo in una situazione pericolosa, che potrebbe portare nel futuro le concentrazioni di gas serra in atmosfera a valori analoghi a quelli di alcuni periodi caldi del lontano passato geologico.
L'analogo più recente è quello del **periodo caldo del Pliocene medio**, tra i 3 e 3.3 milioni di anni fa. A quell'epoca la concentrazione stimata di **CO_2 è di 450 ppm** e il **livello medio del mare era tra i 10 e i 20 m più alto dell'attuale con una temperatura globale più alta di circa 3°C**.
Nel seguito sono riportati due grafici esplicativi tratti da recenti pubblicazioni. Illustrano la ricostruzione delle variazioni nella temperatura globale e della concentrazione di CO_2 in atmosfera nel corso del Cenozoico (ultimi 65 milioni di anni). Si basano su ricerche condotte su carote di ghiaccio per gli ultimi 800mila anni e su carote di sedimenti dai fondali oceanici per le età più antiche.
La documentazione geologica sui cambiamenti climatici del passato ci mostra come i tempi legati ai cicli naturali **hanno scale temporali dell'ordine delle decine-centinaia di migliaia di anni** (per i cicli orbitali) **o di milioni di anni** (per i cicli legati alla dinamica interna del nostro pianeta). **I tempi delle variazioni climatiche attuali sono alla scala dei decenni,** ovvero si sviluppano con una rapidità maggiore di un fattore di scala di 10^4-10^6! **Questi tempi di variazione non hanno riscontro nei cicli naturali del pianeta** e sono correlati alla rapida crescita nelle emissioni di gas serra legate all'utilizzo di combustibili fossili e alle attività umane in generale, come discusso nell'**ultimo rapporto** [8] pubblicato nel 2021 del Gruppo intergovernativo delle Nazioni Unite di esperti sul cambiamento climatico (IIPCC), che **dimostra come le variazioni di gas serra in atmosfera siano dovute essenzialmente alle attività umane**.

Il clima del pianeta per il futuro prossimo dipende essenzialmente da noi.

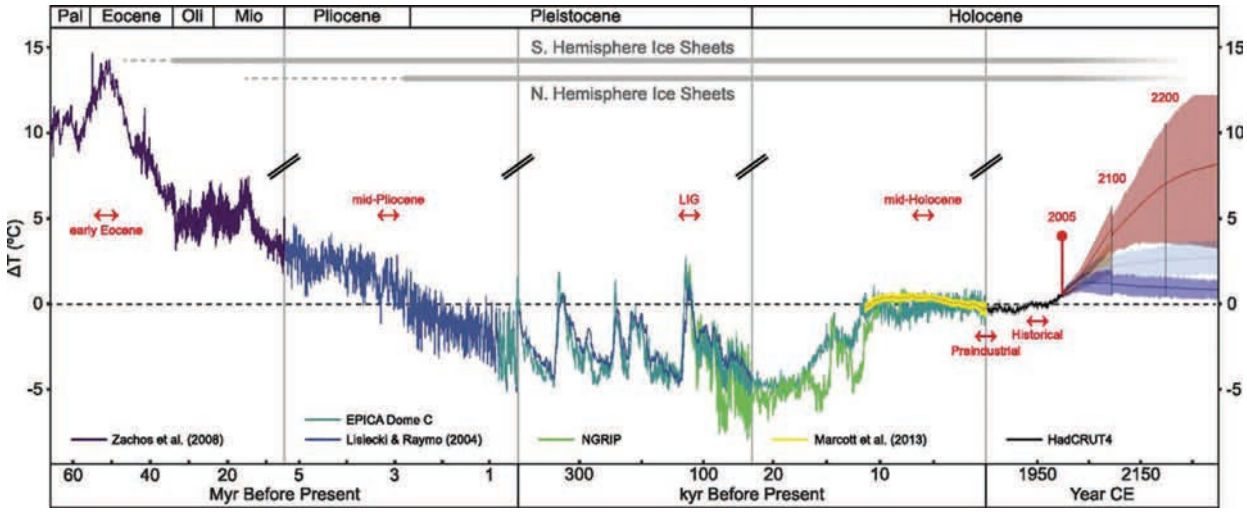


Figura 4 Ricostruzione della temperatura media globale per gli ultimi 65 milioni di anni. Nel grafico sono riportate per confronto le proiezioni per i futuri 100 anni nel caso di diversi scenari di emissione di gas serra in futuro. Si noti i cambi di scala nell'asse dei tempi [6].

Figure 4 *Reconstruction of the global average temperature for the last 65 million years. The graph also shows projections for the next 100 years under different future greenhouse gas emission scenarios for comparison. Note the changes in the time scale axis [6].*

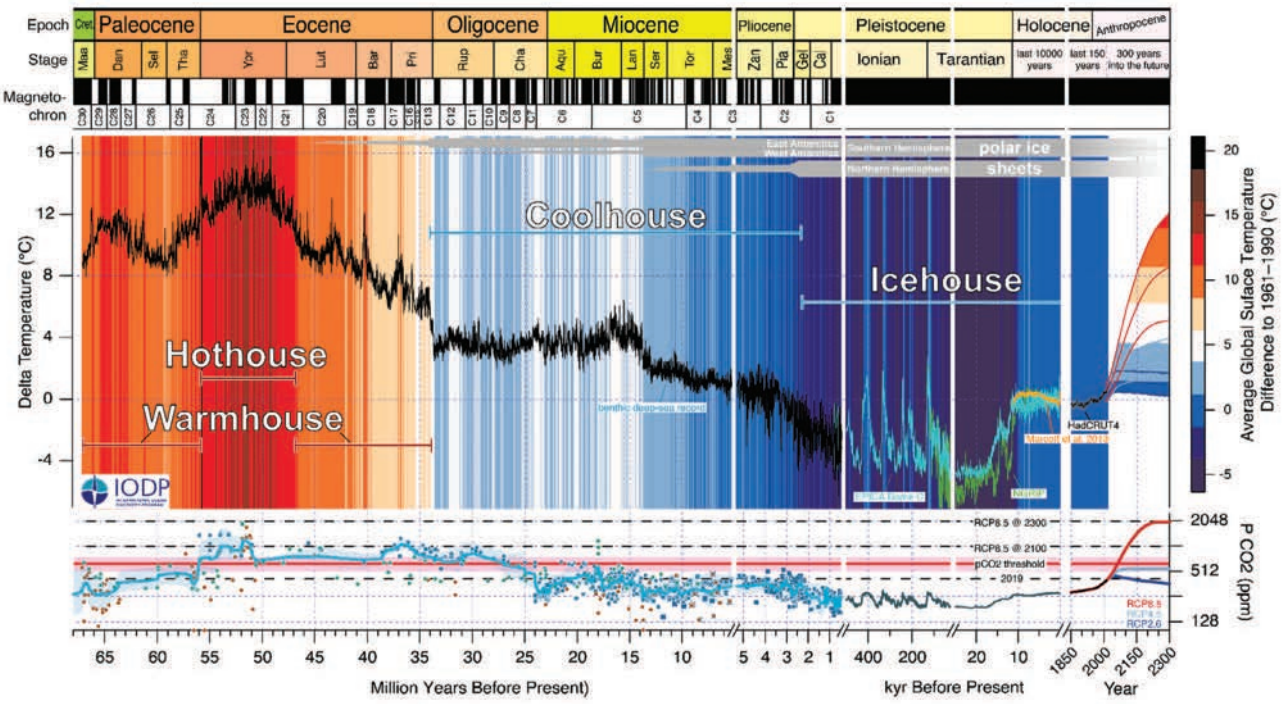


Figura 5 Ricostruzione della temperatura media globale e della concentrazione di CO_2 in atmosfera per gli ultimi 68 milioni di anni. Nel grafico è riportato per confronto le proiezioni per i futuri 100 anni nel caso di diversi scenari di emissione di gas serra in futuro. Si noti i cambi di scala nell'asse dei tempi [7]. (Grafico: IODP)

Figure 5 *Reconstruction of the global average temperature and atmospheric CO_2 concentration for the last 68 million years. The graph also shows projections for the next 100 years under different future greenhouse gas emission scenarios for comparison. Note the changes in the time scale axis [7]. (Graphic: IODP)*

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2019/12/10/breve-storia-sulla-scoperta-delle-variazioni-climatiche-a-scala-geologica-prima-parte-da-aristotele-a-milankovic/
[2] https://ingvambiente.com/2020/02/11/la-scoperta-delle-variazioni-climatiche-a-scala-geologica-seconda-parte-da-emiliani-alle-perforazioni-dei-fondali-oceanici/
[3] https://ingvambiente.com/2018/09/04/la-crescita-delle-unghie-e-la-storia-della-terra/
[4] https://ingvambiente.com/2019/12/10/breve-storia-sulla-scoperta-delle-variazioni-climatiche-a-scala-geologica-prima-parte-da-aristotele-a-milankovic/
[5] https://ingvambiente.com/2018/06/06/a-caccia-di-aria-fossile/
[6] https://www.pnas.org/content/115/52/13288
[7] https://websites.pmc.ucsc.edu/~jzachos/JamesZachos/Zachos.html
[8] https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Le variazioni del clima possono influenzare l'evoluzione di una civiltà?

Antonio Cascella

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa

Studi paleoclimatici individuano strette correlazioni tra le variazioni del clima e l'evoluzione di passate civiltà e imperi, come nel caso dell'Impero Romano.

Per circa 4 miliardi di anni il clima e la vita sul nostro pianeta si sono evoluti in un mutuo intreccio di eventi geologici, climatici e biologici culminanti nell'ambiente in cui oggi viviamo. **Variazioni del clima a larga scala nella** storia della Terra [1] **sono state accompagnate da rapidi avvicendamenti evolutivi.** Estinzioni, speciazione, comparsa di nuovi organismi sono gli eventi verificatisi per adattarsi alle mutate condizioni ambientali.

Le variazioni del clima del passato

L'esplosione evolutiva del **Cambriano** avvenne, per esempio, circa 541 milioni di anni fa. Vide il proliferare di forme di vita complesse negli oceani, probabilmente a causa di un aumento della quantità di ossigeno presente nell'acqua marina.
L'estinzione del **Permiano** [2], 252 milioni di anni fa, fu invece scatenata da un'intensa attività vulcanica durata migliaia di anni nella regione dell'attuale Siberia. Quest'ultimo evento portò ad un aumento dell'emissione di anidride carbonica (CO_2) in atmosfera che spazzò via circa il 90% delle specie marine e il 70% di quelle terrestri.



Figura 1 Una suggestiva immagine dell'Etna che ricorda preistorici paesaggi vulcanici. (Immagine: WEAR, Canva)
***Figure 1** A suggestive image of Etna that recalls prehistoric volcanic landscapes.* (Image: WEAR, Canva)

Le ricostruzioni del clima degli ultimi millenni suggeriscono un'interazione continua tra variazioni del clima e modificazioni delle società umane. In particolare, alcune ricerche condotte nel bacino del Mediterraneo e in Europa centrale, hanno individuato stretti legami tra variazioni del clima ed evoluzione di civiltà e imperi.
In particolare un insieme di **indicatori paleoclimatici marini e continentali** testimonia che le condizioni climatiche durante l'esistenza dell'Impero Romano mutarono in modo significativo.

Cosa ci dicono gli indicatori paleoclimatici?

Un gruppo di studiosi [3], analizzando il guscio di microrganismi marini (foraminiferi planctonici) è stato in grado di effettuare stime di temperatura superficiale del mare Mediterraneo degli ultimi **5.000 anni**. I campioni analizzati provengono da successioni sedimentarie campionate nel Mar Egeo, Canale di Sicilia, mare di Alboran e bacino di Minorca. Grazie a tali osservazioni il periodo più caldo negli ultimi 2.000 anni risulta essere quello che comprende i primi 500 anni dell'Era Comune. In questo periodo le temperature superficiali del mare risultano più alte di circa 2°C rispetto alla media calcolata sull'intero periodo.
Questa fase climatica, nota anche come **Roman Climatic Optimum**, coincise grosso modo proprio con la nascita e il fiorire dell'Impero Romano, probabilmente favorendone l'espansione.

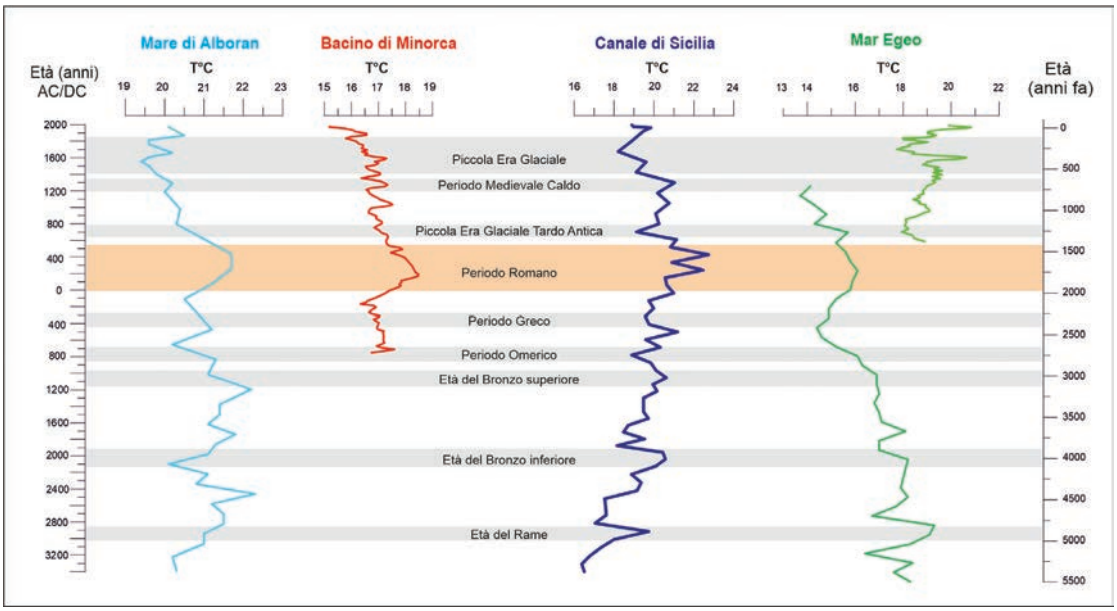


Figura 2 Confronto tra le temperature superficiali del Mare Mediterraneo negli ultimi 5000 anni. I valori sono stimati sulla base del rapporto Magnesio/Calcio del guscio di foraminiferi planctonici. L'analisi è stata condotta su campioni di sedimenti marini raccolti nel Mare di Alboran (linea azzurra), Bacino di Minorca (linea rossa), Canale di Sicilia (linea blu) e Mare Egeo (linee verdi). (A. Cascella, ridisegnata dall'originale di Margaritelli et al. [2020])
Figure 2 *Comparison in time domain of the Surface Sea Temperatures estimate from the Mg/Ca ratio of the planktonic foraminifera tests, recorded from Sicily Channel (blu line), Alboran Sea (light blu line), Minorca Basin (red line), Aegean Sea (green lines). (A. Cascella, modified after Margaritelli et al. [2020])*

Con lo stesso obiettivo, uno studio [4] diverso ha ricostruito le precipitazioni e le temperature estive analizzando gli anelli di crescita degli alberi dell'Europa centrale. Anche in questo caso il team di studiosi ha trovato delle corrispondenze tra estati calde e piovose e periodi di prosperità dell'Impero (tra il 100 a.C. e il 250 d.C.).

Nello stesso studio, tra il 250 e il 600 d.C., è emerso che a rapidi cambiamenti climatici corrisposero periodi di siccità, alluvioni, freddo, spesso associati ad epidemie.

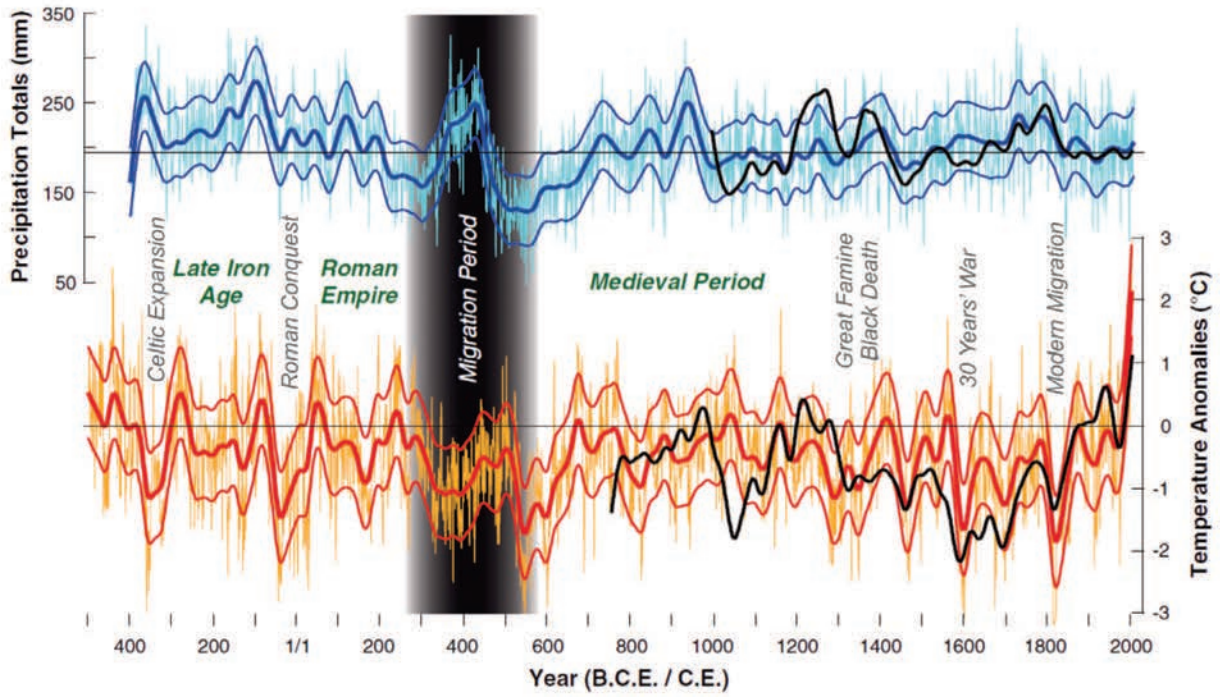


Figura 3 Ricostruzione della variazione delle precipitazioni (in alto) e delle temperature (in basso) estive nell'Europa centrale negli ultimi 2.500 anni, ricavate dall'analisi degli anelli di crescita degli alberi. (Da Buntgen et al. [2011])

Figure 3 *Tree ring-based reconstructions of central European summer precipitation (up) and temperature(down) variability over the past 2.500 years. (From Buntgen et al. [2011])*

Il caso dell'Impero Romano

La nascita dell'Impero Romano si fa risalire al 27 a.C., quando l'imperatore **Gaio Giulio Cesare Augusto** meglio conosciuto come **Ottaviano**, prese il potere. La deposizione dell'ultimo imperatore romano d'occidente, **Romolo Augustolo**, nel 476 d.C. ne sancisce definitivamente la fine.
Il periodo di nascita e sviluppo dell'Impero coincide così proprio con quel periodo già citato, a cui gli studiosi attribuiscono temperature miti e condizioni climatiche stabili.
Nella prima parte di quello che copre un periodo di circa 600 anni, **dal 27 a.C. a circa il 300 d.C.**, il clima non subì particolari variazioni. In particolare tra il 100 d.C. e il 250 d.C. si verificarono condizioni insolitamente propizie per l'agricoltura favorendo prosperità e sviluppo almeno fino a circa il 300 d.C.. Le condizioni furono tali da agevolare anche il superamento delle catene montuose permettendo l'espansione dei Romani oltre le Alpi, oltre il Canale della Manica e verso Oriente.
In questo stesso periodo anche l'**Egitto** visse un periodo di prosperità. Si guadagnò, insieme alla Sicilia, il titolo di *granaio dell'impero*, producendo grandi quantità di cereali. Negli anni precedenti a questo, ben sette delle nove piene del Nilo del primo secolo a.C. non furono infatti adeguate per fertilizzare un'area sufficientemente vasta. I successivi 329 anni invece furono caratterizzati da un aumento della frequenza di piene favorevoli, assicurando un continuo rifornimento di frumento, orzo e farro verso Roma e verso altre regioni dell'Impero.

L'arrivo dei rapidi cambiamenti climatici

A partire da circa il 300 d.C. cominciarono a presentarsi rapide fluttuazioni climatiche che probabilmente interferirono pesantemente sul destino dei popoli europei. I cambiamenti interessarono diverse regioni dell'impero, ma in modalità e tempi differenti. **Sebbene dati fisici e storici non coincidano in maniera perfetta, vi sono comunque sorprendenti convergenze sulle sequenze degli eventi più noti.**

Il periodo tra il **250 e il 600 d.C.** fu caratterizzato da **rapidi cambiamenti climatici** su scala annuale a decennale. Il fenomeno fu causato da diversi fattori i cui principali furono:

variazioni dell'**attività solare;**

oscillazioni degli indici climatici che regolano le precipitazioni sui continenti (come *El Niño* dell'Oceano Pacifico Centro-Meridionale e la *NAO* dell'Oceano Atlantico Settentrionale);

ripresa di **attività vulcanica** in diverse aree del pianeta.

Siccità, alluvioni, basse temperature si presentarono in questo periodo e, combinati a frequenti epidemie, misero a dura prova la popolazione, distruggendo la capacità di produrre cibo delle società agricole del tempo. Fu questo un periodo di tumulti politici, cambiamenti culturali, invasioni barbariche e instabilità economica e sociale in diverse province dell'Impero. Eventi che nel tempo, attraverso fasi alterne di crisi e riprese, ne causarono il definitivo crollo.



Figura 4 Mietitura del grano presso gli antichi Egizi, che coltivavano il cereale 7.000 anni prima dell'arrivo dei Romani. Tomba di Sennedjem, IX Dinastia (1308 – 1190 a.C.). (Da Wikimedia Commons)

Figure 4 *Harvesting wheat in ancient Egypt. The Egyptians* cultivated the cereal 7.000 years before the arrival of the Romans. *Tomb of Sennedjem, Ramesside Period (13th to eleventh centuries b.C.). (From Wikimedia Commons)*

Le variazioni del clima e le invasioni barbariche

Storici e archeologi hanno sempre discusso se le condizioni climatiche abbiano avuto a che fare anche con le invasioni barbariche. Oltre le frontiere romane orientali, in Asia centrale, vivevano diverse popolazioni nomadi. La loro espansione aveva interferito e interferiva con la vita degli imperi stanziali dell'Eurasia. La pastorizia, importante parte della loro economia, li rendeva particolarmente sensibili alle fluttuazioni delle precipitazioni e del clima.
Un evento determinante per la discesa di queste popolazioni verso i confini dell'Impero fu la grave **siccità del quarto secolo** che durò quasi 40 anni. Fu una delle peggiori degli ultimi 2.000 anni, cominciata nel 338 d.C. e terminata nel 377. La dinamica dell'evento giocò un ruolo cruciale nella guida delle popolazioni nomadi, gli **Unni**, alla ricerca di nuovi pascoli e luoghi da depredare. Le fonti storiche indicano che questi raggiunsero le rive del Don nel 370 d.C. e lo attraversarono cinque anni più tardi. I loro attacchi nell'area a nord del Mar Nero spinsero le popolazioni locali, i **Goti**, a chiedere asilo ed entrare nell'Impero Romano. Successivamente, nel 378, anche questi ultimi lo attaccheranno sconfiggendo l'imperatore d'Oriente Valente ad Adrianopoli.

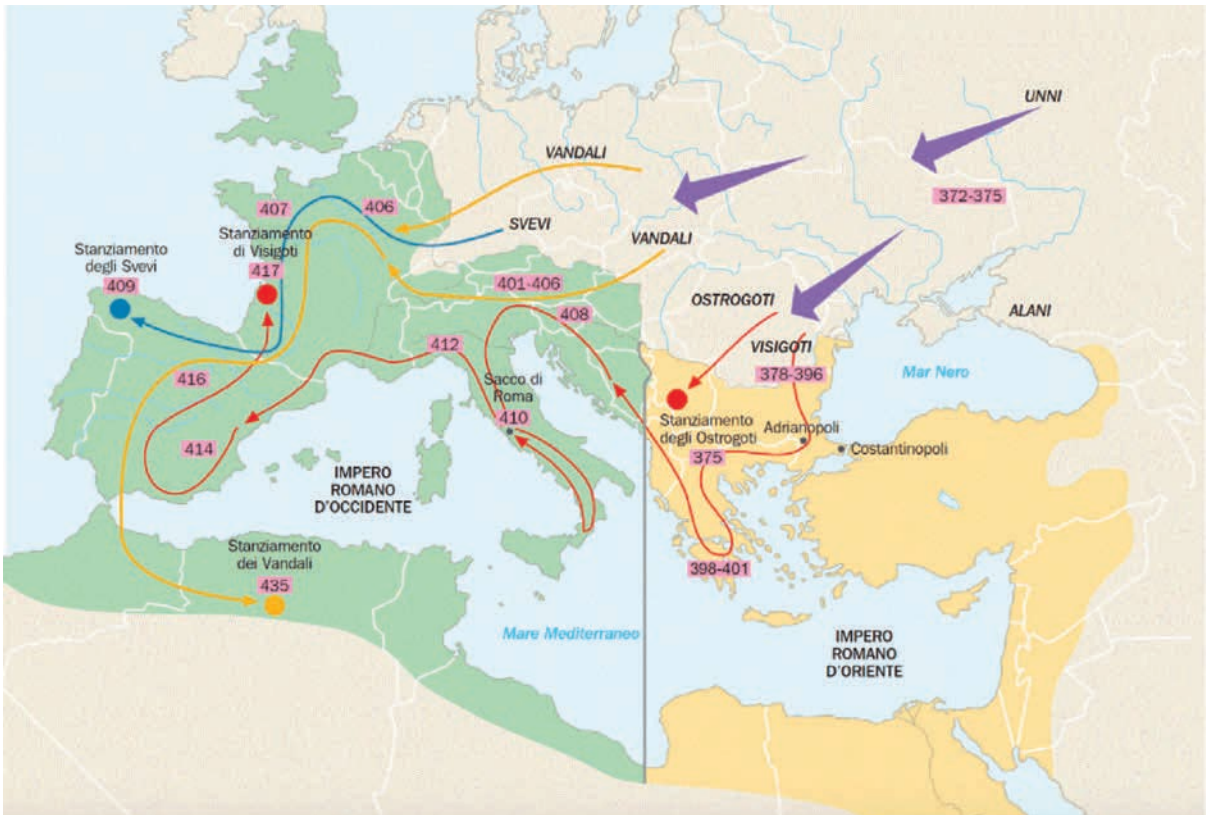


Figura 5 Le invasioni e migrazioni dei barbari all'inizio del V secolo. Da Frugoni-Magnetto [2010]. (Disegno realizzato da Roberto Marchetti)
***Figure 5** The barbarians' invasions and migrations at the beginning of the 5th century. From Frugoni-Magnetto [2010]. (Credits: Roberto Marchetti)*

Imparare dal passato

Da questa breve analisi sembra quindi chiaro come il benessere sociale ed economico di una società possa essere legato a rapide variazioni del clima. Gli esempi del passato possono suggerire quello che ci si può aspettare nel prossimo futuro come effetto dei rapidi cambiamenti climatici che stiamo vivendo.

Oggi siamo potenzialmente meno vulnerabili a questo tipo di fenomeni rispetto i nostri antenati. Non possiamo però considerarci immuni agli effetti delle condizioni climatiche previste per il prossimo futuro. Non dobbiamo e non possiamo continuare a credere di essere isolati ed estranei rispetto alle variazioni dell'ambiente naturale che ci circonda.

Bibliografia

Büntgen U., Tegel W., Nicolussi K., Mccormick M., Frank D., Trouet V., Kaplan J. O., Herzig F., Heussner K.U., Wanner H., Luterbacher J., Esper J. (2011). *2500 Years of European Climate Variability and Human Susceptibility*. Science, 331, 578. https://www.science.org/doi/10.1126/science.1197175

Frugoni C., Magnetto A. (2010). *Tutti i nostri passi. Corso di storia antica e medievale. Con espansione online. Per le Scuole superiori vol.2 (storia biennio), Bologna, Zanichelli Editore.* https://www.libreriascolastica.it/libri-scuola/9788808253422/frugoni_chiara/tutti_nostri_passi_corso_storia-zanichelli.htm

Margaritelli G., Cacho I., Català A., Barra M., Bellucci L. G., Lubritto C., Rettori R., Lirer F. (2020). *Persistent warm Mediterranean surface waters during the Roman period*. Sci. Rep., 10, 10431. https://doi.org/10.1038/s41598-020-67281-2

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2019/04/30/storia-della-terra/
[2] https://www.nature.com/articles/s41561-020-00646-4
[3] https://www.nature.com/articles/s41598-020-67281-2
[4] https://science.sciencemag.org/content/331/6017/578.full

La geoingegneria in aiuto al clima: lo stoccaggio della CO_2

Monia Procesi[1], Barbara Cantucci[1], Mario Anselmi[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1
[2]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

Mentre il mondo affronta la realtà del riscaldamento globale dovuto a cause antropiche, l'ingegnosità umana cerca possibili soluzioni non solo per l'adattamento ai cambiamenti che si verificano sul nostro pianeta, ma anche per intervenire sul sistema climatico usando la tecnologia. Nasce così una nuova disciplina, la geoingegneria, che propone nuove tecnologie finalizzate alla rimozione dell'anidride carbonica (CO_2) dall'atmosfera. Vediamo insieme quella che prevede la cattura e lo stoccaggio di questo gas serra nel sottosuolo.

Precipitazioni improvvise, intense ondate di calore, ritiro dei ghiacciai e aumento del livello marino sono solo alcuni dei principali effetti sul clima e sull'ambiente, dovuti al riscaldamento globale. Questo incremento di temperatura, legato ad un aumento delle concentrazioni di gas serra in atmosfera, è oggi particolarmente intenso e trova la sua causa nelle attività dell'uomo e in particolare in quelle industriali. L'innalzamento anche di solo mezzo grado centigrado, che potrebbe sembrare poca cosa, può avere un forte impatto su molte specie viventi, compreso l'uomo. Per mitigare questo rischio la scienza e la tecnologia ci propongono delle soluzioni come, ad esempio, quella di **stoccare l'anidride carbonica (CO_2), il principale gas serra*, migliaia di metri al di sotto dei nostri piedi.**

La CO_2 è presente naturalmente in atmosfera, ma è anche il prodotto primario di scarto delle attività industriali che utilizzano, per produrre energia, la combustione di combustibili fossili e biomasse. La sua concentrazione in aria ha avuto un'impennata dopo il 1970 (Figura 1) in concomitanza con il boom industriale (IPCC 2014 [1]) portando negli ultimi decenni ad un aumento medio globale della temperatura di circa 1°C (IPCC 2018 – Global Warming of 1.5°C.

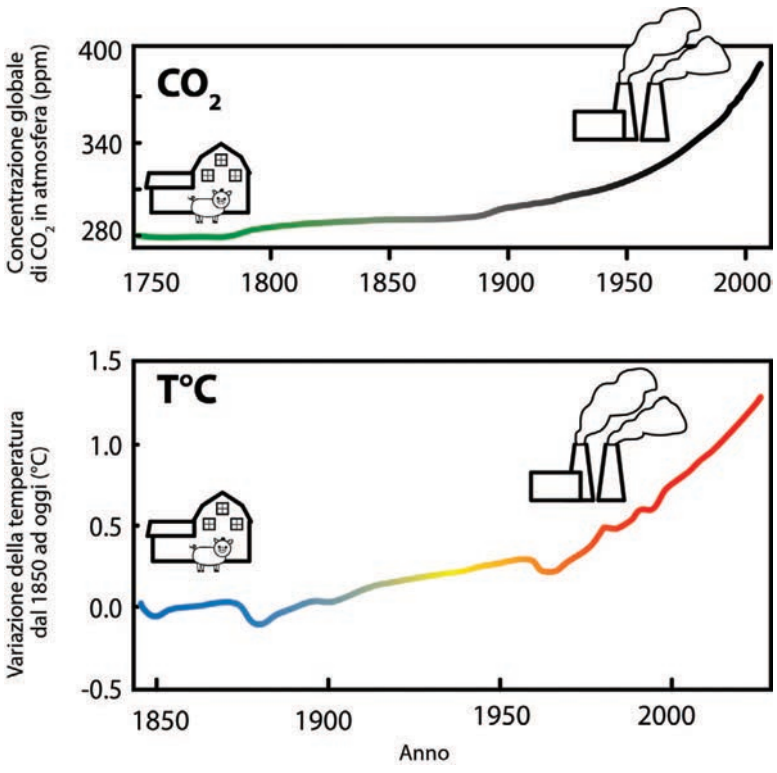


Figura 1 Evoluzione della concentrazione di CO_2 in atmosfera dal periodo pre-industriale ad oggi e andamento della temperatura media globale dell'aria vicino al suolo. (Grafica di M. Procesi). (Fonte dati: IPCC 2014, IPCC 2018)

***Figure 1** Evolution of the concentration of CO_2 in the atmosphere from the pre-industrial period until today and trend of the global average temperature of the air near the ground. (Graphics by M. Procesi). (Data source: IPCC 2014, IPCC 2018)*

Special Report [2]). La comunità internazionale vuole limitare l'aumento della temperatura a 1.5°C entro il 2030, per evitare conseguenze irreversibili sul nostro Pianeta, e arrivare al traguardo delle zero emissioni entro il 2050.
Per limitare la presenza di questo gas serra nell'atmosfera sono state proposte e sviluppate varie tecnologie, tra cui quella più consolidata e diffusa è il CCS - CO_2 Capture and Storage (cattura e stoccaggio di CO_2). La **cattura e lo stoccaggio di anidride carbonica** nel sottosuolo è una tecnologia relativamente recente (anni '70) che consente di catturare la CO_2 direttamente dagli impianti industriali e di iniettarla all'interno di serbatoi naturali profondi (stoccaggio geologico) posti a migliaia di metri di profondità. Lo stoccaggio geologico di CO_2 è considerato una **tecnologia ponte**, da utilizzare in attesa che le politiche energetiche basate sui combustibili fossili vengano interamente sostituite dalle energie rinnovabili (Figura 2) (**geotermia** [3], idroelettrico, eolico, biomassa e solare). Il CCS è stato annoverato dall'**Organizzazione Intergovernativa sul Cambiamento Climatico** (IPCC) **tra i metodi più efficaci** per ridurre le emissioni di CO_2 in atmosfera, soprattutto nei settori industriali dove le produzioni di CO_2 sono difficili da limitare (es. settore siderurgico). L'IPCC raccomanda di affiancare a questa tecnologia comportamenti virtuosi come:

1. **ridurre il consumo di energia** incrementando l'efficienza dei sistemi di conversione/utilizzazione (esempio usare elettrodomestici a basso consumo energetico);
2. **migrare verso l'utilizzo di combustibili fossili a basso contenuto di carbonio**, privilegiando ad esempio il gas naturale al carbone;
3. **incrementare l'uso di risorse energetiche rinnovabili**;
4. **ridurre la CO_2 attraverso l'assorbimento da parte di foreste e suoli**.

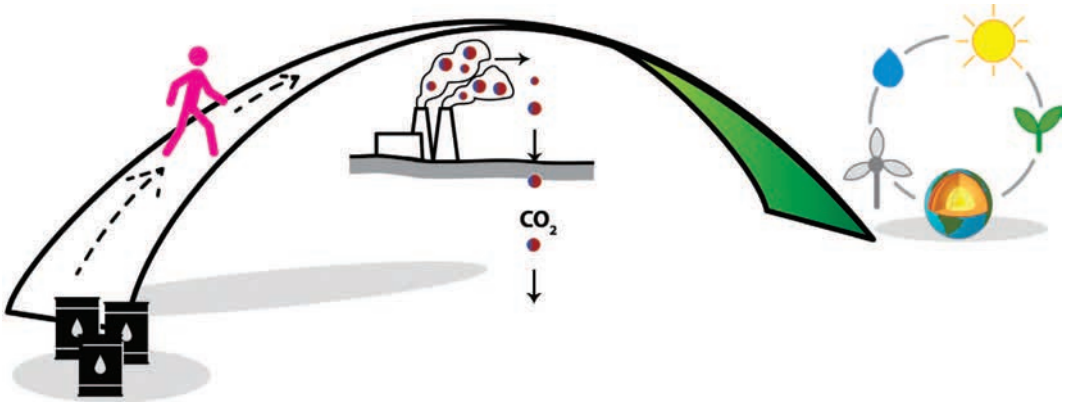


Figura 2 Lo stoccaggio geologico di CO_2 come tecnologia ponte verso una completa migrazione dai combustibili fossili verso le energie rinnovabili come eolico, idroelettrico, solare, biomassa e geotermico. (Grafica di M. Procesi)
***Figure 2** Geological storage of CO_2 as a bridging technology towards a complete migration from fossil fuels towards renewable energies such as wind, hydroelectric, solar, biomass and geothermal. (Graphics by M. Procesi)*

Un esempio di successo di stoccaggio di anidride carbonica è il sito di ***Sleipner*** nel Mare del Nord tra Norvegia e Scozia (Figura 3), dove dal 1996 al 2017 sono state confinate a 1 km di profondità circa 16 milioni di tonnellate di anidride carbonica (CO_2) provenienti da **impianti industriali** norvegesi.
I **serbatoi geologici** naturali dove si stocca la CO_2 sono costituiti da rocce molto **permeabili** che hanno permesso l'accumulo di fluidi, come acqua (acquiferi) o idrocarburi (giacimenti), per milioni di anni e quindi possono ospitare la CO_2 iniettata in sicurezza. Esempi di serbatoi riconosciuti dalla comunità scientifica come idonei all'iniezione sono quindi gli **acquiferi salini profondi,** i **giacimenti ormai esauriti di idrocarburi** (petrolio e metano) **ed i depositi di carbone** profondi (Figura 4).



Figura 3 Impianto di stoccaggio di CO_2 di Sleipner, Mare del Nord. (Foto: Harald Pettersen / Equinor ASA)
Figure 3 *Sleipner CO_2 storage facility, North Sea. (Photo: Harald Pettersen / Equinor ASA)*

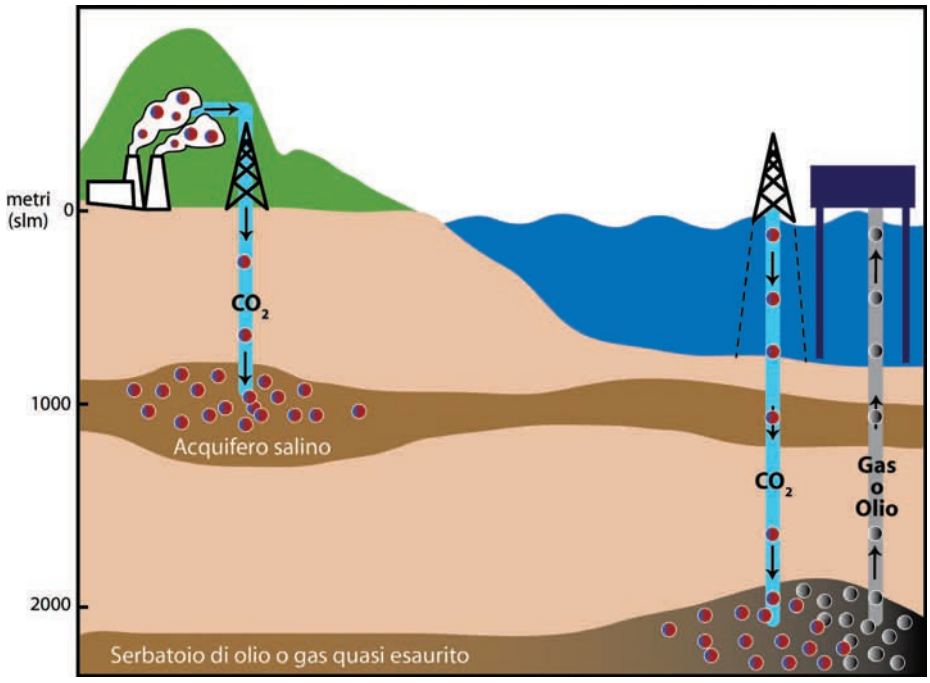


Figura 4 Esempi di serbatoi geologici idonei al confinamento dell'anidride carbonica proveniente da impianti industriali. Questi serbatoi si trovano a centinaia di metri di profondità sotto i nostri piedi. Negli acquiferi salini la CO_2 si dissolverà nell'acqua mentre nei serbatoi di olio e/o gas in via di esaurimento favoriranno la loro estrazione e il prosieguo della commercializzazione. (Grafica di M. Procesi)
Figure 4 *Examples of geological reservoirs suitable for confining carbon dioxide coming from industrial plants. These reservoirs are found hundreds of meters deep beneath our feet. In saline aquifers, CO_2 will dissolve in the water while in oil and/or gas tanks that are running out, they will favor their extraction and continued marketing.* (Graphics *by M. Procesi)*

Che succede alla CO_2 dopo che è stata iniettata nel serbatoio?

La CO_2 iniettata nel sottosuolo può rimanere intrappolata per migliaia di anni, attraverso meccanismi fisici e chimici. Infatti, il gas iniettato in pressione va ad occupare lo spazio tra i granuli della roccia spostando il fluido originariamente presente. La CO_2 è un gas molto reattivo ed in presenza di acqua si solubilizza, innescando una serie di reazioni chimiche tra l'acqua e la roccia ospite che portano alla consunzione di CO_2 ed alla formazione di nuovi minerali che contengono gli elementi derivati dalla CO_2 disciolta (Figura 5).

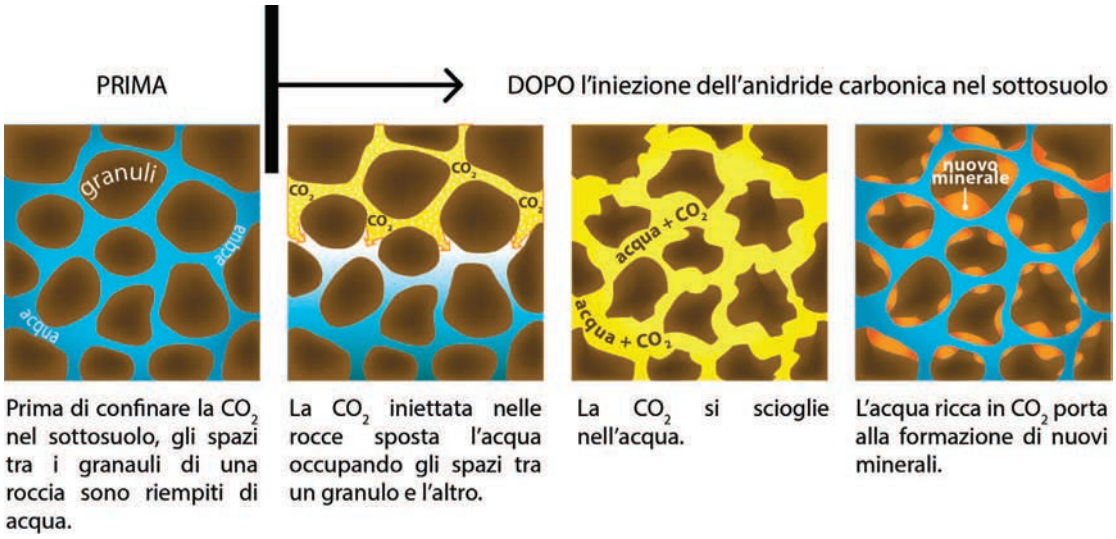


Figura 5 Meccanismi di intrappolamento della CO_2 all'interno delle rocce che costituiscono il serbatoio geologico in cui viene immagazzinata. La formazione di nuovi minerali porta ad immagazzinamento stabile della CO_2. Questo processo avviene in centinaia di migliaia di anni. (Grafica di B. Angioni)
Figure 5 *CO_2 trapping mechanisms within the rocks that constitute the geological reservoir in which it is stored. The formation of new minerals leads to stable storage of CO_2. This process occurs over hundreds of thousands of years. (Graphics by B. Angioni)*

Al di fuori dei siti di stoccaggio queste reazioni avvengono da sempre nei serbatoi naturali ricchi in CO_2 che si trovano per esempio nelle aree vulcaniche o idrotermali.
In serbatoi petroliferi quasi esausti l'iniezione di CO_2 consente di rendere il petrolio bituminoso più fluido e meno viscoso, incrementando la produzione di petrolio e prolungando la vita del giacimento.
In giacimenti a metano, l'iniezione di CO_2 permette di mantenere elevata la pressione del serbatoio, incrementando la produzione di gas.
Nel caso di depositi di carbone non sfruttabili per ragioni tecniche ed economiche, la CO_2 iniettata viene assorbita dalla superficie del carbone stesso che si comporta come una spugna. Al suo posto viene rilasciato metano, naturalmente intrappolato nei pori del carbone. Il metano prodotto può essere estratto e sfruttato commercialmente, permettendo un ritorno economico.

I serbatoi naturali sono sicuri?

Per utilizzare la tecnologia del CCS in sicurezza ed evitare che la CO_2 possa ritornare in superficie i serbatoi di stoccaggio **devono soddisfare alcuni requisiti**:

- **profondità maggiore di 800 m** perché grazie alle alte pressioni del sottosuolo la CO_2 è più densa, meno mobile e più solubile in acqua rispetto alle condizioni atmosferiche;

- **ubicazione in aree a bassa pericolosità sismica** per evitare che un evento sismico possa indurre una fratturazione del serbatoio facendo fuoriuscire la CO_2;
- **elevata porosità e permeabilità della roccia serbatoio** così da permettere alla CO_2 di accumularsi nei pori della roccia e reagire chimicamente con essa;
- **presenza di una roccia di copertura del serbatoio poco permeabile** (*seal*) che ostacoli la migrazione verticale della CO_2 verso la superficie;
- **limitare l'iniezione nel rispetto delle pressioni massime del serbatoio** per evitare la riattivazione di faglie e l'innesco e/o l'induzione di terremoti.

In quali paesi è attivo lo stoccaggio di CO_2?

Europa, USA, Australia e Giappone hanno finanziato progetti internazionali per acquisire conoscenze e testare questa tecnologia in siti pilota. Sleipner in Norvegia, Weyburn in Canada e In Salah in Algeria, sono alcuni esempi, solo per citare i più famosi, che hanno favorito la cooperazione internazionale tra governi e istituti di ricerca portando allo sviluppo di protocolli di monitoraggio, sicurezza e norme legislative specifiche.
Gli **istituti di ricerca italiani**, tra cui l'**INGV**, hanno partecipato a vari progetti internazionali finanziati dalla Comunità Europea per l'ampliamento delle conoscenze su questa tecnologia. Il focus di questi progetti è la caratterizzazione di potenziali siti di stoccaggio di anidride carbonica e il monitoraggio prima, durante e dopo l'iniezione.
Nel nostro Paese, nel 2024, partirà il primo progetto di stoccaggio di CO_2 al largo di Ravenna, nel medio Adriatico, dove sono presenti giacimenti di gas in via di esaurimento. Il sito è stato selezionato per la presenza di infrastrutture già presenti e la vicinanza a siti di emissioni industriali. Il progetto, finanziato da una Joint Venture tra ENI e SNAM, partirà prima con una fase di test, di durata biennale, e poi dovrebbe diventare il più grande deposito di stoccaggio di CO_2 dell'intero Mediterraneo, capace di ricevere CO_2 catturata in altri siti industriali.
Attualmente l'INGV, tramite il suo centro CMS (Centro di Monitoraggio del Sottosuolo) si occupa, per conto del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, del monitoraggio geofisico di questo sito di stoccaggio.
INGV, infatti da molti anni lavora alla **definizione di aree potenzialmente idonee allo stoccaggio di anidride carbonica in Italia** ed alla proposta di un **piano energetico integrato tra stoccaggio di fluidi e geotermia** simulando i processi chimici e fisici di intrappolamento in serbatoi geologici selezionati (vedi gli approfondimenti).
Inoltre, INGV partecipa ad un **progetto pilota** nelle miniere di carbone ormai non più utilizzate del Sulcis (Sud-Ovest della Sardegna), dove è in corso la realizzazione di un "**laboratorio naturale**", un'infrastruttura di ricerca, per testare gli effetti dell'anidride carbonica e del suo comportamento nel sottosuolo. Al momento INGV sta caratterizzando l'area da un punto di vista sismico, monitorando la sismicità naturale di fondo e focalizzando l'attenzione sulla ricerca di faglie sismicamente attive. I risultati sono stati pubblicati ad aprile 2020 sulla rivista *International Journal of Greenhouse Gas Control*.

Oltre allo stoccaggio c'è qualche altra soluzione?

Negli ultimi anni si parla anche di **Carbon Capture Utilization and Storage** (CCUS). Questa tecnologia prevede che la CO_2 catturata venga in parte riciclata come reagente per la produzione di sostanze chimiche, plastiche o combustibili (es. metano, metanolo), contribuendo ulteriormente a ridurre i costi di cattura. Un'altra possibile soluzione ad oggi, del tutto sperimentale, è l'utilizzo della CO_2 iniettata nel sottosuolo come **fluido di lavoro nei sistemi**

geotermici. Con questa tecnica la CO_2 funge da fluido che ha il compito di trasportare il calore che poi verrà convertito in elettricità.
L'apertura verso tecnologie come la cattura, l'utilizzo e stoccaggio di anidride carbonica al fine di mitigare le conseguenze dell'effetto serra possono rappresentare quindi una reale soluzione nell'attesa di una profonda trasformazione delle politiche energetiche che favoriscano la migrazione verso energie rinnovabili e sostenibili.

I gas serra: buoni o cattivi?
I gas che costituiscono l'atmosfera e che respiriamo tutti i giorni (in particolare CO_2 e CH_4) hanno la capacità di trattenere parte del calore che viene irradiato dal sole. Questo è un processo benefico per la vita sulla Terra, perché permette di avere una temperatura media al suolo di circa 15°C. Senza i gas serra avremmo invece una temperatura al suolo di -18°C. Quando però le concentrazioni di questi gas aumentano, aumenta di conseguenza anche la temperatura, con importanti ripercussioni sul clima e sulle specie animali e vegetali che popolano il nostro pianeta. Oltre una certa soglia il processo di riscaldamento diviene irreversibile perché le foreste e gli oceani non sono più in grado di assorbire la CO_2 in atmosfera.

Bibliografia

Anselmi M., Saccorotti G., Piccinini D. et al., (2020). *Microseismic assessment and fault characterization at the Sulcis (South-Western Sardinia) field laboratory*, International Journal of Greenhouse Gas Control, 95, 102974. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.102974

Anselmi M., Saccorotti G., Piccinini D., Giunchi C., Paratore M., De Gori P., Buttinelli M., Maggio E., Plaisant A., Chiarabba C., (2020). *Microseismic assessment and fault characterization at the Sulcis (South-Western Sardinia) field laboratory*, International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 95,102974. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.102974

Buttinelli M., Procesi M., Cantucci B., et al., (2011). *The geo-database of caprock quality and deep saline aquifers distribution for geological storage of CO_2 in Italy*, Energy, 36(5), 2968-2983. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.041

Cantucci B., Montegrossi G., Buttinelli M., et al., (2015). *Geochemical Barriers in CO_2 Capture and Storage Feasibility Studies, Capture and Storage Feasibility studies*, 105(1), 43-55. https://doi.org/10.1007/s11242-014-0392-6

Cantucci B., Buttinelli M., Procesi M., et al., (2016) *Algorithms for CO_2 storage capacity estimation: Review and Case study. In: T. N. Singh and Vikram Vishal. Capitolo di libro, Geologic Carbon Sequestration: Understanding Reservoir Concepts*, edited by Springer, Hardcover ISBN 978-3-319-27017-3; eBook ISBN 978-3-319-27019-7. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27019-7

Procesi M., Cantucci B., Buttnelli M., et al., (2013). *Strategic use of the underground in an energy mix plan: Synergies among CO_2, CH_4 geological storage and geothermal energy. Latium Region case study (Central Italy)*, Applied Energy, 110, 104-131. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.071

Sitografia

[1] IPCC, 2014: Climate Change 2014:https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/
[2] IPCC 2018: Global Warming of 1.5°C https://www.ipcc.ch/sr15/
[3] https://ingvambiente.com/2019/05/28/impariamo-a-conoscere-lenergia-geotermica-e-luso-che-se-ne-puo-fare/

Foglie e licheni per il biomonitoraggio delle “polveri sottili”

Aldo Winkler

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L’Organizzazione Mondiale della Sanità ha stimato che le polveri atmosferiche inquinanti – le cosiddette polveri sottili – indicate comunemente come PM10 e PM2.5, provocano circa 2 milioni di decessi all’anno nel mondo, di cui circa 400.000 nella sola Europa. Mediante l’utilizzo di analisi magnetiche e chimiche è possibile utilizzare i licheni e le foglie degli alberi come preziosi alleati per il controllo e la mitigazione degli effetti del particolato inquinante negli ambienti urbani.

Le polveri atmosferiche inquinanti (polveri sottili, note come PM, dall’inglese *particulate matter*) sono particelle solide e liquide presenti in atmosfera a causa di emissioni naturali e antropiche. Di solito, quando si parla di “polveri sottili”, ci si riferisce al cosiddetto PM10, comprendente particelle di dimensione aerodinamica uguale o inferiore a 10 µm (1µm è un milionesimo di millimetro). Negli ultimi anni le ricerche si sono soffermate sulle polveri di dimensione ancora inferiore, il PM2.5, con diametro inferiore ai 2.5 µm. Il PM si accumula e si diffonde nell’organismo tanto più facilmente quanto sono inferiori le sue dimensioni. Tra le affezioni attribuite al PM vi sono patologie acute e croniche a carico dell’apparato respiratorio (asma, bronchiti, allergia, tumori) e cardio-circolatorio.
Il particolato atmosferico può essere prodotto da **fonti naturali** (polvere da rocce e suoli, sale marino, pollini, eruzioni vulcaniche) o da **fonti umane** (emissioni di veicoli a motore, riscaldamento delle abitazioni, usura del manto stradale, dei freni e dei pneumatici delle auto, emissioni di centrali elettriche, inceneritori, impianti industriali, centrali elettriche e fumo di sigaretta).
Le norme europee hanno fissato, dal 2010, i **limiti massimi giornalieri** di PM10 a **50 µg/m^3**, da non superare più di 7 volte l’anno, **con una media annua massima di 20 µg/m^3.**

Le tecniche magnetiche di indagine del PM

Tra le metodologie più originali ed efficaci di ricerca e analisi sul PM, volte principalmente a riconoscere e discriminare le sorgenti emissive, sono state sviluppate quelle derivate dallo studio del **magnetismo delle rocce**, che dipendono dalla presenza di particelle ferrimagnetiche (tipicamente magnetite) associate a metalli in traccia prodotte da processi di combustione (nel caso di emissioni industriali, domestiche o veicolari) e da abrasione (come per i freni veicolari e le rotaie).
Le misure magnetiche sono molto sensibili e possono essere utilizzate sui filtri delle centraline di monitoraggio della qualità dell’aria, ma anche su foglie di alberi e su licheni, impiegati come recettori e collettori passivi di particolato metallico atmosferico, che ne modifica sensibilmente le proprietà magnetiche. Infatti, in contesti non inquinati, foglie e licheni sono debolmente e solo temporaneamente magnetizzabili in presenza di un campo magnetico (diamagnetiche, in termini scientifici). La capacità di magnetizzarsi in maniera intensa e duratura è pertanto indice del bioaccumulo di particolato magnetico, solitamente correlato a emissioni di tipo antropico e, in contesti urbani, principalmente dalla circolazione di veicoli a motore.

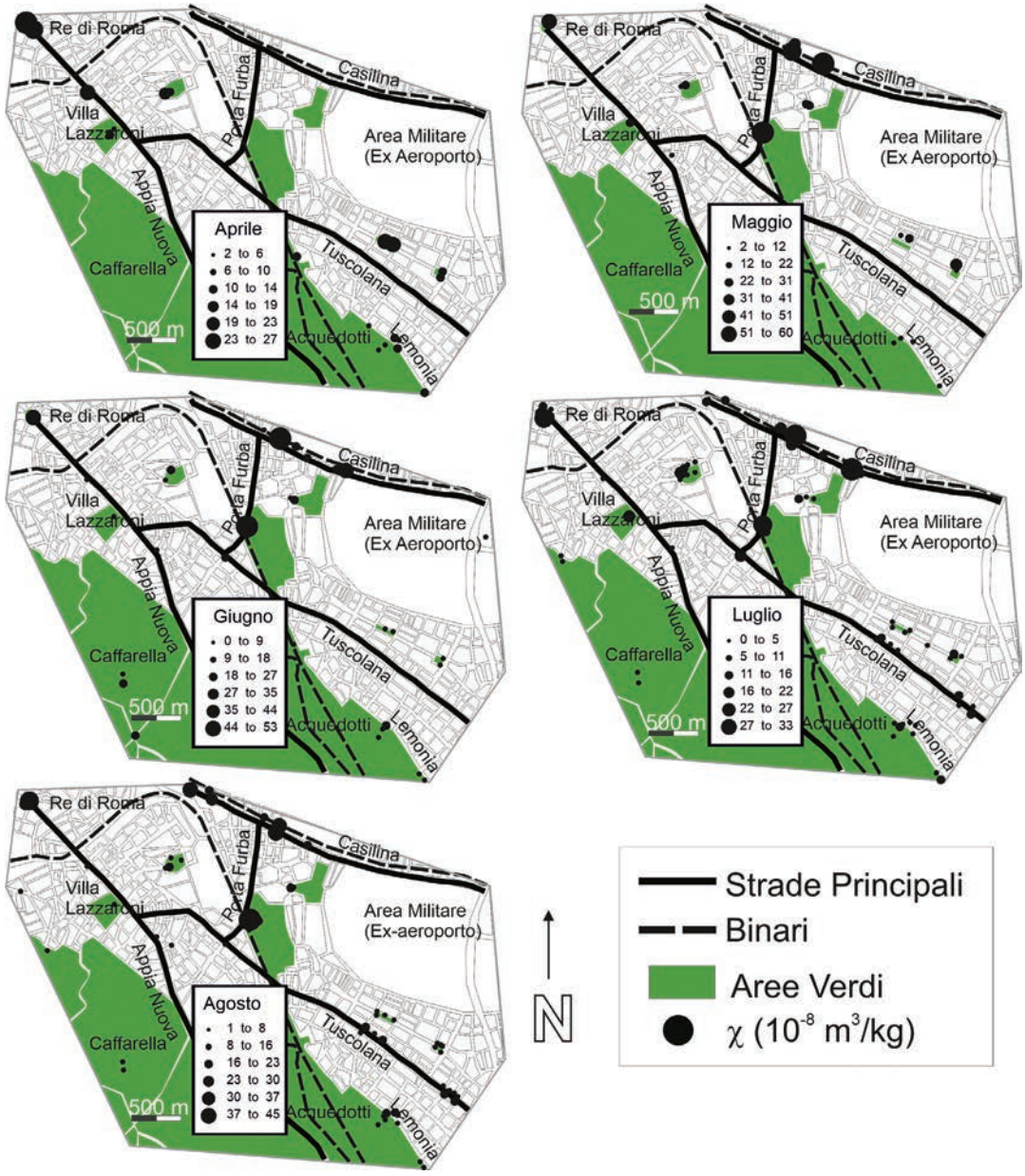


Figura 1 Distribuzione spazio-temporale della suscettività magnetica a Roma (aprile-agosto 2002).
Figure 1 *Space and time distribution of magnetic susceptibility in Rome (April-August 2002).*

Primi studi di biomonitoraggio magnetico a Roma

I primi studi di biomonitoraggio con metodi magnetici da noi sviluppati sono stati compiuti a Roma a partire dal 2002 su foglie di platano e leccio, gli alberi più diffusi nel territorio. Il bioaccumulo di PM metallico è stato valutato mediante la suscettività magnetica, un parametro dipendente dalla concentrazione dei minerali magnetici, con cui sono state realizzate mappe mensili di distribuzione geografica dei suoi valori (Figure 1 e 2). I risultati hanno dimostrato che questi dati sono efficaci per valutare l'inquinamento da traffico veicolare a Roma. Inoltre, il bioaccumulo è risultato dipendente dalla specie campionata, dimostrando che il leccio è maggiormente efficiente del platano per gli studi di biomonitoraggio, a parità di condizioni espositive.
Nel 2021, un successivo studio multidisciplinare, grazie all'uso combinato di analisi magnetiche e biologiche, ha effettivamente dimostrato che il leccio è una specie particolarmente adatta come elemento chiave delle infrastrutture verdi finalizzate alla rimozione del particolato, grazie al suo elevato potenziale di bioaccumulo e tolleranza funzionale.

Integrando questi risultati con studi successivi, sempre sui lecci, si è giunti al risultato che la concentrazione di PM antropogenico risulta significativamente ridotta già alla distanza di 10 metri dalla sede stradale.
Gli studi successivi sono stati rivolti all'analisi delle proprietà magnetiche, chimiche e morfologiche delle polveri emesse dai tubi di scappamento e dei residui di frenatura, per determinare la loro impronta sul particolato accumulato da filtri e mezzi biologici. Lo studio ha permesso di dimostrare che con metodi magnetici è possibile discriminare le polveri emesse dagli scarichi dei carburanti da quelle derivanti dall'uso dei freni.

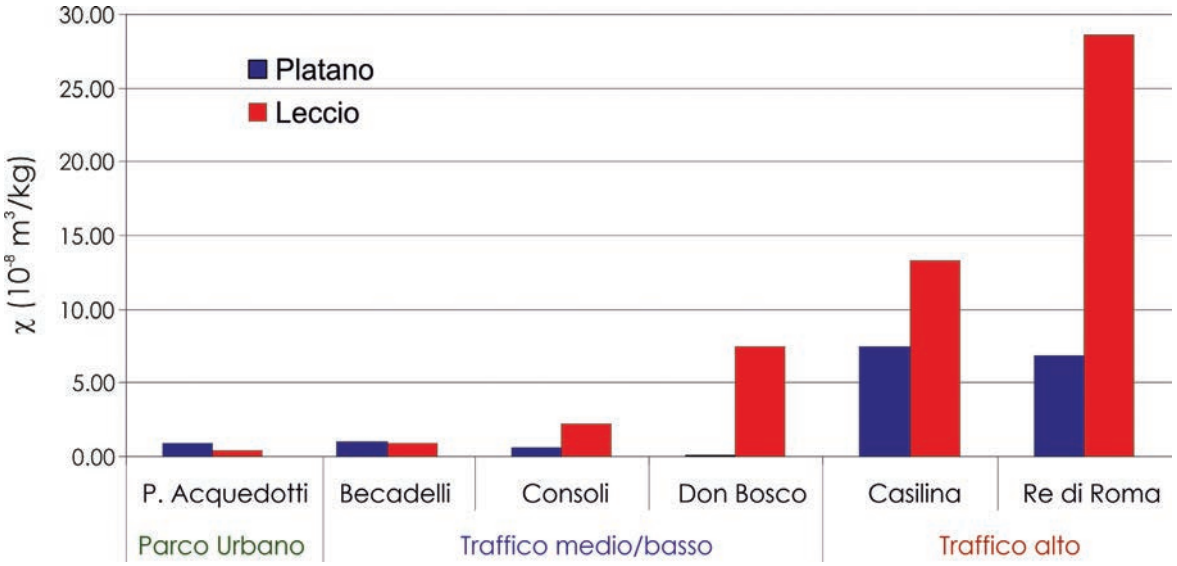
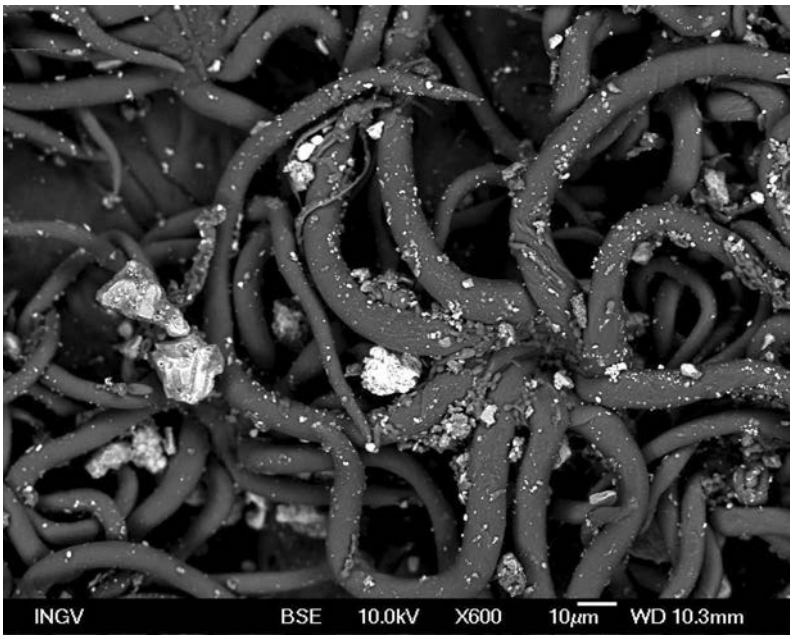


Figura 2 Valori di suscettività magnetica delle foglie di Platano e di Leccio, in un settore sud-est di Roma. Si può notare la corrispondenza tra valori di suscettività magnetica e volumi di traffico. Le foglie di leccio sono risultate bioaccumulatori più efficienti.

Figure 2 *Magnetic susceptibility values of plane tree and holm oak leaves, in a south-eastern sector of Rome. The correspondence between magnetic susceptibility values and traffic volume can be noted. Holm oak leaves were found to be more efficient bioaccumulators.*

Figura 3 Immagine al microscopio elettronico di strutture pilifere di una foglia di leccio con particolato magnetico intrappolato (particelle dai toni di grigio brillante).

Figure 3 *Electron microscope image of the hairs of holm oak leaf with immobilized magnetic particles (bright gray-toned particles).*



I primi studi con i licheni

La pluriennale collaborazione con Stefano Loppi, del dipartimento di Scienze della Vita dell'Università di Siena, ha permesso l'introduzione dei **licheni** quali bioaccumulatori del particolato metallico atmosferico, con la possibilità, attraverso l'uso di trapianti, di valutare l'inquinamento atmosferico attraverso l'esposizione di licheni prelevati da luoghi incontaminati, confrontando le loro proprietà fisiche e chimiche iniziali con quelle conseguite a seguito dell'esposizione. I licheni vengono inseriti in *lichen bags*, reti a maglia larga che ne permettono l'esposizione nei siti da esaminare.
Il primo studio [Paoli et al., 2016] è stato condotto su trapianti di *Evernia prunastri e* su campioni autoctoni di *Xanthoria parietina*, in un'area limitrofa a un cementificio slovacco, dove le analisi magnetiche e chimiche sui licheni sono state utili a discriminare gli apporti naturali da quelli relativi alle attività di produzione del cemento. Successivamente, come collaborazione con l'Università di Trieste, sono stati analizzati campioni di *Pseudevernia furfuracea* provenienti, in provincia di Pordenone, dai dintorni di un cementificio e di un'area industriale [Kodnick et al., 2107], determinando quest'ultima come principale sorgente del PM metallico bioaccumulato dai licheni.



Figura 4 Lichen bag per l'esposizione di trapianti di Evernia Prunastri (L.) Ach. (Foto di A. Winkler)
Figure 4 *Lichen bag for the exposure of Evernia Prunastri (L.) Ach. lichen transplants. (Photo by A. Winkler)*

Il biomonitoraggio lichenico per la tutela degli spazi urbani antropizzati

L'esperienza sui licheni e il contestuale miglioramento delle potenzialità di analisi delle proprietà magnetiche (cicli d'isteresi, diagrammi FORC) ha permesso di avviare un programma di ricerca promosso dall'ARPA Lazio [1], come servizio per la cittadinanza, per il campionamento di licheni in Via di Salone (RM) e località Via Cesurni (Comune di Tivoli), ai fini del controllo ambientale di una area sottoposta a incendi dolosi per il recupero di metalli dai rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche. I valori dei parametri magnetici e chimici sono risultati indicativi di importanti concentrazioni di minerali magnetici, associati a metalli pesanti tossici, come è stato espresso nella relazione tecnica [2] e nel successivo articolo scientifico [Winkler et al., 2019], in cui è stato dimostrato l'elevato grado di antropizzazione delle zone studiate, caratterizzate da molteplici sorgenti di inquinamento.
Il successivo studio [Winkler et al., 2020] è stato svolto a Milano, dove sono state esaminate e comparate le proprietà magnetiche, chimiche e morfologiche delle polveri sottili accumulate dei

licheni trapiantati ed esposti per tre mesi in venticinque siti caratterizzati da diversa intensità di traffico veicolare. Come principale risultato, i freni sono stati individuati come principale sorgente emissiva delle polveri sottili metalliche, caratterizzate da alto contenuto di bario e antimonio, noti traccianti del PM non esausto da frenatura.

Il biomonitoraggio per il controllo e la mitigazione dell'impatto del PM sui beni culturali

Dal 2021 l'INGV collabora con Antonio Sgamellotti dell'Accademia Nazionale dei Lincei e con l'Università di Siena in un programma di ricerca sullo studio degli effetti delle azioni antropiche sui beni culturali, utilizzando i licheni per delineare la diffusione delle polveri atmosferiche inquinanti nei beni culturali, e le foglie per determinare, in funzione della specie arborea, la fornitura di servizi ecosistemici di protezione ambientale, per la conservazione preventiva delle opere. Le ricerche hanno portato a innovativi risultati su Villa Farnesina [Winkler et al., 2022], sulla Collezione Peggy Guggenheim di Venezia [Grifoni et al., 2024] e sono tuttora in corso al Parco Archeologico del Colosseo [Grifoni et al., 2024], al Metropolitan Museum di New York, presso Santa Maria del Fiore a Firenze [3] e ai Musei Nazionali di Buenos Aires.
Di seguito, si riportano i link ad alcuni articoli che testate nazionali e internazionali hanno riservato a queste tecniche:

- Guggenheim Collection: licheni sui dipinti di Picasso per trovare le polveri sottili [4];
- Quando gli alberi difendono gli affreschi di Raffaello [5];
- Firenze, al via il primo monitoraggio dell'aria dentro al Duomo [6];
- Trees are protecting Raphael paintings by soaking up pollution in Rome [7].



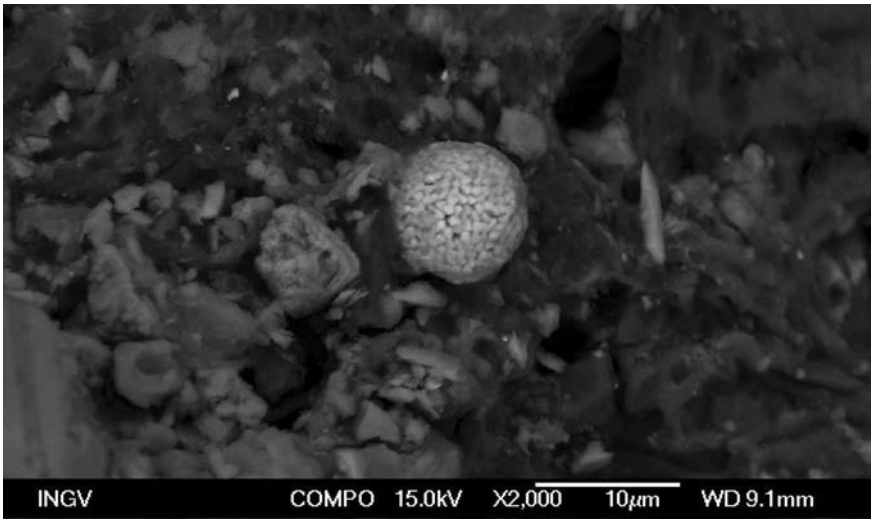


Figura 5 Via di Salone, Roma; foto di discariche abusive sottoposte a incendi dolosi e immagine al microscopio elettronico di particolato metallico da combustione, immobilizzato nelle strutture licheniche.
Figure 5 *Via di Salone, Rome; picture of illegal landfill subjected to arson and electron microscope image of a combustion metallic particle immobilized within the lichen.*



Figura 6 Loggia di Amore e Psiche, Villa Farnesina, Roma. (Foto di A. Winkler)
Figure 6 *Loggia of Cupid and Psyche, Villa Farnesina, Rome. (Photo by A. Winkler)*

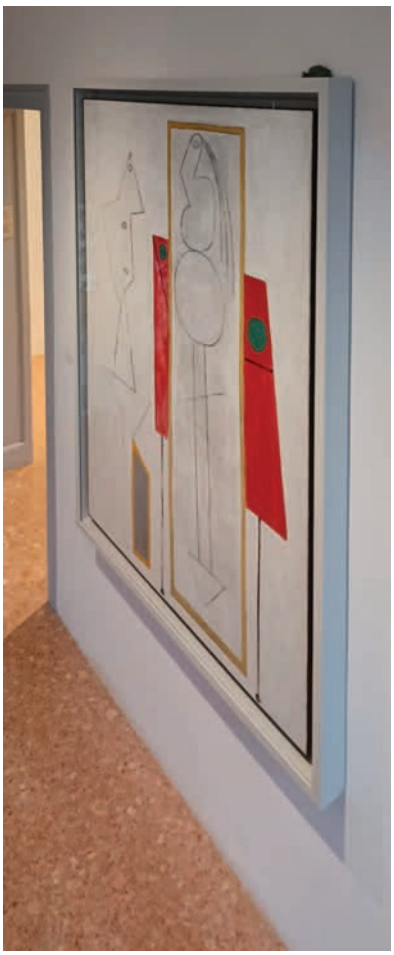


Figura 7 Picasso - Lo Studio, Collezione Peggy Guggenheim, Venezia. (Foto di A. Winkler)
Figure 7 *Picasso - Lo Studio, Peggy Guggenheim Collection, Venice. (Photo by A. Winkler)*

Le attività sui beni culturali hanno ispirato il progetto CHIOMA – Cultural Heritage Investigations and Observations: a Multidisciplinary Approach, nell'ambito del programma di ricerche "Pianeta Dinamico", finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca.
Dato il loro potenziale interesse per la popolazione e per gli amministratori locali, queste ricerche sono state oggetto di diverse iniziative di divulgazione scientifica, con numerose presentazioni in occasione di eventi pubblici e di un programma formativo con le scuole promosso dal Comune di Roma, oltre a quattro progetti di Alternanza Scuola Lavoro/PTCO [8].

Bibliografia

Grifoni L., Winkler A., Di Lella L.A., Pensabene Buemi L., Sgamellotti A., Spagnuolo L., Loppi S., (2024). *Magnetic and chemical biomonitoring of particulate matter at cultural heritage sites: The Peggy Guggenheim Collection case study (Venice, Italy)*, Environmental Advances, 15, 100455. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100455

Grifoni L., Winkler A., Boldrighini F., Di Lella L.A., Russo A., Sgamellotti A., Spagnuolo L., Strano G., Loppi S., (2024). *Nature-based solutions for monitoring the impact of vehicular particulate matter and for the preventive conservation of the Palatine Hill archaeological site in Rome, Italy*, Science of The Total Environment, Volume 946, 2024, 174358, ISSN 0048-9697. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174358

Winkler A., Caricchi C., Guidotti M., Owczarek M., Macrì P., Nazzari M., Amoroso A., Di Giosa A., Listrani S., (2019). *Combined magnetic, chemical and morphoscopic analyses on lichens from a complex anthropic context in Rome, Italy*, Science of The Total Environment, 690, 1355-1368. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.526

Sitografia

[1] http://www.arpalazio.net/main/aria/sci/qa/misure/PM10.php
[2] https://www.arpalazio.it/documents/20124/55931/Monitoraggio_via_di%20_Salone_2017.pdf
[3] https://duomo.firenze.it/it/opera-magazine/post/9611/al-via-il-biomonitoraggio-dell-aria-all-interno-del-duomo-di-firenze
[4] https://www.repubblica.it/green-and-blue/dossier/transizione-ecologica-musei/2024/01/02/news/guggenheim_venezia_dipinti_inquinamento-421765353/
[5] https://www.huffingtonpost.it/dossier/terra/2022/03/08/news/quando_gli_alberi_difendono_gli_affreschi_di_raffaello-8917409/
[6] https://www.lanazione.it/firenze/cronaca/firenze-al-via-il-primo-monitoraggio-dellaria-dentro-al-duomo-f02a1eed
[7] https://www.newscientist.com/article/2323524-trees-are-protecting-raphael-paintings-by-soaking-up-pollution-in-rome/
[8] https://www.earth-prints.org/bitstream/2122/14503/1/Miscellanea-ASL.pdf

ACQUA

Oceano e clima, un legame indissolubile

Vincenzo Artale*

**già Dirigente di Ricerca ENEA ed attualmente associato di ricerca senior INGV e ISMAR-CNR*

L'estate si avvicina, fa caldo, fa freddo, piove tantissimo quando non ce lo aspettiamo. Non capiamo più niente, siamo disorientati, impauriti. Ci lamentiamo che le stagioni non sono più quelle di una volta.

Può capitare che, in piena **estate**, l'accadimento di uno di questi eventi non aspettati, che gli esperti chiamano **estremi**, ci induca a riflettere. E non più dal solito e consueto punto di osservazione costituito dal lettino in affitto sulla spiaggia davanti al Castello di Santa Severa, ma in piedi sulla sabbia umida e con l'ombrello in mano, su questa immensa distesa d'acqua in continuo ed instancabile movimento che può, ad alcuni, indurre calma, ma ad altri innervosire! Comunque, cogliamo questo attimo di abbandono per svelare i segreti di questo misterioso e morbido fluido, troppo spesso poco considerato, che ci circonda e che si sviluppa per i tre quarti della superficie terrestre.

I movimenti del mare

Il mare, o meglio l'oceano, non è per niente calmo!
Le masse d'acqua di cui è costituito sono in continuo movimento partendo dagli strati superficiali fino a quelli più profondi. L'oceano è un fluido che non raggiunge mai uno stato di equilibrio: su di esso agiscono continuamente delle forze, principalmente di gravità e di attrito indotte dal vento, che lo deviano continuamente dagli stati di equilibrio via via conquistati con fatica.

Perché succede questo?

Perché la Terra è un oggetto di forma geometrica quasi sferica che ruota intorno ad un asse (immaginario) inclinato di circa 23 gradi. Per questo motivo il calore che essa riceve dal Sole non è uniformemente distribuito lungo la sua superficie: all'equatore ne riceve tanto, anche troppo, perché la radiazione solare gli arriva bella dritta, mentre ai poli ne riceve poco, troppo poco, perché la radiazione solare gli arriva di sbieco. Questo fa sì che all'equatore la colonna d'acqua si espanda mentre ai poli si comprima.
A questo punto entra in gioco la **gravità**, ossia quella forza di richiamo che ci fa tenere i piedi per terra e che non ci permette di galleggiare in aria. Questa forza non può ammettere che ci siano fluidi più leggeri sovrastati da quelli più pesanti. Per mettere le cose "a posto" spinge il fluido più caldo, agevolato anche dalla rotazione terrestre (la forza apparente di Coriolis), in direzione di quello più freddo, attivando così un potente meccanismo capace di mettere in moto enormi trasporti di calore e di massa tra l'equatore ed il polo.
Questo meccanismo è detto **circolazione termoalina** e coinvolge l'intera massa d'acqua oceanica. Per esempio, il Nord Atlantico riceve circa 1 Pwatt (10^{15} watt) di calore attraverso la Corrente del Golfo e la Corrente Nord Atlantica. Questa quantità di energia è circa 10.000 volte maggiore di quella necessaria a soddisfare le esigenze energetiche dell'intera umanità! Questo calore è successivamente scambiato con l'atmosfera rendendo per esempio il clima dell'Europa occidentale più mite.

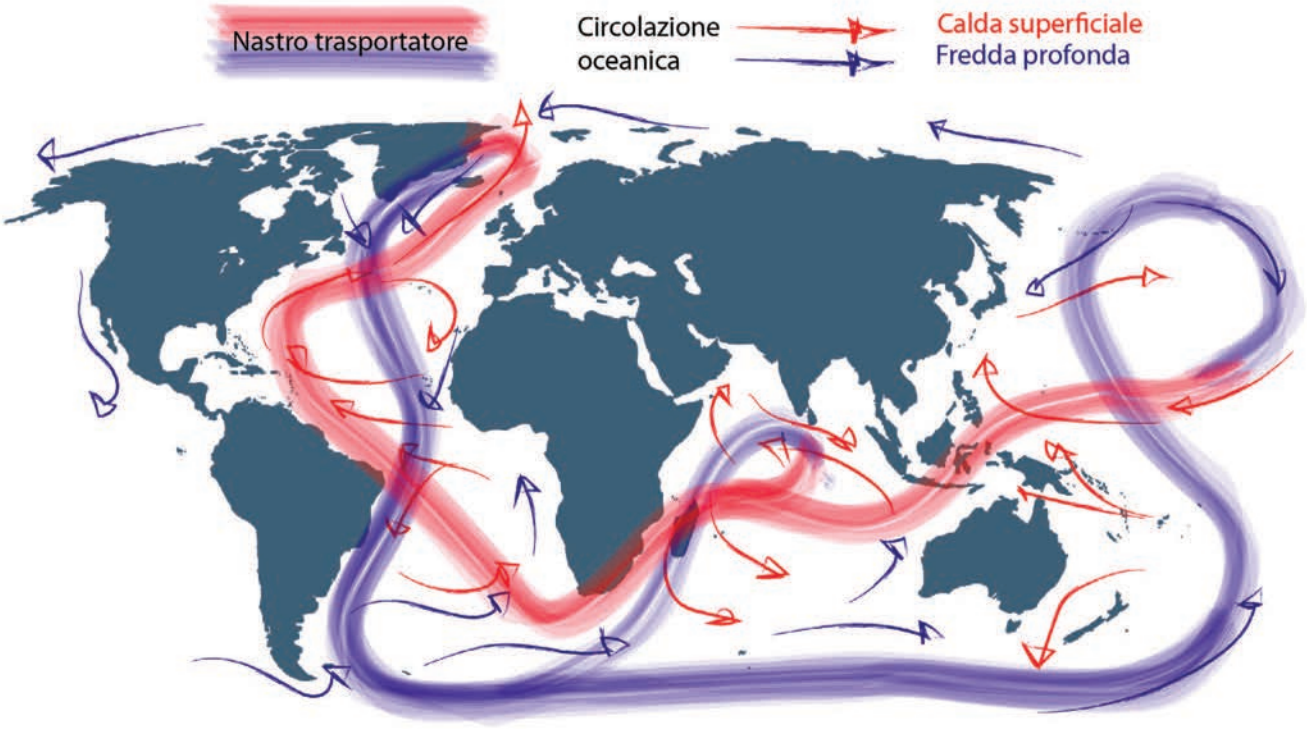


Figura 1 Rappresentazione sintetica della circolazione oceanica. In rosso la circolazione dell'acqua calda, in viola quella dell'acqua fredda. (Grafica di M. Locritani)

Figure 1 *Summary of global ocean circulation. In red the superficial circulation of warm water, in purple the deep circulation of cold water. (Graphics by M. Locritani)*

Quello sopra descritto non è il solo meccanismo che smuove continuamente l'oceano dai suoi stati di equilibrio. Ne esiste un altro ugualmente importante, anche se influenza soprattutto la parte superficiale dell'oceano. È quello indotto dallo stress (attrito) del vento sulla superficie marina. La circolazione indotta dal vento ha un impatto enorme su tutte le attività umane, dalla pesca alla navigazione e alle attività antropiche costiere. Meno da un punto di vista climatico.
Spesso tutti i processi connessi con la circolazione oceanica, sia quella termoalina che quella indotta dal vento, vengono semplificati introducendo un "paradigma concettuale" abbastanza efficace nel sintetizzare le complesse interazioni (caotiche e non-lineari) tra atmosfera e oceano, in cui il trasporto di calore, acqua dolce e traccianti (per esempio il sale) è rappresentato come un **gigantesco moto circolare verticale**, indicato appunto come "nastro trasportatore oceanico".

Circolazione Oceanica e clima

Da un punto di vista climatico la circolazione oceanica riveste un'importanza fondamentale. Questa affermazione è la diretta conseguenza della intrinseca instabilità del sistema accoppiato oceano-atmosfera. Qui la stabilità e l'intensità della circolazione oceanica, e proporzionalmente anche la quantità di calore trasportato, dipendono da piccole differenze di densità, che dipendono a loro volta da un delicato equilibrio che ha luogo nel Nord Atlantico tra raffreddamento alle alte latitudini e apporto d'acqua dolce (meno densa) dovuta a pioggia, neve e fiumi.
Un eccesso di apporto d'acqua dolce (come quello che si sta verificando a causa della fusione dei ghiacci artici) riduce l'intensità della circolazione oceanica, ma non in modo lineare. All'inizio il meccanismo convettivo, un processo che mantiene vivo il nastro trasportatore di cui sopra,

continua ad essere attivo e la circolazione oceanica superficiale continua a rimuovere l'acqua meno salata superficiale ed a sostituirla con quella più salata proveniente da sud. Tuttavia, questo meccanismo ha dei **punti critici**, sorpassati i quali la circolazione oceanica comincia ad oscillare tra diversi stati di equilibrio, tra cui è compreso anche quello compatibile con un eventuale suo blocco. Per questo il Nord Atlantico viene chiamato il "tallone d'Achille" del clima.
Se la circolazione oceanica, soprattutto quella meridionale (tra l'equatore ed i poli), si bloccasse completamente o rallentasse significativamente, **lo scenario più probabile prevedrebbe picchi di anomalia negativa di temperatura nel Nord Europa di più di 10 gradi.**
Lo studio di questi eventi, pur non dando nessuna indicazione certa sul clima futuro, è importante perché ci dà la consapevolezza che eventi catastrofici nella **circolazione oceanica hanno fortissimi impatti sulla variabilità climatica globale** e possono verificarsi a causa di fattori antropici in concorso con quelli che possono essere considerati instabilità insite al sistema oceano-atmosfera.
Il riscaldamento globale per esempio, dovuto ai gas–serra, può contribuire ad aumentare sia la temperatura superficiale dell'oceano che la piovosità alle alte latitudini. Entrambi questi fattori danno un contributo negativo alla densità superficiale riducendo così il motore della circolazione termoalina, come sembra stia succedendo dalle misure sperimentali analizzate recentemente.
A questo punto la domanda cruciale è: **quanto siamo vicini a questi punti critici?**
In base a numerosi lavori scientifici, sintetizzati nell'ultimo report dell'IPCC, il punto di non ritorno sembra siano **2°C di aumento medio della temperatura globale della Terra** e un valore pari a 500 ppmv (parti per milione in volume) di CO_2 in atmosfera.
E purtroppo sembra che a questi valori critici di non ritorno, i tipping point, ci stiamo arrivando, anche piuttosto velocemente.

Il Mar Mediterraneo

Trattiamo qualcosa di molto concreto che ci riguarda in prima persona, ossia lo stato del nostro **Mar Mediteranno**. Recentemente, dalle analisi di lunghe serie temporali di temperatura, si può affermare con certezza che il Mediterraneo ha la febbre.
Per sostenere con elementi oggettivi questa affermazione vediamo alcuni elementi essenziali sul funzionamento del nostro bel bacino mediterraneo e le similarità che esso ha con l'oceano globale.
Il Mar Mediterraneo, nonostante abbia dimensioni trascurabili in confronto ai grandi oceani, è un bacino in cui avvengono, a scala più piccola, una varietà di processi ed interazioni atmosfera-oceano tipiche dei grandi oceani. Addirittura, gli oceanografi considerano il Mediterraneo un laboratorio per lo studio dei processi chiave che riguardano l'intera circolazione oceanica.
Uno dei dati importanti da tenere in considerazione riguarda il consumo dell'acqua per evaporazione che nel Mediterraneo risulta essere **maggiore** di quella ricevuta grazie alla pioggia e ai fiumi. In media il deficit è di circa **1 metro l'anno**. Quindi il generoso Atlantico, tramite lo stretto di Gibilterra, fornisce ciò di cui il bacino ha bisogno.
Questo è l'elemento chiave per comprendere la circolazione del Mediterraneo e la formazione e trasformazione delle sue acque.
L'acqua atlantica (AW) che entra nel Mediterraneo forma uno strato d'acqua superficiale variabile sia nello spessore (100-200 metri) sia nei valori di temperatura e salinità, circa 36 grammi di sale su un litro d'acqua. Un valore apparentemente piccolo, ma il cui ruolo invece è cruciale nella circolazione oceanica. Questa acqua lungo il suo percorso evapora, ma il sale non lo fa! Rimane nell'acqua dove assolve lo stesso ruolo dei pesi per i sommozzatori: più sale rimane in gioco in superficie, più a fondo va lo strato d'acqua.

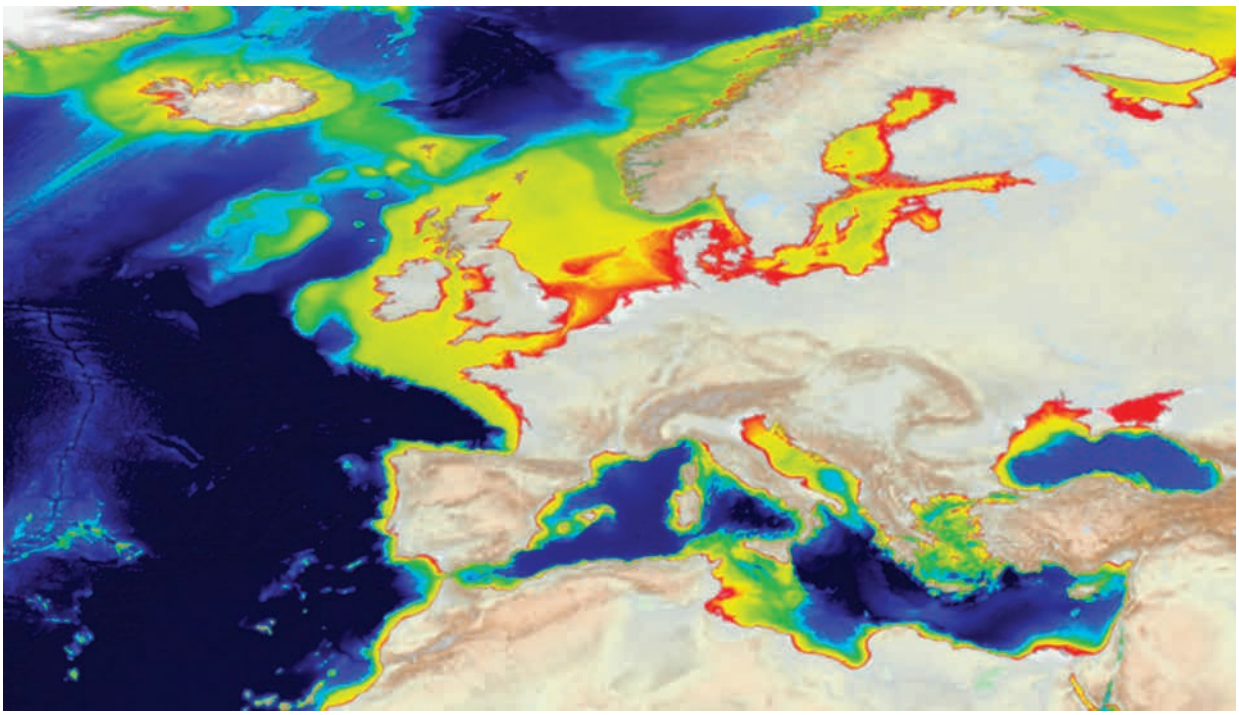


Figura 2 Topografia del Mar Mediterraneo, con una profondità media di 1750 metri, con profondità maggiori di 4000 metri nella piana abissale del Mar Ionio e di 3.800 metri nel Mar Tirreno e con lo Stretto di Gibilterra, con profondità media di circa 300 metri che connette il bacino mediterraneo con il Nord Atlantico. (Crediti immagine EMODnet Bathymetry, https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry)

***Figure 2** Topography of the Mediterranean Sea, with an average depth of 1750 metres, reaching depths of over 4000 metres in the abyssal plain of the Ionian Sea and 3.800 metres in the Tyrrhenian Sea, and the Strait of Gibraltar, with an average depth of about 300 metres, which connects the Mediterranean basin to the North Atlantic. (Credits EMODnet Bathymetry, https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry)*

Il grosso di questa acqua continua così il suo percorso lasciandosi la costa africana sulla destra (a causa della **forza di Coriolis**). Nella parte orientale del bacino, vicino all'isola di Rodi, in virtù dei venti intensi Etesiani, si forma un'acqua intermedia, detta acqua levantina (LIW), con caratteristiche saline molto elevate (a questo punto l'acqua ha acquistato quasi tre grammi in più per chilo, quasi il massimo possibile nel Mediterraneo!) e con una temperatura relativamente elevata (circa 14.5 gradi centigradi).

La maggiore densità produce una corrente che attraversa tutto il bacino mediterraneo fino a tornare nell'Atlantico. Il funzionamento è simile a quello delle scale mobili: quando lo scalino ha finito di trasportarvi in cima, sparisce e ricompare all'inizio della scala, pronto a ripetere lo stesso lavoro. Allo stesso modo il flusso dell'acqua levantina, propagandosi principalmente in modo antiorario (ciclonico), ad una profondità tra i 200-800 metri, dopo intense variazioni di temperatura e salinità dovute al mescolamento con altre acque incontrate lungo il suo cammino, finalmente arriva nell'Oceano Atlantico, dopo circa 20 anni.

Ora manca ancora una informazione importante per completare la storia del Mediterraneo. Manca un fondamentale elemento caratteristico della conveyor belt mediterranea (la scala mobile oceanica!): la **produzione d'acqua profonda** (DW), che costituisce un importante **indicatore climatico**. Questo tipo d'acqua si forma principalmente nel **Golfo del Leone**, nel Nord e Sud Adriatico, nella regione Nord-Est del bacino Levantino e nel Mar Egeo. Qui formazioni d'acque dense avvengono durante intensi fenomeni evaporativi, in cui l'oceano cede all'atmosfera notevoli quantità di calore a causa dei venti freddi e secchi che perturbano la superficie marina (e.g. Maestrale, Etesiani e Bora), lasciando a disposizione tantissimo sale in

poco tempo (3-4 giorni). Questo rende instabile l'acqua superficiale che si inabissa improvvisamente, ventilando l'intera colonna d'acqua e ossigenandola in modo da garantire così la sopravvivenza dell'intero sistema bio-geo-chimico marino.

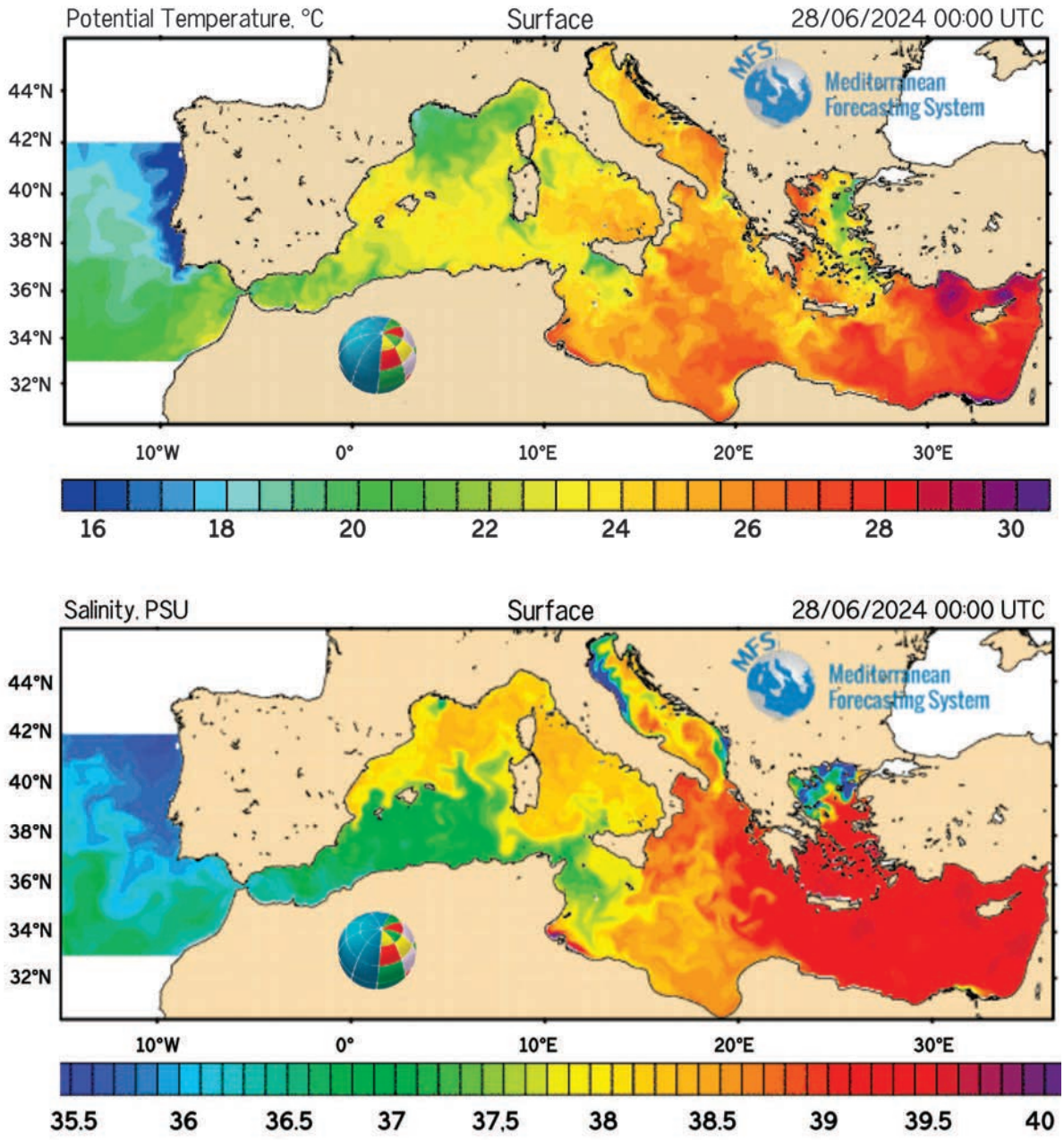


Figura 3 Mappa della temperatura e della salinità delle acque superficiali del Mediterraneo. (Crediti Mediterranean Forecast System)

***Figure 3** Map of the surface temperature and salinity of the Mediterranean waters. (Credits Mediterranean Forecast System)*

Una caratteristica interessante di questi fenomeni consiste nella limitata dimensione spaziale e temporale in cui si verificano a fronte dell'enorme impatto sull'intera circolazione generale. Anche negli oceani le aree dove si verificano questi fenomeni sono molto limitate. Un esempio è il caso del Nord Atlantico dove un ruolo simile lo gioca la regione sub-polare del Labrador. Questi processi sono vitali e **quando si interrompono il mare muore** per mancanza di ossigeno. È già accaduto decine di volte negli ultimi milioni di anni ma questo certo non ci può consolare, nè tantomeno deresponsabilizzare in base alla considerazione secondo cui l'uomo milioni di anni fa non esisteva.

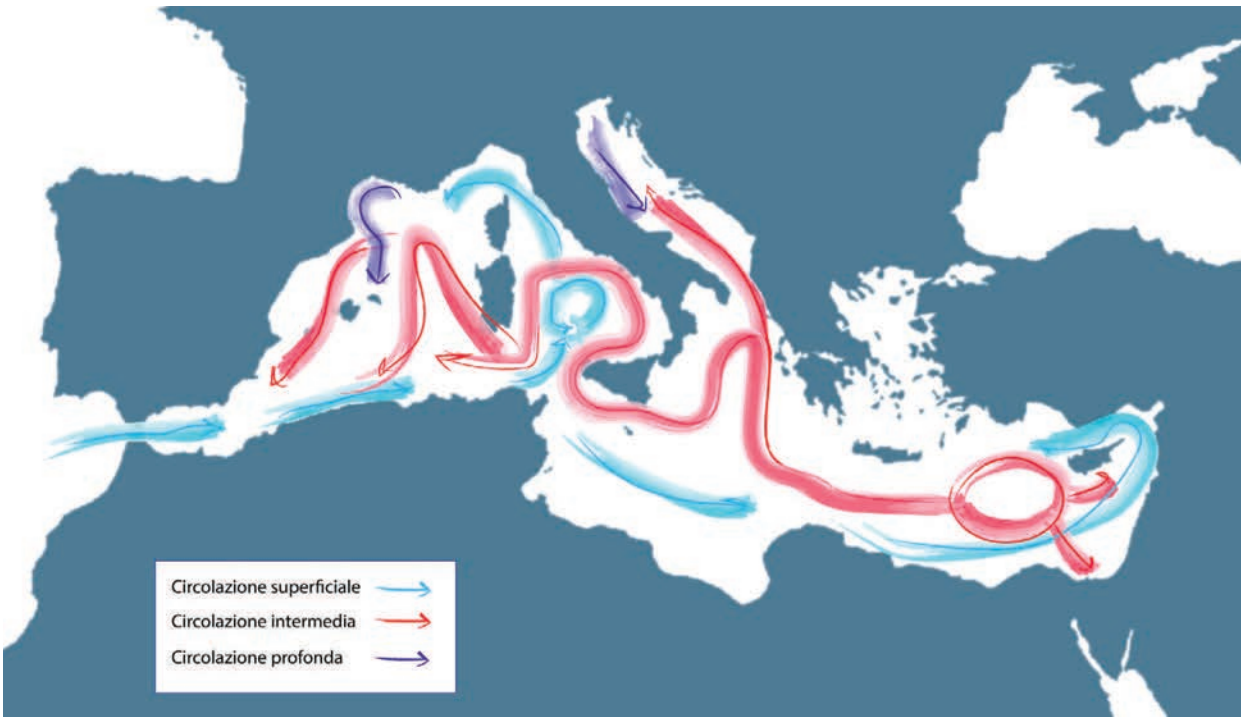


Figura 4 Schema della circolazione superficiale, intermedia e profonda nel Bacino Mediterraneo. (Grafica di M. Locritani)

Figure 4 Scheme of the superficial, intermediate and deep circulation of the Mediterranean Basin. (Graphics by M. Locritani)

Bibliografia

Artale V., Falcini F., Marullo S., Bensi M., Kokoszka F., Iudicone D., Rubino A., (2018). *Linking mixing processes and climate variability to the heat content distribution of the Eastern Mediterranean abyss*, Nature, Scientific Reports, 8, 11317. https://doi.org/10.1038/s41598-018-29343-4

Chiggiato J., Artale V., de Madron X. D., Schroeder K., Taupier-Letage I., Velaoras D., Vargas-Yáñez M., (2023). *Chapter 9 – Recent changes in the Mediterranean Sea*, Editor(s): Katrin Schroeder, Jacopo Chiggiato, Oceanography of the Mediterranean Sea, Elsevier, 289-334, ISBN 9780128236925. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823692-5.00008-X

De Toma V., Artale V., Yang C., (2022). *Exploring AMOC Regime Change over the Past Four Decades through Ocean Reanalyses*. Climate, 10(4), 59. https://doi.org/10.3390/cli10040059

Lo Bue N., Artale V., Schroeder K., (2021). *Editorial: Impact of Deep Oceanic Processes on Circulation and Climate Variability: Examples from the Mediterranean Sea and the Global Ocean*. Frontiers in Marine Science, 8, 801479. https://doi.org/10.3389/fmars.2021.801479

Pisano A., Marullo S., Artale V., Falcini F., Yang C., Leonelli F.E., Santoleri R., Buongiorno Nardelli B., (2020). *New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations*. Remote Sensing, 12(1), 132; https://doi.org/10.3390/rs12010132

Yang C., Leonelli F.E., Marullo S., Artale V., Beggs H., Buongiorno Nardelli B., Chin T.M., De Toma V., Good S., Huang B., Merchant C.J., Sakurai T., Santoleri R., Vazquez-Cuervo J., Zhang H.-M., Pisano A., (2021). *Sea surface temperature intercomparison in the framework of the Copernicus climate change service (C3S)*. Journal of Climate, 34(13), 5257–5283; https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0793.1

Yang C., Cagnazzo C., Artale V., Volpe G., Santoleri R., (2022) *Independent Quality Assessment of Essential Climate Variables*. Bulletin of the American Meteorological Society, 103(9), E2032–E2049; https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0109.1

Mediterraneo: siamo consapevoli dei rischi dell'aumento del livello del mare indotti dai cambiamenti climatici?

Marco Anzidei

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

La scarsa consapevolezza e le lacune di conoscenza sulle cause e gli impatti attesi di aumento del livello del mare, hanno importanti implicazioni sulle politiche di adattamento da adottare nel prossimo futuro per la salvaguardia delle popolazioni costiere del Mediterraneo.

L'8 luglio di ogni anno si celebra la **Giornata Internazionale del Mar Mediterraneo**, bacino stretto tra due terre, L'Africa a sud e l'Eurasia a nord, dove si affacciano **23 Paesi di 3 continenti** su una superficie pari all'**1% di tutti gli Oceani**. Così come lo vediamo oggi con i nostri occhi o dallo spazio attraverso sofisticati sensori satellitari, è il prodotto degli incessanti processi geologici che lo hanno plasmato durante gli ultimi milioni di anni. Movimenti delle placche continentali, terremoti, maremoti, eruzioni vulcaniche e cambiamenti climatici hanno formato valli e catene montuose sottomarine e sommerse, coste frastagliate e pianure.

I cambiamenti morfologici del Mediterraneo

Il fattore principale che ha più volte cambiato la morfologia delle coste del Mediterraneo, sono le oscillazioni del livello marino indotte dai ripetuti accrescimenti e depauperamenti delle calotte glaciali avvenute nel passato geologico in conseguenza dei cambiamenti climatici. L'ultimo massimo glaciale avvenuto tra 18.000 e **22.000 anni fa** durante un periodo più freddo dell'attuale, causò una diminuzione del livello marino di circa 130 m. Il successivo riscaldamento climatico causò la progressiva fusione delle calotte glaciali e l'espansione termica degli oceani con il conseguente aumento del livello del mare globale che, in pochi millenni, cambiò la forma delle coste dei 5 continenti e delle isole di tutto il pianeta. L'aspetto che ha oggi il Mediterraneo è, pertanto, quello che corrisponde all'ultimo istante della sua continua evoluzione. La morfologia del bacino continuerà a mutare nelle prossime migliaia e milioni di anni, così come avvenuto fino ad oggi. I processi geologici e climatici rimangono la causa più importante per i cambiamenti morfologici e le condizioni ambientali di questo bacino. I 46.000 km di coste del Mediterraneo, oggi più che in precedenza, sono esposte agli effetti del cambiamento climatico, principalmente causato dalle attività umane e dalla sempre maggiore pressione antropica avvenuta a partire dall'inizio dell'era industriale, intorno al 1800, come riportato dall'Intergovernmental Panel on Climate Change (Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico [1]) nell'ultimo Rapporto AR6 del 2021 (vedi anche questo post [2]). La fascia costiera, in particolare le coste basse e sabbiose, le pianure costiere, i delta fluviali, le lagune e le aree di bonifica, stanno quindi subendo una continua erosione e arretramento della linea di costa con conseguente progressiva invasione marina a causa dell'aumento del livello marino che in questo momento sta procedendo alla velocità di circa 40 cm per secolo. Queste zone, spesso di alto valore ambientale ed economico, sono particolarmente vulnerabili ai multirischi costieri (inclusi i maremoti, le tempeste estreme e le frane sottomarine), in particolare quando il livello del mare sarà più alto di oggi. Le proiezioni per i prossimi decenni pubblicate dall'IPCC, **stimano un aumento del livello marino fino a circa 1 m entro l'anno 2100**, con la possibilità che questo aumento possa raggiungere 1.5 m circa a causa delle possibili instabilità dei ghiacci della Groenlandia e di parte dell'Antartide.

L’impatto sulle popolazioni costiere

L’aumento di livello marino sta già avendo importanti impatti ambientali e socio-economici sulle popolazioni rivierasche. Salinizzazione delle falde acquifere costiere (cuneo salino), subsidenza e arretramento costiero sono responsabili dell’85% dei costi dei danni lungo le coste del Mediterraneo. La perdita economica prevista per la perdita dei litorali e del loro patrimonio naturale e culturale viene stimata intorno ai **18 miliardi di euro** per il periodo 1908–2080.
Poiché molti paesi del Mediterraneo sono fortemente dipendenti dal turismo e da altre attività costiere, come agricoltura, allevamento e industria marittima, si prevede che gli impatti economici saranno molto presto significativi. Ad esempio, in Catalogna (Spagna) l’avanzamento del mare potrebbe portare a una diminuzione del 20% del PIL legato al turismo, mentre la produzione di riso nel delta del fiume Ebro potrebbe ridurre i profitti degli agricoltori fino a circa 300 Euro per ettaro.
Con questi scenari, qual è la consapevolezza dell’aumento del livello marino nelle popolazioni costiere del Mediterraneo dove oggi vivono circa 450 milioni di persone (che potranno diventare 700 milioni nel 2100), distribuite tra grandi città marittime e piccoli villaggi posti anche meno di 2 m al di sopra del livello medio del mare?



Figura 1 L’area naturale del delta dell’Ebro (Spagna). (Foto di M. Anzidei)
Figure 1 *The natural area of the Ebro Delta (Spain). (Photo by M. Anzidei)*

Un recente studio [3] finanziato dalla Protezione Civile Europea nell’ambito dei progetti europei SAVEMEDCOASTS [4] e SAVEMEDCOASTS-2 [5], in alcune aree costiere del Mediterraneo altamente vulnerabili, ha coinvolto circa 100 stakeholder (parti interessate) attraverso un metodo partecipativo. Attraverso incontri specifici, si è cercato di individuare divari e necessità per

favorire lo sviluppo di strumenti politici più idonei per affrontare il rischio di aumento di livello marino, attraverso l'implementazione di un percorso innovativo per coinvolgerli nei processi politici decisionali. È stato così possibile individuare alcune possibili soluzioni di adattamento a questo fenomeno, anche in condizioni meteorologiche estreme, al fine di mitigare gli impatti che ne derivano anche attraverso soluzioni naturali, "*natural based solutions*" (ad es. realizzando barriere in materiali naturali come il legno o impiantando posidonie nei fondali presso la costa per ridurre l'erosione).
Lo sviluppo di specifiche "Policy Tools" ha permesso di identificare questioni rilevanti che dovrebbero essere prese in considerazione per la definizione delle politiche di adattamento. In particolare, per colmare lacune conoscitive, favorire la percezione, facilitare lo scambio di conoscenze e promuovere l'apprendimento sociale attraverso una efficace comunicazione scientifica verso la popolazione esposta. **I rischi non sono ben compresi,** in particolare nella misura necessaria per aumentare la consapevolezza in modo da attuare appropriate politiche necessarie ad intraprendere misure di mitigazione e adattamento. Un approccio più consolidato tra scienziati, decisori politici e parti interessate coinvolte nella gestione dei vari aspetti ed effetti causati dall'aumento del livello marino, è indispensabile per colmare il divario tra scienza e politica. Tra gli strumenti più efficaci per la comunicazione del rischio, sono state individuate le mappe di scenari attesi e degli effetti a cascata, anche socio-economici, accompagnate dai grafici con le proiezioni di livello marino fino al 2100-2150. Questi dati hanno suscitato forte interesse negli stakeholder, rimarcando quanto sia importante il loro coinvolgimento nei processi decisionali, sulla base delle percezioni e necessità, incoraggiandoli a identificare soluzioni adeguate.

Riluttanti ad arretrare

Tuttavia, sebbene le parti interessate comprendono i rischi dell'avanzamento del mare nelle loro aree costiere più esposte e vulnerabili, non sono in genere disposte a suggerire o accettare azioni di "arretramento", come soluzione. La riluttanza ad "arretrare" è dovuta al fatto che le persone tendono ad accettare il rischio di vivere nella loro zona. Alcuni ammettono una discrepanza tra "percezione della realtà, componente emotiva e proprietà", con una "speranza irrazionale nel dubitare di questo problema per paura della perdita di turisti, investitori e residenti".

Mancanza di volontà politica di agire

Secondo le parti interessate, manca la volontà politica di agire contro il cambiamento climatico. Uno stakeholder ha dichiarato: "lo stato pensa alle prossime elezioni invece che alla popolazione, mentre i politici locali pensano alla prossima stagione turistica" (riferendosi ai profitti attesi dal turismo). La mancanza di sostegno politico viene spesso identificata come un importante ostacolo per la pianificazione territoriale e il processo decisionale. L'adattamento richiede infatti strategie a lungo termine mentre i politici lavorano a brevi orizzonti temporali (dipendente dalla durata del loro mandato politico). Quindi, il processo decisionale politico diventa lento anche per le difficoltà di coordinamento tra più amministrazioni che hanno disparate competenze sulle stesse coste.
In conclusione, scarsa consapevolezza, lacune di conoscenza sui cambiamenti climatici e loro effetti sull'aumento del livello del mare, hanno implicazioni importanti sui tempi di risposta e sulle soluzioni di adattamento da adottare. Ad esempio, a Venezia, le parti interessate hanno espresso preoccupazione se fossero stati utilizzati dati scientifici aggiornati per il completamento del MoSE [7]. Questa barriera mobile che tutela la città di Venezia e la sua laguna contro eventi estremi di acqua alta, è stata progettata circa 40 anni prima che diventasse operativa, sebbene

sia stata sottoposta a continui aggiornamenti durante la sua realizzazione. Ciò ha sollevato dubbi in merito alla sua futura funzionalità alla luce delle ultime proiezioni di aumento di livello marino per i prossimi decenni, anche per la maggiore energia e frequenza che hanno gli eventi meteorologici estremi, come avvenuto il 12 novembre 2019 quando il livello idrometrico a Punta della salute ha raggiunto un picco di 189 cm, il secondo livello più alto dal 1872, anno di inizio delle registrazioni.

Sulla base delle conoscenze generiche che ha la popolazione circa la funzionalità e l'efficacia del MoSE, cogliamo l'occasione per fornire alcune informazioni rilevanti sulle fasi di progettazione e realizzazione di queste barriere mobili che stanno salvando Venezia [6]. Le date più importanti iniziano nel 1984 quando un'apposita legge del governo italiano definì gli obiettivi per salvaguardare Venezia e la sua laguna dall'innalzamento del livello del mare e dagli eventi di acqua alta. Nel 1994 il Consorzio Venezia Nuova (CVN) ricevette l'incarico di ideare, progettare e realizzare un sistema di barriere mobili sulle tre bocche di porto principali per controllare il flusso delle acque tra la laguna e il mare aperto. Nel 1995 un team di esperti internazionali consigliò la migliore soluzione tecnica che venne poi approvata dal governo italiano. Nel 1998 iniziò quindi la progettazione tecnica vera e propria del MoSE e nel 2003 venne aperto il primo cantiere alla bocca di Lido. È interessante notare che circa negli stessi anni, nel 1994, l'IPCC pubblicò il suo primo rapporto in cui prevedeva un aumento di livello marino globale di circa 20 cm entro il 2100. Questo valore fu inizialmente considerato nella progettazione del MoSE fino al 2007, quando il progetto fu migliorato proprio per poter proteggere la laguna per un dislivello alto fino a 3 metri tra la superficie marina in mare aperto e quella della laguna e per un aumento del livello del mare medio di 60 cm nel 2100.

Dal momento in cui il MoSE è diventato pienamente operativo, dal 30 giugno 2020 ad oggi le barriere sono state alzate già 78 volte (al 22 febbraio 2024), quasi azzerando gli effetti dannosi e pericolosi degli eventi di "acqua alta" sulla città di Venezia, la laguna e la popolazione locale.

Se il MoSE è oggi in grado di proteggere Venezia e la sua laguna, tante altre coste del mondo di alto valore storico, ambientale ed economico, rimangono esposte all'aumento di livello marino. Poiché sarebbe impossibile realizzare centinaia migliaia di km di barriere per proteggere le coste a rischio di tutto il pianeta, diviene indispensabile intraprendere delle azioni comuni e immediate per ridurre il riscaldamento globale. Riusciremo a diventare tutti più consapevoli che è urgente fermare le emissioni di gas serra per rallentare l'aumento del livello marino prima che questo salga oltre limiti critici per salvaguardare le popolazioni e le infrastrutture costiere?

Sitografia

[1] www.ipcc.ch
[2] https://ingvambiente.com/2023/07/04/il-cambiamento-climatico-nel-mediterraneo/
[3] https://civil-protection-humanitarian-aid.ec.europa.eu/index_en
[4] http://www.savemedcoasts.eu/
[5] http://www.savemedcoasts2.eu/
[6] https://www.mosevenezia. eu/?lang=en
[7] https://www.mosevenezia.eu/mose/

Impatto dei cambiamenti climatici nel Mediterraneo

Tommaso Alberti

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Il Mediterraneo è uno dei punti più vulnerabili ai cambiamenti climatici. È importante capire l'impatto dei cambiamenti attuali per mitigarne gli effetti in futuro.

Per la sua posizione strategica, circondata da Paesi europei a nord, nordafricani e mediorientali a sud-est, la regione mediterranea è molto importante dal punto di vista economico, politico e sociale. La sua rilevanza, anche in termini scientifici, è stata riconosciuta nell'ultimo rapporto AR6 dell'IPCC [1]: "***Il Mediterraneo è uno dei luoghi più importanti e vulnerabili ai cambiamenti climatici***".

È quindi urgente esaminare il possibile impatto di questi attuali e prossimi cambiamenti climatici per cercare di mitigare gli effetti.

Gli effetti del cambiamento climatico sul Mediterraneo

Normalmente, le temperature superficiali del Mar Mediterraneo sono più alte rispetto a quelle degli oceani, per effetto della sua posizione geografica, la sua natura di bacino semi-chiuso e il clima caldo delle regioni circostanti. Negli ultimi decenni, però, il Mediterraneo ha sperimentato un riscaldamento più rapido rispetto alla media globale, attribuito principalmente a vari fattori, tra cui cambiamenti climatici globali, cambiamenti nelle correnti oceaniche e nell'uso del suolo nella regione. Le temperature estive sono aumentate, con conseguenze dirette sulle risorse idriche, sull'agricoltura e sulla salute umana. Le ondate di calore sono diventate più intense, mettendo a rischio la sicurezza delle persone, in particolare i bambini, gli anziani e le persone con problemi di salute.

Le conseguenze del cambiamento climatico sono molteplici, vanno dal progressivo innalzamento del livello del mare a eventi meteorologici e marini estremi, ma anche siccità e desertificazione. Il livello del mare nel Mediterraneo, infatti, sta aumentando più velocemente rispetto alla media globale, minacciando le zone costiere e le infrastrutture. Le città costiere, i siti archeologici e gli ecosistemi costieri sono a rischio di erosione e allagamenti. Ad esempio, Venezia ha già affrontato fenomeni di Acqua Alta molto più intensi rispetto agli ultimi decenni [2], con sempre più frequenti attivazioni del sistema MoSE [3] di protezione. Inoltre, l'aumento del livello marino ha come conseguenza la salinizzazione delle falde acquifere costiere che sta minacciando le risorse idriche sotterranee, cruciali per l'approvvigionamento idrico di molte comunità, specialmente nel nord Africa.

Gli effetti del cambiamento climatico nel Mediterraneo si estendono anche agli ecosistemi marini. L'aumento delle temperature delle acque marine ha un impatto sulle specie marine, di cui si osserva una riduzione della biodiversità e la proliferazione di specie invasive, come ad esempio la recente comparsa del granchio blu nelle acque italiane. Inoltre, l'acidificazione degli oceani, causata dall'assorbimento di anidride carbonica da parte del mare, minaccia la sopravvivenza di organismi marini sensibili come i coralli e i molluschi.

Un altro effetto del cambiamento climatico nel Mediterraneo è rappresentato dalla diminuzione delle precipitazioni e dalla crescente aridità. Le piogge si sono ridotte in molte zone, mettendo sotto pressione le risorse idriche già limitate e contribuendo all'aumento del rischio di siccità.

Questo ha conseguenze significative sull'agricoltura, sull'ecosistema terrestre e sulla disponibilità di acqua potabile per le comunità locali.

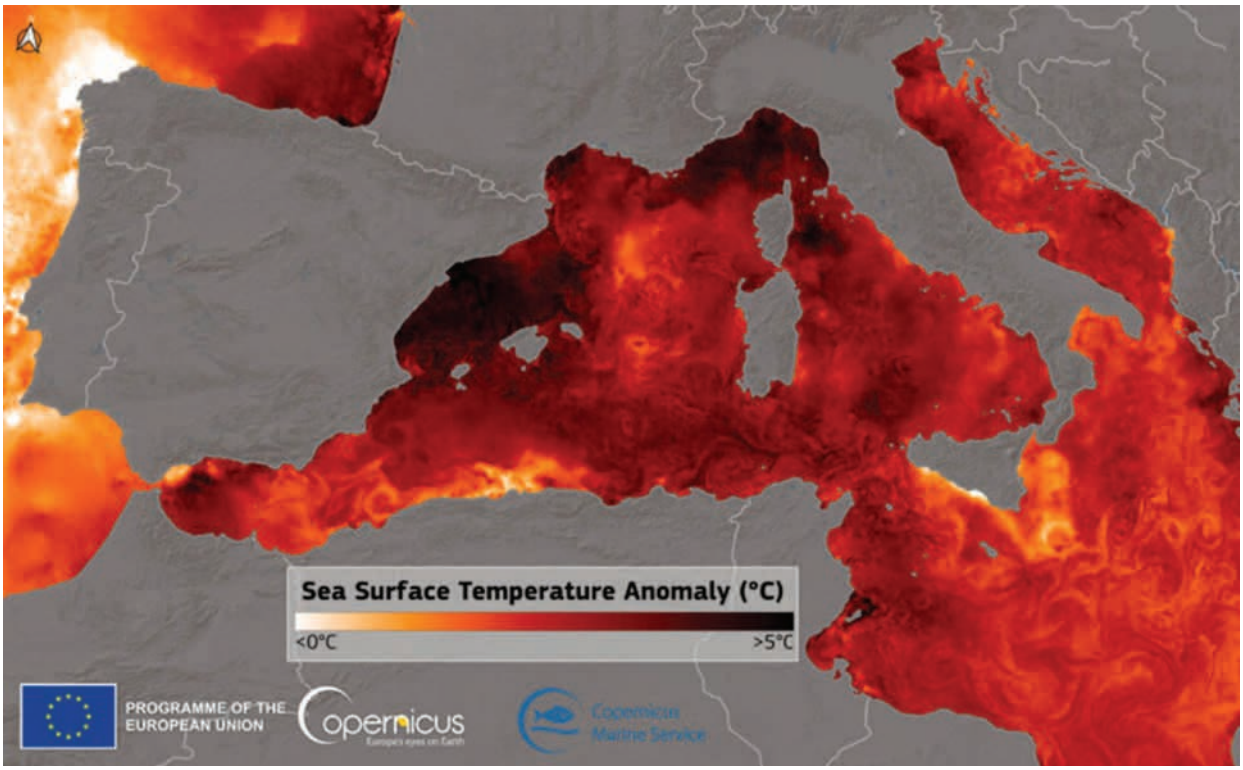


Figura 1 Variazione delle temperature delle acque del Mediterraneo rispetto al periodo pre-industriale (1750-1850) rilevato dal programma UE Copernicus. (Crediti: European Union, Copernicus Marine Environment Monitoring Service)

Figure 1 *Sea surface temperature anomalies of the Mediterranean with respect to the pre-industrial era (1750-1850) as derived from UE Copernicus. (Credits: European Union, Copernicus Marine Environment Monitoring Service)*

La scienza dell'attribuzione al cambiamento climatico

Tutti questi effetti richiedono sfide sempre più avvincenti dal punto di vista scientifico con lo sviluppo di metodologie di analisi e classificazione innovative. Una di queste è lo studio dell'attribuzione di eventi estremi ai cambiamenti climatici, un campo relativamente nuovo della scienza del clima, il cui concetto è stato teorizzato per la prima volta all'inizio degli anni 2000. L'idea originale è quella di confrontare la probabilità o l'intensità di un evento osservato, con la sua probabilità di verificarsi in un mondo immaginario in cui il cambiamento climatico indotto dall'uomo non esista.

Applicati al Mediterraneo tali studi mirano a determinare se il cambiamento climatico indotto dall'uomo abbia avuto un ruolo nel verificarsi di eventi meteorologici estremi e in che misura. Per fare ciò si prende in considerazione una serie di eventi estremi, tra cui ondate di calore, siccità, forti precipitazioni, inondazioni e cicloni.

I risultati mostrano che l'intensità e la frequenza delle ondate di calore nella regione mediterranea sono aumentate negli ultimi anni influendo anche sulla variabilità stagionale (le stagioni si presentano in anticipo/ritardo e/o variabili nella loro durata). Anche la frequenza, ma soprattutto l'intensità delle siccità sono analogamente aumentate, in particolare nei paesi del Mediterraneo meridionale e orientale. Queste tendenze sono verosimilmente legate in gran parte alle attività umane.

In alcuni casi è stato anche possibile quantificare il contributo del cambiamento climatico in specifici eventi estremi, come l'ondata di calore mediterranea del 2021 che ha battuto il record europeo di temperatura o la siccità euro-mediterranea del 2022.

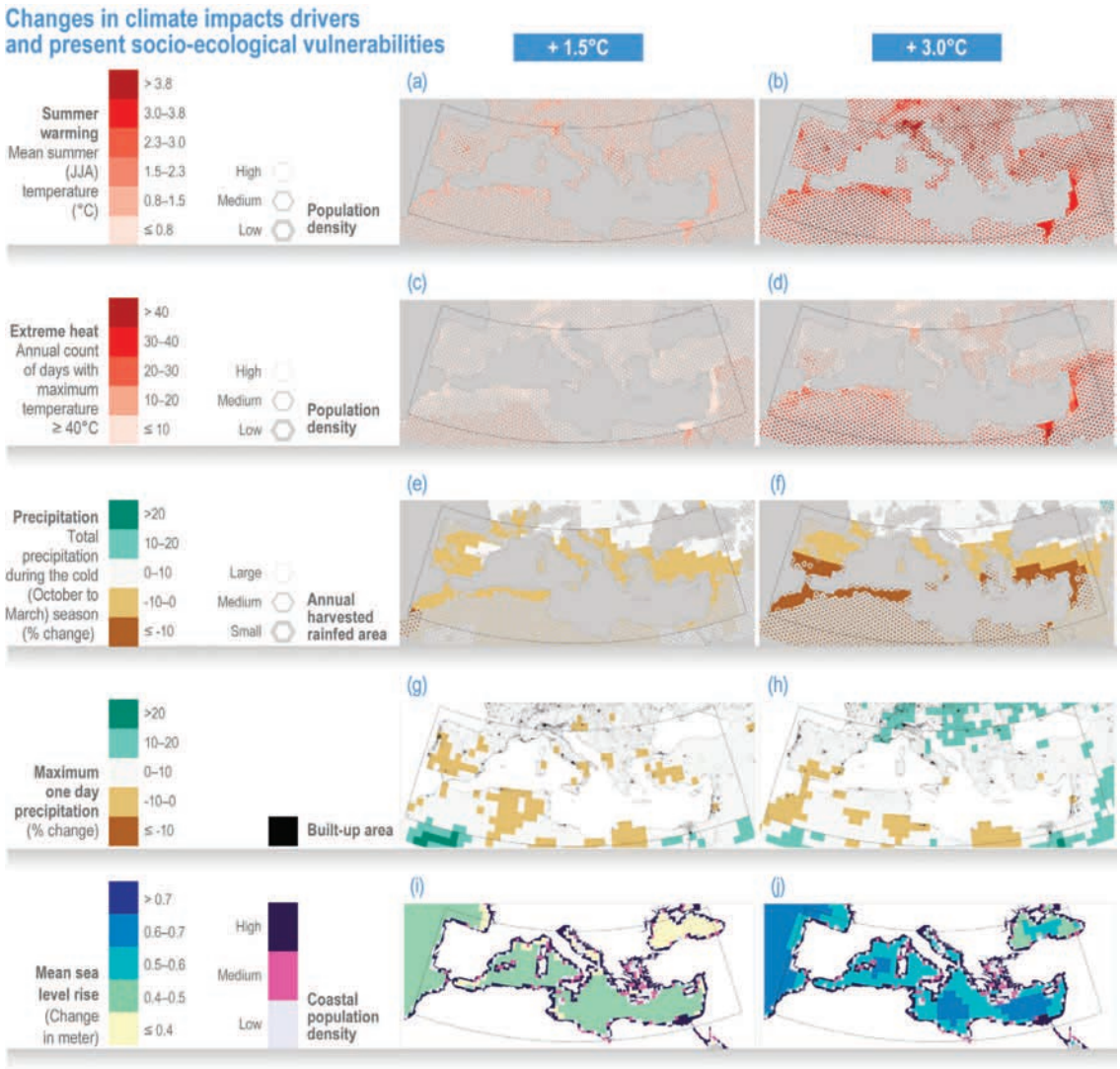


Figura 2 Cambiamenti nelle componenti che guidano l'impatto dei cambiamenti climatici rispetto al periodo 1995–2014 per effetto del riscaldamento globale di 1.5°C (colonna di sinistra) e 3°C (colonna di destra): temperatura media estiva (da giugno ad agosto) (°C, a, b), numero di giorni con temperatura massima superiore a 40°C (giorni, c, d), precipitazioni totali durante la stagione fredda (da ottobre a marzo) (%, e, f) e precipitazioni massime di 1 giorno (mm, g, h). Valori basati su proiezioni globali CMIP6 e SSP5-8.5 da [4].
Figure 2 *Changes in the components driving the impact of climate change compared to the period 1995–2014 due to global warming of 1.5°C (left column) and 3°C (right column): average summer temperature (from June to August) (°C, a, b), number of days with maximum temperature above 40°C (days, c, d), total precipitation during the cold season (from October to March) (%, e, f), and maximum 1-day precipitation (mm, g, h). Values based on CMIP6 and SSP5-8.5 global projections [4].*

Studi di attribuzione di eventi climatici estremi nel bacino del Mediterraneo, come ad esempio quelli presentati dalla piattaforma ClimaMeter [5], suggeriscono che i cambiamenti climatici causati dall'uomo stanno già avendo un impatto significativo sulla regione, in particolare sul ciclo idrologico e sull'aumento del rischio di incendi. È probabile che la situazione peggiori in futuro se le emissioni globali di gas serra non saranno ridotte in modo significativo.

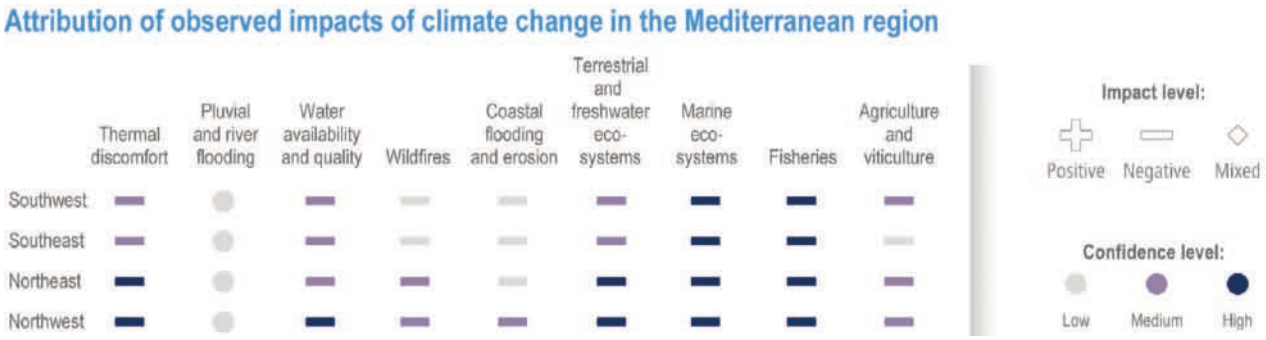


Figura 3 Attribuzione degli impatti osservati dei cambiamenti climatici nelle diverse regioni dell'area mediterranea. I colori rappresentano il livello di accuratezza della stima, mentre i simboli si riferiscono ad effetti positivi (+), negativi (-), o misti. Si può notare come tutti gli effetti siano negativi in qualsiasi zona geografica del Mediterraneo con un alto livello di accuratezza [4].

Figure 3 *Attribution of observed climate change impacts in different regions of the Mediterranean area. The colors represent the level of estimation accuracy, while the symbols refer to positive (+), negative (-), or mixed effects. It can be noted that all effects are negative in any geographical area of the Mediterranean with a high level of accuracy [4].*

Cosa possiamo fare oggi

Per affrontare gli effetti del cambiamento climatico nel Mediterraneo è essenziale adottare strategie di mitigazione e adattamento. Ciò include la riduzione delle emissioni di gas serra attraverso l'adozione di politiche energetiche sostenibili e la promozione di energie rinnovabili. Inoltre, è necessario implementare misure di adattamento che migliorino la gestione delle risorse idriche, la pianificazione urbana, la tutela degli ecosistemi costieri e l'agricoltura resiliente al clima. La cooperazione internazionale è fondamentale per affrontare il cambiamento climatico nel Mediterraneo.

Occorre una sinergia tra i Paesi mediterranei che devono fare rete per condividere *know-how, best practices* e risorse al fine di affrontare le sfide comuni legate al cambiamento climatico. L'Unione Europea e altre organizzazioni regionali hanno un ruolo importante nel fornire supporto finanziario e tecnico per le azioni di mitigazione e adattamento nella regione. È fondamentale fornire ai responsabili politici uno scenario più accurato e credibile dei fattori che controllano la salute pubblica, la produttività agricola e industriale, nonché l'aumento degli eventi disastrosi. Affrontare il cambiamento climatico nel Mediterraneo richiede una risposta globale e un impegno a lungo termine. Solo attraverso sforzi concertati e collaborativi possiamo proteggere l'ambiente, preservare le risorse naturali e garantire un futuro sostenibile per le generazioni presenti e future.

Sitografia

[1] https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar6/
[2] https://www.ingv.it/stampa-e-urp/stampa/comunicati-stampa/5428-cambiamenti-climatici-ecco-il-legame-tra-gli-eventi-climatici-estremi-e-l-acqua-alta-a-venezia
[3] https://www.ingv.it/stampa-e-urp/stampa/comunicati-stampa/5387-venezia-e-mose-analizzati-gli-eventi-estremi-nella-laguna-di-venezia-e-la-loro-mitigazione-con-il-mose
[4] https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/ccp4/
[5] https://www.climameter.org/

Che clima ci attende? Ce lo dice il mare profondo

Nadia Lo Bue e Alessandra Giuntini

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

L'oceano, fondamentale nella regolazione climatica, sta subendo un riscaldamento continuo e significativo, con gravi implicazioni per il clima globale. Il Mar Mediterraneo, particolarmente vulnerabile, è ora monitorato da una nuova catena correntometrica (mooring) nel Mar Ionio per comprendere meglio i cambiamenti e le loro implicazioni globali.

L'oceano ha un ruolo determinante nella regolazione del nostro clima agendo come un trasportatore di calore grazie alle correnti marine che lo attraversano da un polo all'altro.
Nell'ultimo secolo l'Oceano, ha tuttavia subito un riscaldamento continuo e significativo, con gravi implicazioni per il clima globale. Il Mar Mediterraneo, particolarmente vulnerabile perché sta registrando aumenti molto più rapidi rispetto alla media globale, può contare oggi un nuovo importante punto di monitoraggio con la deposizione (nel 2021) di una nuova catena correntometrica (mooring) - GALATEA - nel Mar Ionio che ci aiuterà a studiare e comprendere meglio i processi connessi ai cambiamenti che stiamo registrando e le loro possibili implicazioni a più grande scala.
Le misure raccolte negli ultimi 50 anni dimostrano inequivocabilmente un **continuo e progressivo riscaldamento dell'oceano**, che sta assorbendo circa il 90% dell'eccesso di calore accumulato nel sistema climatico a causa di attività antropiche (Figura 1).

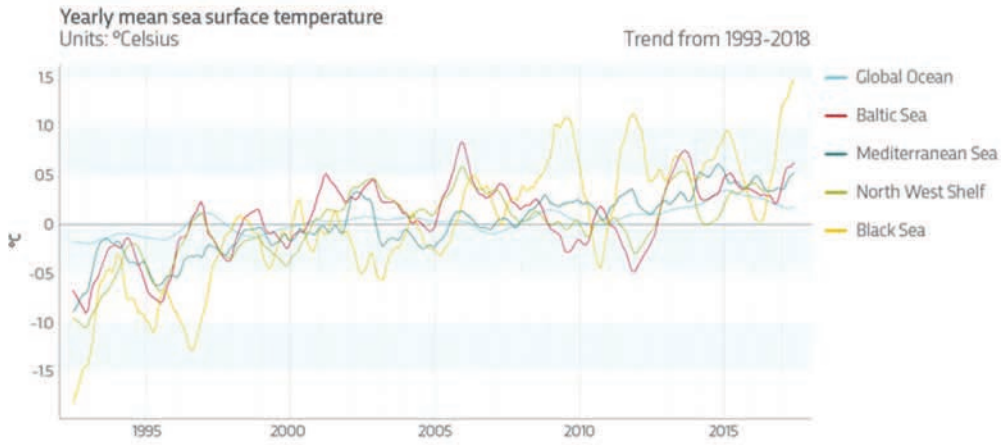


Figura 1 Andamenti di temperatura superficiale degli oceani (Sea Surface Temperature) misurati negli oceani globali e nei mari regionali europei dal 1993 al 2018. Da Copernicus Marine Ocean State Report 04 [von Schuckmann et al., 2020].
Figure 1 *Ocean surface temperature trends measured in global oceans and European regional seas from 1993 to 2018. From Copernicus Marine Ocean State Report 04 [von Schuckmann et al., 2020].*

Questo accumulo di energia termica, di fatto sottratta all'atmosfera, è tale da creare un **enorme sbilanciamento energetico a livello globale**. Di conseguenza, il calore che si sta immagazzinando negli oceani viene progressivamente rilasciato nuovamente in atmosfera. La modalità e la tempistica sono ancora lontane dall'essere note, ma il fenomeno comporterà un futuro certamente più caldo per tutta la Terra.

Quali sono i dati sul riscaldamento dell'Oceano?

L'avvento della tecnologia satellitare a partire dagli anni '70, ha permesso un monitoraggio continuo della **parte superficiale** dell'oceano su scala globale. Questo ha consentito di comprendere che del calore totale assorbito, più del 60% è accumulato effettivamente negli strati superficiali (0-700 m). La restante parte, circa il 30%, viene invece immagazzinata negli **strati più profondi**, sebbene la mancanza di una copertura ben distribuita di dati profondi non riesca ancora a dare un quadro complessivo del reale accumulo di tale energia.
In ogni caso i dati che abbiamo ci dicono che negli ultimi 50 anni le temperature sono aumentate di circa 0.014°C/anno, 0.7°C in mezzo secolo, impattando in modo significativo (e spesso irreversibile) su moltissimi ecosistemi [von Schuckmann et al., 2020].
Allo stato attuale il riscaldamento dell'oceano sta già contribuendo ad accelerare i processi connessi al cambiamento climatico, come nel caso dell'innalzamento del livello globale del mare dovuto all'espansione termica (e quindi all'aumento di volume) che l'acqua subisce quando si riscalda. È probabile che il riscaldamento dei primi 700 m degli oceani abbia contribuito con una media di **0.6 mm/anno all'innalzamento del livello del mare** dall'inizio degli anni '70, a cui dobbiamo aggiungere ulteriori contributi relativi al calore accumulato anche negli strati più profondi sottostanti. Se poi consideriamo anche l'effetto indotto dallo scioglimento dei ghiacciai terrestri, queste stime crescono ulteriormente. Il rapporto del 2019 degli esperti del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) riporta che se il riscaldamento dovesse continuare con i ritmi finora registrati, entro il 2100 l'aumento del livello marino globale sarebbe di 0.6-1.1 m [1].

I punti caldi

In questo scenario di riscaldamento globale la regione mediterranea è considerata un "punto caldo" (Hot-Spot). I punti caldi sono regioni geografiche con una significativa riserva di biodiversità particolarmente sensibile al cambiamento climatico. Il bacino Mediterraneo è quindi esposto, più di altre regioni, ad impatti importanti dovuti al riscaldamento globale che potrebbero portare importanti rischi ambientali. L'importanza di studiare gli hot-spot non risiede solo nella necessità di caratterizzare il cambiamento climatico a livello regionale, ma costituisce un elemento cruciale nella comprensione dei meccanismi e delle tempistiche che governano il cambiamento climatico su scala globale.
L'**INGV** ha recentemente partecipato a un importante studio internazionale [Cheng et al., 2021] che ricalcola gli accumuli di calore nell'oceano integrando i dati più recenti e ridefinendo lo stato globale al 2020. Da questo e da altri recenti studi [Pisano et al., 2020] emerge che **la tendenza del Mar Mediterraneo al riscaldamento è molto più alta di quella globale.** Il tasso di incremento medio è di **0.041°C/anno** a partire dall'inizio degli anni '80 con un aumento complessivo di oltre 1.5°C e un progressivo interessamento degli strati più profondi. L'impatto che questo accumulo di calore ha sul nostro clima è ineluttabile, ma tiene conto dell'assorbimento solo degli strati superficiali e intermedi (fino a 700 m). Ciò rende le previsioni attuali potenzialmente sottostimate perché non tengono conto del budget energetico dell'intera colonna d'acqua, comprensiva dello strato più profondo dell'oceano.
Il clima è un sistema altamente complesso. I processi che lo governano, come in un "effetto domino", sono connessi tra loro da sofisticati rapporti di azione e reazione che mitigano o amplificano le tendenze al cambiamento. È necessario quindi avere uno scenario climatico quanto più preciso possibile tenendo conto di tutte le variabili del sistema che devono essere tenute in considerazione. In questo quadro la variabilità riscontrata negli strati più profondi è molto importante poiché potrebbe, nel lungo termine, avere forti ripercussioni sulle caratteristiche termoaline delle masse

d'acqua, modificandone temperatura e salinità. Il cambiamento delle proprietà chimico-fisiche di una massa d'acqua a sua volta potrebbe influenzare la circolazione inizialmente a livello locale. Uno dei motori principali della circolazione è infatti costituito proprio dai gradienti di temperatura e salinità. La variabilità locale potrebbe poi diffondersi ed estendersi su scale spaziali sempre maggiori contribuendo ad accelerare i processi che governano il cambiamento climatico.

Un mooring a supporto dell'infrastruttura di ricerca EMSO Western Ionian Sea

Negli ultimi 20 anni l'INGV ha sviluppato osservatori multidisciplinari di alta tecnologia capaci di lavorare a grandi profondità. Un osservatorio multidisciplinare è una piattaforma in cui è installata diversa strumentazione volta a fare un monitoraggio sismico, oceanografico, geofisico ed ambientale ad elevate profondità. Una volta deposti a fondo mare, questi osservatori forniscono alla comunità scientifica lunghe serie temporali di dati multiparametrici che consentono tra le altre cose un monitoraggio continuo dello stato delle masse d'acque profonde e lo studio dei processi responsabili delle variabilità osservate.
Dal 2016, il sistema di osservatori di mare profondo Western Ionian Sea dell'INGV [2] fa parte dell'Infrastruttura di Ricerca Europea EMSO [3]. Con i suoi elementi costitutivi, ossia osservatori multiparametrici e mooring, contribuisce al monitoraggio della dinamica marina profonda, misurando parametri fisici, chimici e dinamici in modo continuo e a lungo termine. La configurazione del Western Ionian Sea, deposto nel Mar Ionio a circa 2.000 metri di profondità ed a 25 km dalla costa orientale della Sicilia di fronte al porto di Catania, ha subito diversi aggiornamenti nel corso del tempo. Da dicembre 2023, è costituita da due osservatori multiparametrici di fondo mare, CALIPSO e DIONE, e il mooring GALATEA. A questi si aggiunge la nuova tecnologia dello SMART cable: un cavo delle telecomunicazioni arricchito con strumentazione geofisica (Figura 2).
Il **mooring GALATEA** (Figura 3), realizzato in collaborazione con CNR-ISMAR, è stato installato nel luglio 2021 ad una profondità di circa 2.000 metri. Un mooring è un insieme di strumenti disposti lungo un cavo ancorato sul fondale marino e costituisce un punto fisso di misura che permette di registrare nel tempo differenti parametri chimico-fisici e dinamici a diverse profondità. Periodicamente il mooring GALATEA viene recuperato, per operazioni di manutenzione e calibrazione strumentale e rideposto nell'ambito della stessa missione in prossimità degli osservatori multiparametrici CALIPSO e DIONE.

Perché il Mar Ionio?

Il Mar Ionio è un bacino "strategico" nella circolazione generale del Mar Mediterraneo. Presenta una morfologia peculiare ed è qui che risiedono le profondità maggiori del Mediterraneo (fino a 5.267 m). Masse d'acqua con caratteristiche molto diverse e provenienti da differenti parti del Mediterraneo si incontrano in questo bacino che funziona da vero e proprio collettore. Le acque mediterranee orientali calde e salate, quelle fredde e dense dell'Adriatico, quelle di origine Atlantica fredde e meno salate, fluendo nel bacino ionico si mescolano a seguito di complessi processi dinamici che costituiscono un ingranaggio cruciale della circolazione dell'intero Mediterrano.
Negli ultimi decenni gli osservatori che oggi costituiscono il Western Ionian Sea [4] hanno registrato un'interessante variabilità delle proprietà delle masse d'acqua profonde, registrando una tendenza all'aumento di temperatura e salinità e confermando il crescente accumulo di calore negli strati più profondi del Mar Ionio (la Figura 4 illustra i dati acquisiti a fondo mare tra il 2002-2003 e 2012-2013).

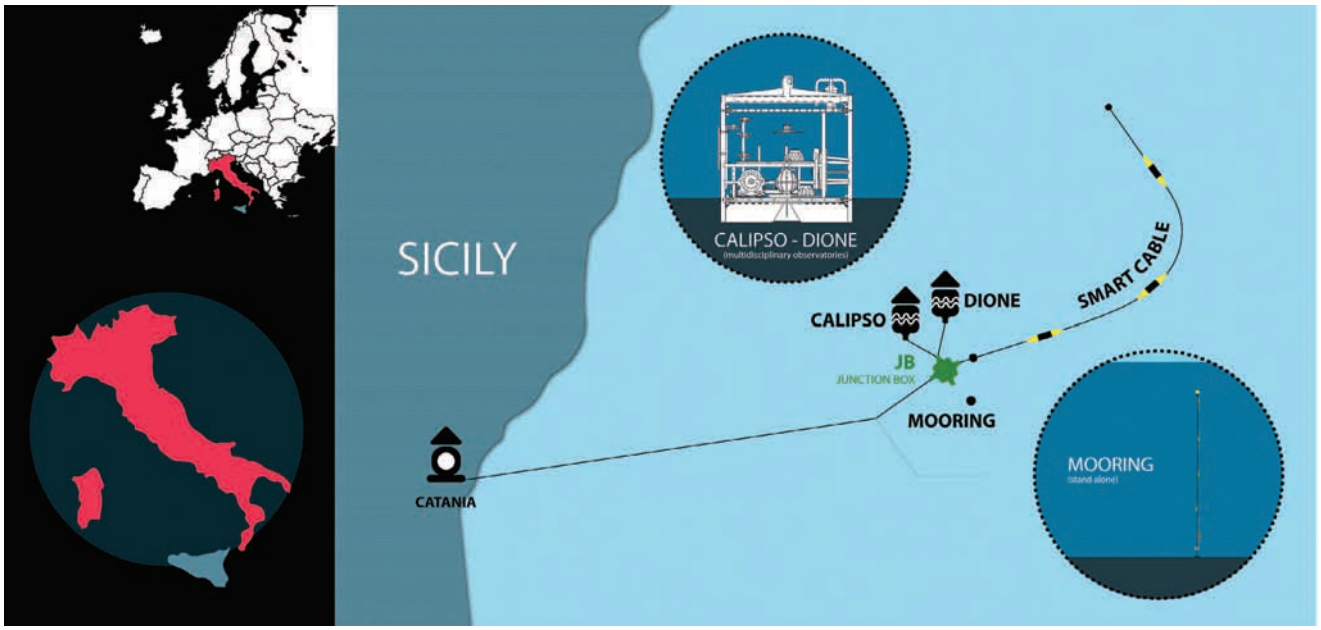
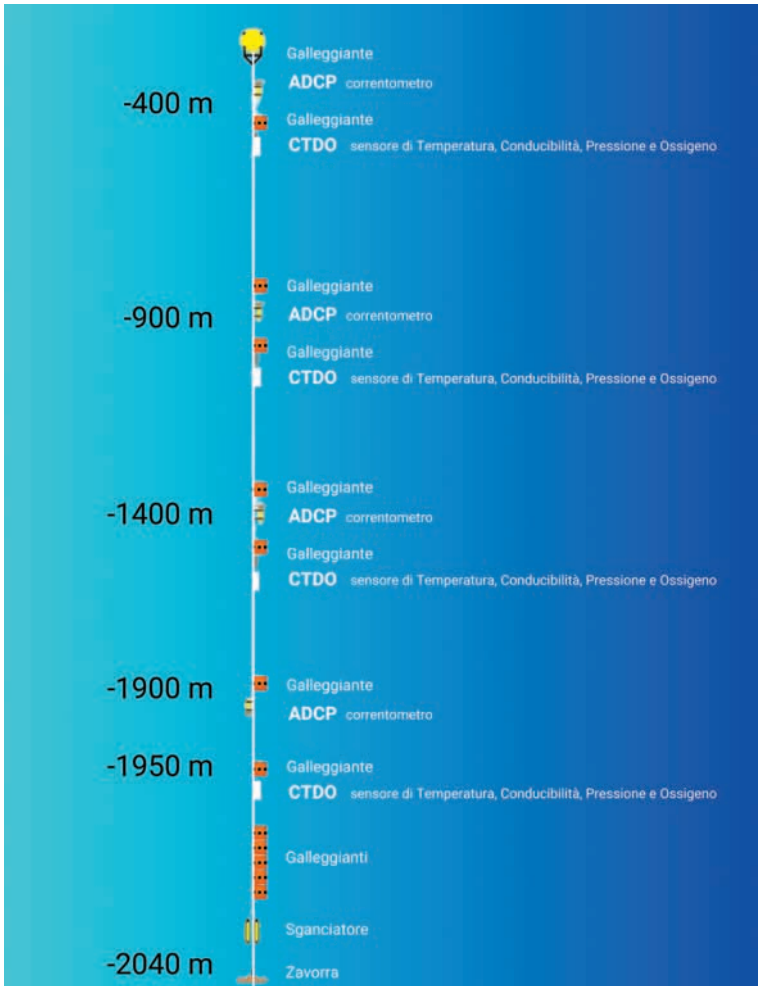


Figura 2 Schema dell'infrastruttura Western Ionian Sea, composta dalla stazione a terra presso il porto di Catania; i due osservatori multiparametrici CALIPSO e DIONE a 25 km dalla costa alla profondità di circa 2000 m; GALATEA il mooring e lo SMART cable. (Crediti EMSO)

***Figure 2** Sketch of the Western Ionian Sea infrastructure, consisting of the ground station at the port of Catania; at a distance of 25 km from the Catania coast, at a depth of approximately 2000 m there are the two multiparametric observatories CALIPSO and DIONE; GALATEA mooring and the SMART cable. (Credits EMSO)*

Figura 3 Schema del mooring GALATEA. (Grafica di L. Cafarella)

***Figure 3** Sketch of the mooring GALATEA. (Graphics by L. Cafarella)*



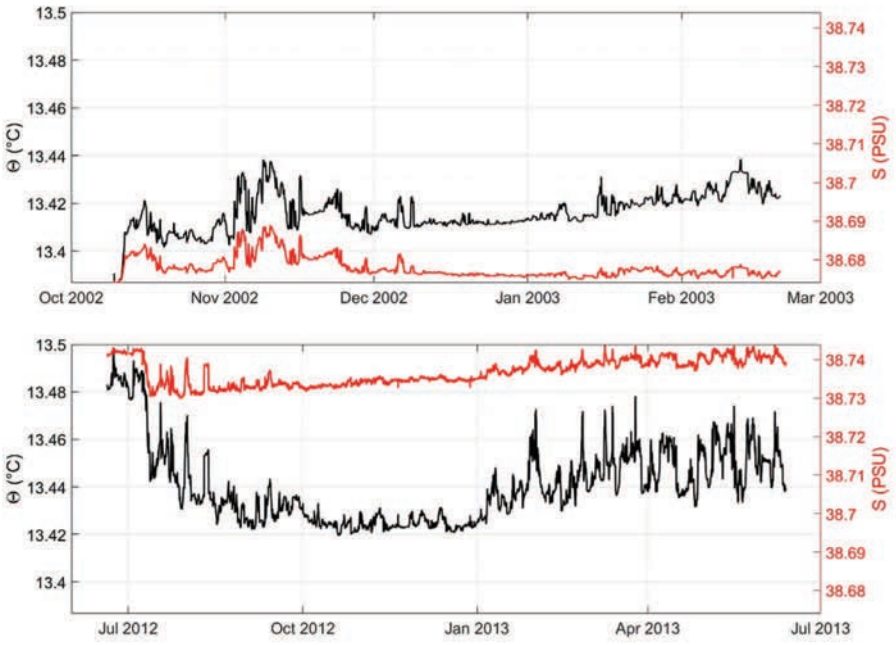


Figura 4 Serie temporale di Temperatura e Salinità acquisita in due periodi differenti (2002-2003 e 2012-2013) illustra la variabilità registrata negli strati profondi del Mar Ionio.
(Crediti N. Lo Bue)
Figure 4 *Temperature and Salinity time series acquired on 2002-2003 and 2012-2013 show variability recorded on the bottom layer of the Ionian Sea. (Credits N. Lo Bue)*

Il mooring installato nel bacino ionico ha l'obiettivo di registrare le variazioni **a lungo termine dell'intera colonna d'acqua** integrando così le misure che dal 2001 vengono acquisite dall'INGV nell'area del Western Ionian Sea.
Questo permetterà di **connettere le variabilità osservate negli strati profondi con ciò che accade nell'intera colonna d'acqua e meglio comprendere come la dinamica superficiale e intermedia possano influenzare i processi che negli ultimi decenni stiamo osservando a fondo mare e che potrebbero avere un impatto a livello climatico.**

Bibliografia

Cheng L., Abraham J., Trenberth K.E. et al. (2021). Upper Ocean Temperatures Hit Record High in 2020. Adv. Atmos. Sci. 38, 523–530. https://doi.org/10.1007/s00376-021-0447

Pisano A., Marullo S., Artale V., Falcini F., Yang C., Leonelli F.E., Santoleri R., Buongiorno Nardelli B. (2020). New Evidence of Mediterranean Climate Change and Variability from Sea Surface Temperature Observations. Remote Sens. 12, 132. https://doi.org/10.3390/rs12010132

von Schuckmann K., Le Traon P. Y., Smith N., Pascual A., Djavidnia S., Gattuso J. P., Zunino S., (2020). Copernicus Marine Service Ocean State Report, Journal of Operational Oceanography, 13(sup1), S1–S172. https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1785097

Sitografia

[1] https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/chapter-1/
[2] https://westernionianseа.ingv.it/index.php/it/
[3] https://ingvambiente.com/2018/11/13/emso-una-rete-di-osservatori-nel-profondo-dei-mari-per-comprendere-eventi-estremi-e-cambiamenti-climatici/
[4] https://roma2.ingv.it/index.php/infrastrutture-di-ricerca/infrastruttura-emso

Ciclo idrologico e riscaldamento globale

Annalisa Cherchi

CNR-ISAC | Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima
INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

Il ciclo idrologico, vitale per il pianeta Terra, è parte integrante del sistema climatico. Può essere drasticamente influenzato dal riscaldamento globale attraverso processi complessi ed altamente variabili nello spazio e nel tempo. Vediamone alcuni aspetti.

È un dato di fatto: il **riscaldamento globale**, **di cui l'uomo è principale responsabile, sta influenzando e modificando il ciclo idrologico**, cioè quella catena di eventi che garantiscono la circolazione di acqua tra l'atmosfera e la terraferma e il cui equilibrio garantisce la sopravvivenza dell'uomo e delle altre specie viventi.
Il ciclo idrologico consiste nell'alternarsi di processi che trasferiscono acqua dalla superficie all'atmosfera della Terra e, seguendo il percorso inverso, dall'atmosfera alla superficie. Durante questi spostamenti l'acqua cambia stato, trasformandosi da solido a liquido, da liquido ad aeriforme o viceversa. Guardiamo ad esempio lo schema in Figura 1. L'acqua presente in atmosfera sotto forma di vapore può condensare e formare nubi. Successivamente può precipitare sulla superficie sotto forma liquida (pioggia) o solida (neve/ghiaccio), riversandosi in fiumi, laghi, mari, oceani e sul suolo. Come fa l'acqua a spostarsi nuovamente in atmosfera chiudendo il ciclo? L'acqua dei mari e degli oceani può evaporare, mentre quella sulla superficie continentale può riversarsi a sua volta in fiumi, mari e laghi e poi evaporare o insinuarsi nel sottosuolo. Le piante che la assorbono la rilasciano in atmosfera attraverso l'evapotraspirazione. Ed il ciclo si chiude.

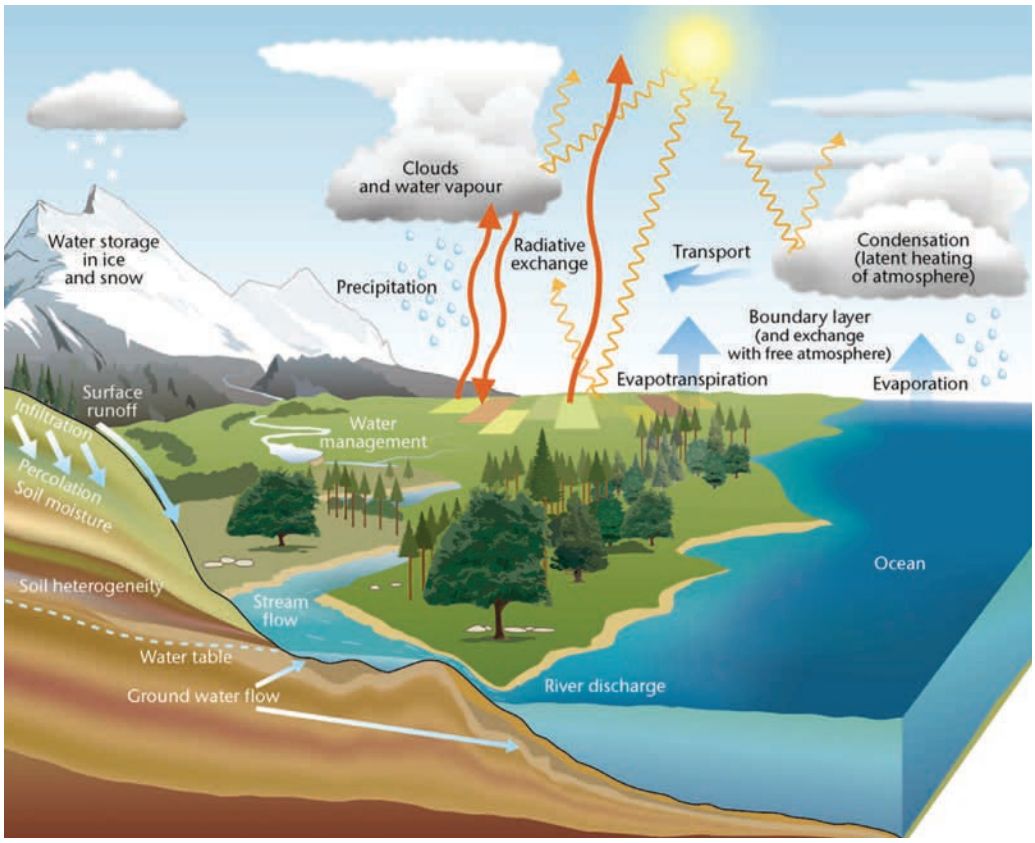


Figura 1 Schema dei processi e delle trasformazioni di fase nel ciclo idrologico. (Crediti immagine [1])
Figure 1 *Water cycle scheme: exchange processes and water phases transformation. (Credits [1])*

Come il riscaldamento globale influisce sul ciclo dell'acqua?

Qualsiasi alterazioni del ciclo idrologico è importante poiché influenza la disponibilità di acqua. Dal punto di vista fisico, **la prima** ovvia **conseguenza del riscaldamento globale è la fusione dei ghiacci**, sia marini che terrestri. In un post precedente [2] sono stati descritti i principali impatti della fusione dei ghiacci marini in Artico. Anche la fusione dei ghiacciai terrestri è largamente influenzata dal riscaldamento globale ed ha importanti conseguenze sul ciclo idrologico.
Il National Snow and Ice data center [3] monitora costantemente la variazione di ghiaccio in Groenlandia e anche per il 2024 la fusione è considerevole. La Figura 2 mostra come negli ultimi anni (linee colorate) la quantità di ghiaccio fuso in Groenlandia sia molto aumentata rispetto al periodo 1980-2010 (linee e area grigia). E la cosa peggiore è che tutti i ghiacciai del mondo stanno sperimentando questo stesso fenomeno, in modo più o meno intenso a seconda della zona. Ciò avviene poiché le alte temperature non permettono, soprattutto d'estate, il mantenimento della copertura nevosa dei ghiacciai, che rimangono così esposti e iniziano a fondere. Ad esempio è stato stimato che le Alpi hanno perso il 50% della loro copertura di ghiaccio nell'ultimo secolo, di cui oltre i due terzi negli ultimi 30 anni.

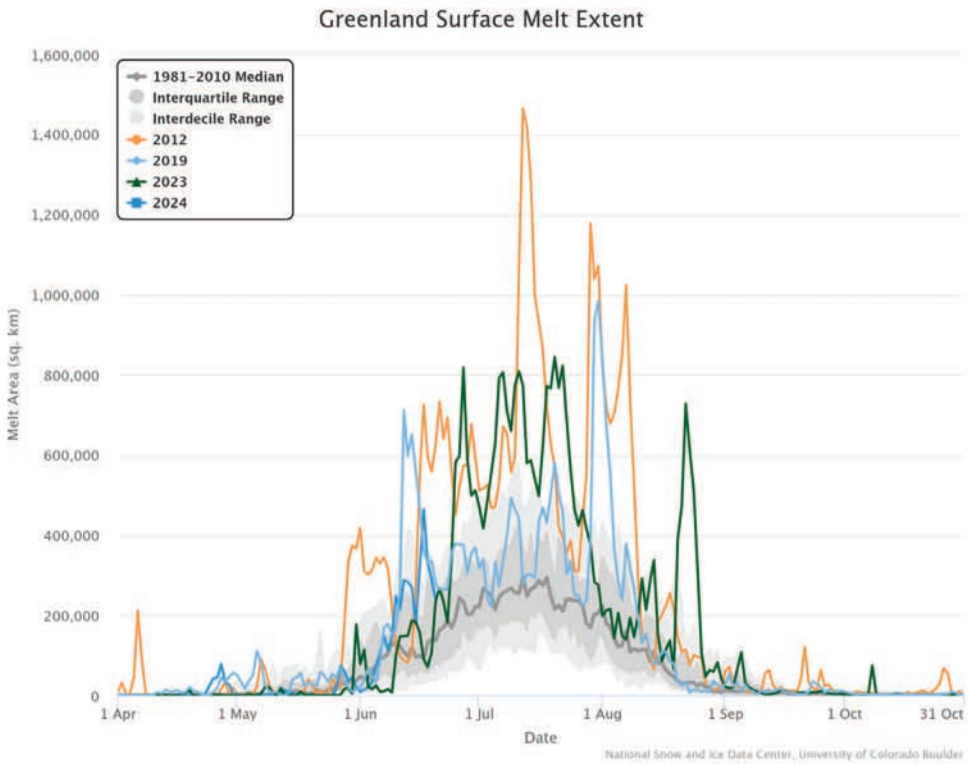


Figura 2 Area (km²) di fusione del ghiaccio in Groenlandia tra Aprile e Ottobre come mediana del periodo 1981-2010 (linea grigia) e per alcuni anni recenti (linee colorate). (Sorgente: National Snow and Ice Data Center [3])
***Figure 2** Area (km²) of Greenland ice-sheet melting from April to October as 1981-2010 median (grey line) and for some recent years (colored lines). (Source: National Snow and Ice Data Center [3])*

Quali sono le principali conseguenze della fusione dei ghiacciai terrestri?

Nelle regioni continentali, i ghiacciai di paesi come Perù, Cile ed India (l'Himalaya) sono determinanti per l'approvvigionamento idrico. La loro fusione ha quindi **gravi conseguenze sociali ed economiche** per quei paesi. Nei poli (Artide ed Antartide) la perdita di ghiaccio e immissione di acqua dolce negli oceani ne influenza la salinità, modificando quindi anche la densità. Questo comporta possibili conseguenze anche per fenomeni a scala globale quali la circolazione termoalina nell'Oceano Atlantico. Inoltre la fusione dei ghiacci polari provoca un

forte innalzamento del livello marino: in Groenlandia ha provocato un innalzamento globale equivalente di 0.59 mm all'anno dal 2002 al 2011. Dal 2012 al 2017, la fusione del ghiaccio nella parte occidentale dell'Antartide è stata stimata ad un tasso di 4.5 cm di innalzamento del livello del mare per secolo. Le comunità costiere stanno già affrontando la minaccia di inondazioni dirette a seguito dell'innalzamento del livello del mare globale, nonché l'aumento del rischio di ondate da tempesta, inondazioni da maree o precipitazioni estreme.

Cosa possiamo aspettarci per il prossimo futuro?

L'ultimo **rapporto speciale su oceani e criosfera** (SROCC) [4] della Commissione Intergovernativa per i Cambiamenti Climatici (IPCC) ha stimato un aumento del livello marino globale tra 0.43 m e 0.84 m entro la fine del secolo rispetto alla media 1986-2005. Nel rapporto queste proiezioni sono state associate ai rischi sulla geografia costiera. Nello scenario climatico peggiore, anche alte misure di adattamento riducono di poco i rischi, soprattutto negli atolli abitati e nelle comunità artiche.

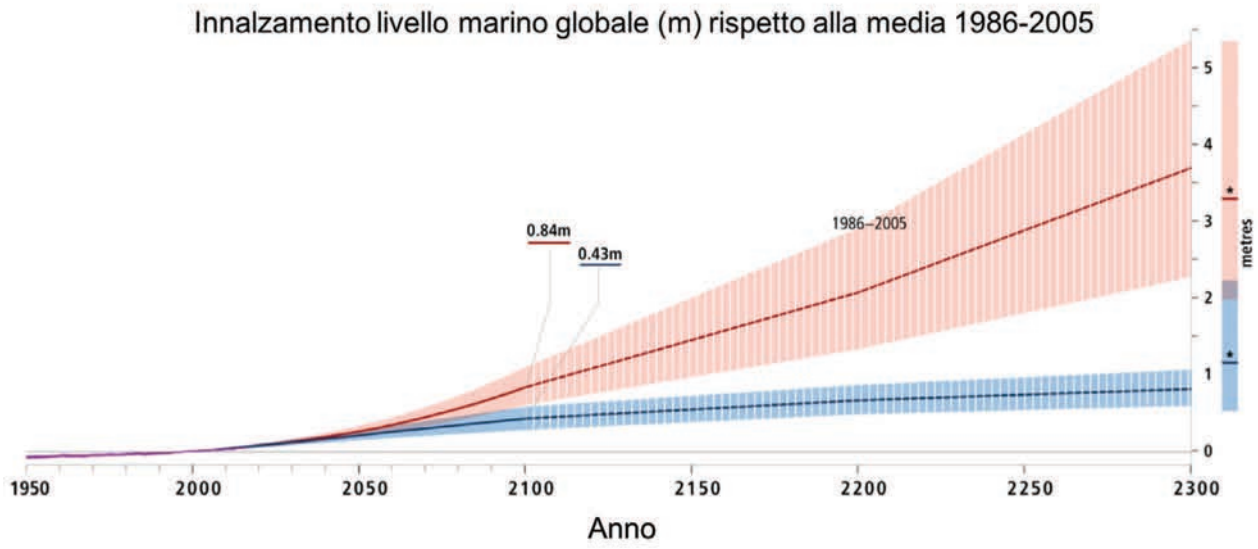


Figura 3 Innalzamento medio globale del livello del mare dal 1950 al 2300 rispetto alla climatologia 1986-2005, in due diversi scenari climatici a basse (blu) ed alte (rosa) emissioni di gas ad effetto serra.
(Fonte: rapporto speciale IPCC su oceani e criosfera [4])

***Figure 3** Global sea-level rise from 1950 to 2300 with respect to the 1986-2005 climatology in two climate scenarios with low (blue) and high (red) GHG emissions.*
(Source: Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [4])

È importante considerare anche altri aspetti prettamente legati a precipitazione e ad eventi estremi. Il riscaldamento globale influenza anche i **processi di precipitazione ed evaporazione**, che globalmente tendono ad aumentare. Un'atmosfera più calda ha una maggiore capacità di trattenere vapor d'acqua con due importanti conseguenze: l'ulteriore aumento della temperatura dovuto ad un incremento dell'effetto serra, ed un potenziale aumento della capacità precipitativa (circa 1-3% per ogni °C di riscaldamento globale). In realtà, l'aumento della precipitazione media globale è stimato essere 0.5% per ogni grado di innalzamento della temperatura globale. Analogamente, un aumento della temperatura implica un aumento della capacità evaporativa delle superfici.

Un aspetto riconosciuto legato al riscaldamento globale è l'**aumento di eventi precipitativi estremi**, con conseguente aumento del rischio di inondazioni, per esempio. Allo stesso tempo un aumento della temperatura globale rende zone caratterizzate da condizioni di siccità a diventare ancora più secche con potenziali e drastiche conseguenze sulle risorse idriche, nonché sull'agricoltura e le coltivazioni.
Abbiamo descritto qui solo alcuni degli effetti del riscaldamento globale sul ciclo idrologico, considerando sia quelli già in essere che quelli potenziali. È chiaro come questi effetti siano complessi, e come siano ampiamente variabili sia nello spazio che nel tempo. L'importanza di questi aspetti, soprattutto nell'ottica di fornire informazioni precise ed attendibili per i decisori politici, è altamente riconosciuta nell'ambito dell'IPCC. Per la prima volta il rapporto sulla fisica dei cambiamenti climatici (AR6 WGI [5]) del 2021, ha un intero capitolo dedicato agli effetti dei cambiamenti climatici sul ciclo idrologico nel quale tutti gli aspetti fisici sono valutati in modo esaustivo. Da questo seguono le conseguenze in termini di adattamento, vulnerabilità e mitigazione confluite nel rapporto sintetico sui cambiamenti climatici (AR6 Synthesis Report: Climate Change 2022 [6]).

Sitografia

[1] https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/water-cycle
[2] http://ingvambiente.com/2019/06/25/lamplificazione-polare/
[3] https://nsidc.org/home
[4] https://www.ipcc.ch/srocc/home/
[5] https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/
[6] https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/

La distribuzione non casuale delle sorgenti termali sulla Terra

Giancarlo Tamburello[1], Giancarlo Ciotoli[2], Monia Procesi[1], Dmitri Rouwet[3], Laura Sandri[3]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1
[2]CNR | Istituto Di Geologia Ambientale E Geoingegneria
[3]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

Le acque termali sono ampiamente diffuse sul nostro Pianeta e la loro distribuzione è fortemente regolata da alcuni fattori geologici. Un gruppo di ricercatori dell'INGV e del CNR ha recentemente pubblicato una mappa mondiale delle aree dove è più probabile trovare sorgenti termali. Questa mappa costituisce una base importante per l'individuazione di zone geotermali ancora sconosciute e potenzialmente interessanti da un punto di vista energetico.

Le acque termali

Le acque termali sono da sempre impiegate nel settore della balneologia e già gli antichi romani, e non solo, ne furono dei grandissimi utilizzatori.



Figura 1 Sorgenti termali del parco delle scimmie di Jigokudani, a Yamanouchi nella prefettura di Nagano in Giappone. (Foto di James Moore per Canva)

Figure 1 *Hot springs at Jigokudani Monkey Park, Yamanouchi in Nagano Prefecture, Japan. (Photo by James Moor for Canva)*

Un'acqua è definita *termale* (o *geotermale*) quando la sua temperatura è superiore alla temperatura media ambientale. Le sorgenti di acque termali sono una delle espressioni superficiali dell'energia termica racchiusa nella crosta terrestre. In tempi più recenti esse sono utilizzate anche per la produzione di energia termica: ad esempio nell'anno 2000 è stato stimato che l'energia termica estratta a livello globale sia è stata di circa 15 GW.
Ci sono ancora tante aree geotermali che potrebbero essere utilizzate o non sono conosciute o sufficientemente sfruttate per la produzione di energia.

La mappa globale delle sorgenti termali

Un gruppo di ricercatori INGV e CNR, partendo da un archivio compilato nel 1965 sulla posizione delle sorgenti termali nel mondo, ha compilato un catalogo in formato digitale [Tamburello et al., 2022], In questo lavoro, pubblicato recentemente su Nature Communication, i ricercatori raccolgono la posizione di circa 6.000 aree geotermali sparse per il globo, completo di coordinate, temperatura e salinità dell'acqua e altre informazioni complementari.
La realizzazione dell'archivio digitale ha consentito di ricavare importanti informazioni generali sulle caratteristiche delle sorgenti termali consentendo di caratterizzare i fattori geologici tipici delle località dove queste sorgenti sono localizzate.

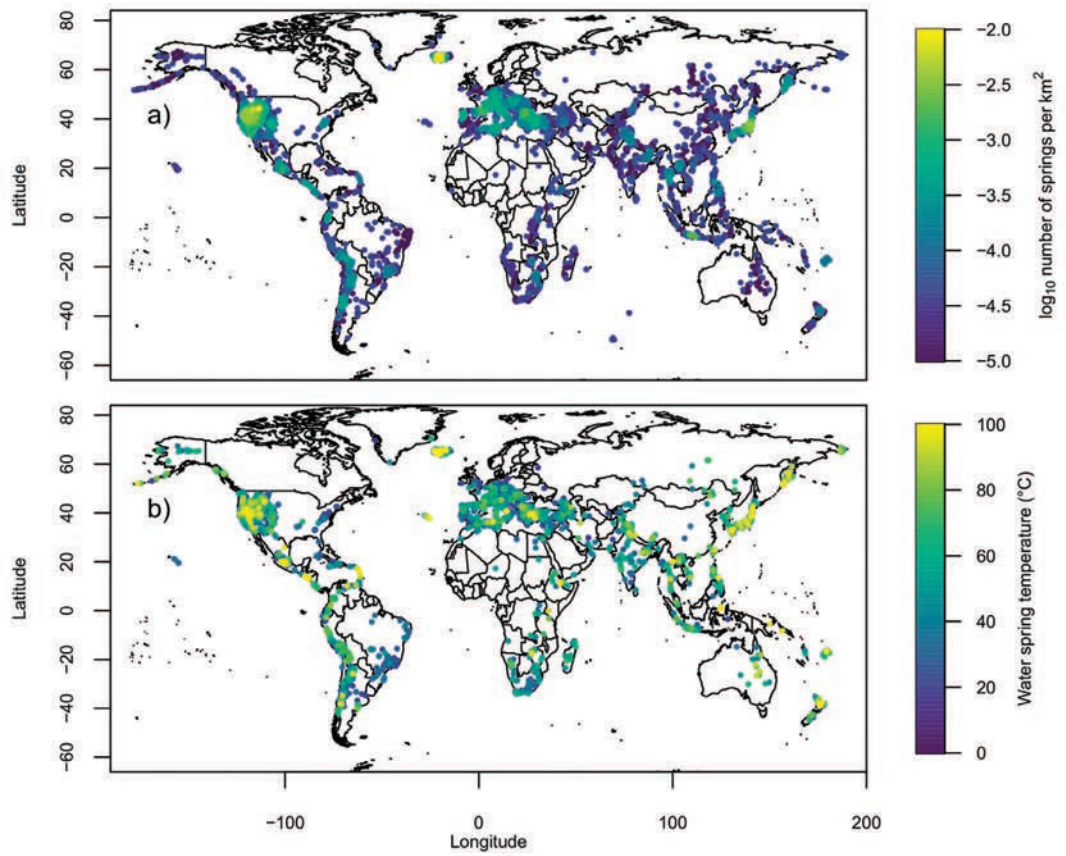


Figura 2 (a) Distribuzione delle sorgenti termali digitalizzate in Waring [1965] e la loro densità calcolata per km^2. (b) Temperature delle sorgenti termali disponibili nel dataset, le temperature più alte sono concentrate lungo i margini tettonicamente più attivi. (Immagine da Tamburello et al. [2022])
***Figure 2** (a) Distribution of hot springs digitalized from the work of Waring [1965] and their density calculated per km^2. (b) Hot spring temperatures available in the dataset, the highest temperatures are concentrated along the most tectonically active margins. (Figure from Tamburello et al. [2022])*

Alcune informazioni preliminari importanti sono state dedotte studiando i dati del database. In particolare, sono state determinate le caratteristiche relative ai valori di temperatura e portata. La temperatura mediana delle sorgenti termali catalogate è risultata essere di 42°C, mentre la loro portata risulta variare da pochi centimetri cubici al secondo (10−6 m^3/s) a qualche metro cubo al secondo (5.27 m^3/s).

Sorgenti termali e fattori geologici

Da queste informazioni è stato possibile calcolare il flusso termico generato dalle sorgenti, che è risultato variare da centinaia di kW fino a circa mille MW, con un valore mediano di circa 0.5 MW. Con questi dati, insieme a quelli globali relativi al flusso di calore terrestre, della sismicità e della distribuzione spaziale dei vulcani, è stato possibile stimare quali siano i fattori geologici maggiormente responsabili della presenza delle sorgenti termali sul globo.
Si è così appurato che il **flusso di calore terrestre** e la **presenza di vulcani** giocano un importante ruolo nel fornire l'energia termica per riscaldare le acque sotterranee.
La topografia, in particolare la presenza di numerosi rilievi, faciliterebbe la presenza di pressioni idrostatiche maggiori e la formazione di più acquiferi (ossia acqua all'interno della crosta terrestre che alimenta le sorgenti in superficie).
Infine, la **tettonica distensiva**, l'insieme di faglie che tendono ad aprire settori di crosta terrestre, è un importante fattore creando le fratture necessarie alla risalita di fluidi caldi ed il trasferimento convettivo del calore.
Grazie a queste informazioni, dal confronto con la posizione delle sorgenti termali già note è stato possibile individuare sulla mappa le aree da esplorare in cerca di sorgenti ancora sconosciute.
I dati ottenuti da questa ricerca costituiscono una base importante per approfondire studi geotermici in zone dove ancora la geotermia è poco sviluppata, ma in cui la presenza di una risalita di fluidi caldi potrebbe consentire l'utilizzo indiretto ma soprattutto diretto del calore[1] da essi trasportato. Per esempio, le aree in Africa centrale (la Rift Valley Etiopica) o lungo la cordigliera delle Ande. In Italia le sorgenti termali sono ben mappate e conosciute ed hanno attirato da sempre l'interesse degli scienziati. Basti pensare che la centrale geotermica di Larderello divenne la prima esperienza al mondo di sfruttamento dell'energia geotermica per la produzione di energia elettrica. Una comparazione tra la mappa di questo lavoro ed una mappa delle sorgenti termali nel sud Italia compilata nel 2019 mostra poche differenze, ma rappresenta una risorsa per capire la loro evoluzione nel tempo e l'impatto che lo sfruttamento delle risorse idriche ed il cambiamento climatico ha avuto e sta avendo sulla loro portata.

Bibliografia

Tamburello G., Chiodini G., Ciotoli G., Procesi M., Rouwet D., Sandri L., Carbonara N. & Masciantonio C., (2022). *Global thermal spring distribution and relationship to endogenous and exogenous factors*. Nat Commun 13, 6378. https://doi.org/10.1038/s41467-022-34115-w

Waring G.A. (1965). *Thermal springs of the United States and other countries of the world -A Summary*. Geol. Surv. Prof. Pap. 492, 400. https://pubs.usgs.gov/pp/0492/report.pdf

[1]https://ingvambiente.com/2019/05/28/impariamo-a-conoscere-lenergia-geotermica-e-luso-che-se-ne-puo-fare/

Il rischio nascosto tra le profondità del Lago Albano

Dmitri Rouwet

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

I laghi di origine vulcanica possono racchiudere nelle proprie profondità accumuli di gas che, nelle zone temperate, vengono liberati da meccanismi di rimescolamento naturali delle acque. Il riscaldamento globale può mettere in crisi questi meccanismi di degassamento con importanti ripercussioni per l'ambiente e per l'uomo.

Qualche anno fa si è a lungo parlato del **Lago Nyos** (Figura 1), il famoso "lago assassino" camerunense che soffocò quasi 1800 persone in una sola notte. Il lago, di origine vulcanica, la sera del **21 agosto 1986** rilasciò improvvisamente una **densa nube di anidride carbonica** (CO_2) che si espanse lungo le limitrofe valli abitate.
L'impatto mediatico che scaturì da questo evento naturale mise sotto i riflettori la ricerca sui laghi vulcanici stimolando studi scientifici nel mondo ma soprattutto in Europa. Sotto analisi in particolare erano le aree vulcaniche dove sono presenti laghi con caratteristiche simili al Lago di Nyos: evidentemente alcuni laghi sono innocui solo in apparenza (Figura 2)!
Nei primi decenni dopo la tragedia del Lago Nyos, anche i ricercatori geochimici italiani hanno monitorato le profondità di vari laghi europei. Tra questi il Lago Albano (noto anche come Lago di Castel Gandolfo) alle porte di Roma.

Cosa è successo realmente al Lago Nyos?

A distanza di qualche anno dopo l'episodio del 1986, il monitoraggio geochimico delle acque del fondo del Lago Nyos ha rivelato che la nube responsabile della tragedia non fu dovuta ad un'improvvisa emissione di gas sulfurei come alcuni gruppi di ricercatori ipotizzarono in un primo momento. La causa si rivelò essere una ricarica di CO_2 indotta da un degassamento graduale e costante a livello regionale avvenuto lungo la **Linea Vulcanica del Camerun**, lunga ben 1.600 km. Questa ricarica graduale, tuttora attiva, potrebbe portare al verificarsi di nuove esplosioni, simili a quella del 1986, con una periodicità stimata di circa una al secolo. Per evitare che questo possa avvenire, è stata elaborata una strategia di **mitigazione del rischio**. Nel 2001 è stato così avviato il degassamento artificiale del Lago Nyos. Il sistema di degassamento prevede un apparato idraulico costituito da tubi, ancorati vicino al fondo a circa 210 m di profondità, in comunicazione diretta con la superficie dell'acqua, così da indurre il defluire dell'acqua ricca in gas in maniera spontanea (Figura 1). Il sistema è poi stato potenziato nel 2011 e pochi anni dopo il Lago Nyos è stato considerato sicuro per il futuro ripopolamento della zona.

Lago Albano e Lago Nyos: analogie e differenze

Il **Lago Albano** è situato nella Campagna Romana nella zona dei Castelli Romani a sud-est di Roma a circa 300 metri di altitudine. **È il lago craterico più profondo d'Europa** (170 m) con peculiare morfologia sommersa [Anzidei et al., 2008]. Si è formato all'interno del sistema craterico del complesso vulcanico dei Colli Albani, la cui attività è iniziata circa 600.000 anni fa [Giordano et al., 2006]. Il cratere del Lago Albano si è formato dopo varie eruzioni avvenute tra 70.000 e 5.800 anni fa, rappresentando l'attività vulcanica più recente del complesso dei Colli

Albani. Come tale, il Lago Albano può essere considerato un vulcano attivo (cioè, per definizione, che ha eruttato negli ultimi 10.000 anni), tuttavia quiescente.



Figura 1 Degassamento artificiale al Lago Nyos, Camerun. (Foto di Y. Yoshida)
Figure 1 *Artificial degassing at Lake Nyos, Cameroon. (Photo by Y. Yoshida)*

Un primo monitoraggio dei fondali del lago è stato effettuato alla fine degli anni '80 e ha svelato effettivamente la presenza di un accumulo di CO_2 [Carapezza et al., 2008]. Il ristagno di anidride carbonica osservato, tipico delle aree vulcaniche quiescenti, risultò essere prodotto in concomitanza dello sciame sismico registrato in quel periodo (1989-1990) [Chiodini et al., 2012]. La coincidenza temporale di questa osservazione e della tragedia del Lago Nyos insieme ad alcune analogie geochimiche dei due laghi, suscitò l'enorme interesse degli studiosi spingendoli a confrontare il comportamento dei due laghi e pertanto a interrogarsi sulla possibile pericolosità del Lago Albano.
Il monitoraggio geochimico effettuato successivamente negli anni 1990 e 2000 sul lago laziale ha rivelato una diminuzione del contenuto di CO_2 sul suo fondale [Chiodini et al., 2012; Rouwet et al., 2021], contrariamente a quello accaduto al Lago Nyos.
È così risultato evidente che i due laghi avessero dinamiche di degassamento completamente diverse, addirittura opposte [Rouwet et al., 2019]. Le caratteristiche principali che contribuiscono a questo differente comportamento sono essenzialmente due:

1. l'immissione di CO_2 nel Lago Albano è legata all'occorrenza a sciami sismici nella zona dei Castelli Romani, anche se i dati storici mostrano che non tutti gli sciami generano evidenti rilasci di CO_2. Invece nel Lago Nyos il contenuto di CO_2 è costante nel tempo provenendo dalla Linea Vulcanica del Camerun;
2. il Lago Albano è situato in un clima temperato contraddistinto da una alternanza di stagioni. Diversamente il Lago Nyos è situato ai tropici dove la stagione delle piogge ha un ruolo predominante.



Figura 2 Vista panoramica di Lago Albano, a prima vista un lago innocuo. (Foto di D. Rouwvet)
Figure 2 *Panoramic view of Lake Albano, at first sight a harmless lake. (Photo by D. Rouwvet)*

Ruolo del clima

Appare evidente che, nel caso del Lago Albano, oltre ad una genesi endogena sporadica della CO_2, **i fattori climatici possono assumere una rilevanza** che non può essere trascurata.
Nei **climi tropicali** la temperatura superficiale dell'acqua non è soggetta alla variabilità stagionale. Lo strato superiore dello specchio d'acqua è riscaldato direttamente dal Sole praticamente per tutta la durata dell'anno, favorendo una stratificazione dell'acqua piuttosto stabile. La presenza di acque perennemente più calde in superficie rispetto alle acque più profonde dei laghi tropicali (detti laghi meromittici) prevede che la colonna d'acqua non venga mai rimescolata attraverso dinamiche di sprofondamento delle acque superficiali verso quelle più profonde. In questo caso, l'eventuale accumulo di gas nelle zone profonde del lago, provoca il raggiungimento delle condizioni di sovrasaturazione con il conseguente rilascio esplosivo.
Nei **climi temperati** invece, l'alternanza delle stagioni porta al riscaldamento della superficie lacustre in estate ed al suo raffreddamento in inverno, causando una totale o parziale redistribuzione verticale delle acque in inverno (laghi monomittici). Questo comporta un vero e proprio "rimescolamento" degli strati superiori, ricchi di ossigeno, con gli strati profondi, anossici. Nel caso in cui sul fondale del lago si creasse un accumulo di CO_2, questo rimescolamento stagionale degli strati favorirebbe il rilascio del gas in atmosfera per diffusione durante il periodo invernale, senza particolari ripercussioni sull'ambiente e senza porre pericoli per la popolazione
Attualmente il Lago di Albano è un **lago monomittico** poiché il clima delle nostre latitudini mantiene un mescolamento periodico, un fenomeno anche noto come "lake overturning", e pertanto previene l'eccessivo accumulo di CO_2 negli strati profondi. Questo processo spiega la diminuzione di CO_2 nei strati profondi, come osservata nel monitoraggio durante gli ultimi 30 anni.
In considerazione di questa ipotizzata dinamica di degassamento, l'area dei Colli Albani è stata oggetto di un nuovo sciame sismico il 28-29 agosto 2020, registrato dalla rete sismica dell'INGV-ONT. Questo è stato il campanello d'allarme per eseguire un'indagine geochimica appena 12 giorni dopo. Si è effettivamente verificata una nuova ricarica di CO_2, anche se di tre ordini di grandezza inferiore a quella del 1989-1990 (circa 450 tonnellate di CO_2 totale nel 2020 contro le circa 154.000 tonnellate del 1989-1990). L'indagine del gennaio 2021 ha invece confermato le dinamiche di degassamento invernale dei decenni precedenti. Inoltre, il primo degassamento invernale post-sismico è risultato più efficiente di quello che si sarebbe verificato se lo sciame sismico non si fosse verificato, lasciando il Lago Albano ora quasi privo di CO_2. Si tratta di un'osservazione confortante, ma che non esclude che in futuro possa verificarsi una ricarica co-sismica di CO_2, in qualsiasi momento.

L'effetto del riscaldamento climatico e stress antropico sui laghi

Il meccanismo di rimescolamento naturale delle acque del lago potrebbe essere un sistema efficace in grado di smaltire il gas dal fondale del lago verso la superficie. Purtroppo **la sua efficienza è compromessa dal riscaldamento globale del pianeta**. Secondo le previsioni al ritmo attuale di emissioni di gas serra nell'atmosfera, la Terra raggiungerà e supererà la soglia di 2.5°C di riscaldamento tra il 2030 e il 2052. Questo aumento di temperatura potrebbe essere sufficiente ad ostacolare il lake overturning delle acque del lago impedendo di conseguenza il degassamento invernale di CO_2. L'effetto sarebbe quindi l'accumulo profondo di gas su lunghi periodi dell'ordine di qualche anno o decennio.

Inoltre, la desertificazione, in continuo avanzamento dalle latitudini più basse, contribuirebbe a mantenere secco il clima di quest'area, portando ad una diminuzione della ricarica del lago di acque meteoriche fredde ed aumentando così il contributo del riscaldamento da radiazione diretta della sua superficie.

A tutto questo si aggiunge infine lo "*stress antropico*" dovuto al massiccio pompaggio dalle falde acquifere della Piana di Ciampino che ha causato un abbassamento del livello del lago dell'ordine dei metri negli ultimi decenni (nell'ordine dei 50/60 centimetri l'anno) [Mazza et al., 2015]. Tale fenomeno potrebbe contribuire con un effetto destabilizzante sulla stratificazione e dinamica di degassamento della CO_2 del Lago di Albano sul lungo termine, poiché le condizioni di supersaturazione di CO_2 saranno raggiunte più facilmente in un bacino lacustre meno profondo. Il lago potrebbe quindi trasformarsi da un lago monomittico a un lago meromittico per così diventare il "Lago Nyos europeo"? Questa l'inquietante domanda a cui i ricercatori INGV cercano di dare una risposta.



Figura 3 Evidenza della diminuzione del livello del lago mostrata dalle installazioni per le competizioni di canottaggio delle Olimpiadi di Roma 1960. Il livello è diminuito di circa 3.5 m dal 1960 al novembre 2005 (data del rilievo batimetrico) e attualmente continua a scendere. (Foto di M. Anzidei [1])

***Figure 3** Evidence of the decrease in lake level shown by the installations for the rowing competitions of the 1960 Rome Olympics. The level decreased by about 3.5 m from 1960 to November 2005 (the date of the bathymetric survey) and currently continues to decline. (Photo by M. Anzidei [1])*

Contributo dell'INGV

I ricercatori dell'**INGV** sono impegnati su diversi fronti nello studio e nel monitoraggio dello stato del Lago Albano. In particolare, nell'ambito del Progetto Strategico Dipartimentale **MACMAP** [2] (Dipartimento Ambiente, INGV), **studiano le condizioni di stabilità del lago** sulla base di misure dirette ma anche utilizzando modelli numerici. Il progetto studia le caratteristiche fisico-chimiche del corpo d'acqua del lago (Temperatura, pH, Conducibilità, contenuto di O_2 e CO_2 disciolti). Con questi dati e il supporto di modelli previsionali il personale INGV effettua monitoraggio e prospezioni per prevedere il comportamento del lago in base al possibile andamento futuro delle temperature regionali. In particolare, l'utilizzo di un robot acquatico di superficie "OpenSWAP" [3], ideato per il monitoraggio geofisico e geochimico degli ambienti acquatici, viene utilizzato per caratterizzare ad alta risoluzione le condizioni fisico-chimiche della superficie del lago.



Figura 4 Il Catamarano telecomandato OpenSWAP in azione (agosto 2022). (Foto di D. Rouwet)
Figure 4 *The remote controlled Catamaran OpenSWAP at work (August 2022). (Photo by D. Rouwet)*

Bibliografia

Anzidei M., Carapezza M.L., Esposito A., Giordano G., Lelli M., Tarchin L. (2008). *The Albano Maar lake high resolution bathymetry and dissolved CO_2 budget (Colli Albani volcano, Italy): constraints to hazard evaluation*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 171, 258–268. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.11.024

Carapezza M.L., Lelli M., Tarchini L. (2008). *Geochemistry of the Albano and Nemi crater lakes in the volcanic district of Alban Hills (Rome, Italy)*. J. Volcanol. Geotherm. Res., 178, 297–304. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.06.031

Chiodini G., Tassi F., Caliro S., Chiarabba C., Vaselli O., Rouwet D. (2012). *Time- dependent CO_2 variations in Lake Albano associated with seismic activity*. Bull. Volcanol., 74, 861–871. https://doi.org/10.1007/s004455-011-0573-x.

Giordano G., De Benedetti A.A., Diana A., Diano G., Gaudioso F., Marasco F., Miceli M., Mollo S., Cas R.A.F., Funiciello R. (2006). *The Colli Albani mafic caldera (Roma, Italy): Stratigraphy, structure and petrology.* J. Volcanol. Geotherm. Res., 155, 49-80. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.02.009

Mazza R., Taviani S., Capelli G., De Benedetti A.A., Giordano G. (2015). *Quantitative hydrogeology of volcanic lakes: examples from the Central Italy Volcanic District*. In: Rouwet,D., Christenson B., Tassi F., Vandemeulebrouck J. (Eds.), Volcanic Lakes. Springer, Heidelberg, 355–378. https://doi.org/10.1007/978-3-642-36833-2_16

Rouwet D., Chiodini G., Ciuccarelli C., Comastri A., Costa A. (2019). *Lago Albano, the "anti-Nyos-type" lake: the past as a key for the future.* J. Afr. Earth Sci., 150, 425–440. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.09.019

Rouwet D., Tamburello G., Chiodini G., Pecoraino G., Procesi M., Ricci T., Venturi S., Santi A., Cabassi J., Vaselli O., Tassi F., Costa A. (2021). *New insights into the degassing dynamics of Lago Albano (Colli Albani volcano, Rome, Italy) during the last three decades (1989-2019)*. Ital. J. Geosci., 140(1), 29–41. https://doi.org/10.3301/IJG.2020.19

Sitografia

[1] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377027307004015

[2] https://progetti.ingv.it/it/progetti-dipartimentali/ambiente/macmap#informazioni-sul-progetto

[3] https://www.openswap.it/en/

La storia geologica del lago Trasimeno

Chiara Caricchi[1], Massimiliano Rinaldo Barchi[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2
[2]Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Fisica e Geologia

Il lago Trasimeno, in Umbria, con i suoi 128 km^2 di superficie è il lago più esteso dell'Italia Peninsulare. Un ampio specchio d'acqua incorniciato dai rilievi dell'Appennino Settentrionale che in questo settore, per i tipi di roccia che li caratterizzano (arenarie e marne), hanno delle forme più dolci.



Figura 1 Foto del lago Trasimeno scattata dal suo versante meridionale verso nord. (Foto di C. Caricchi)
Figure 1 *Photo of Trasimeno Lake taken from its southern shore towards the north. (Photo by C. Caricchi)*

A differenza degli altri laghi dell'Italia centrale, come il Lago di Bolsena, di Vico o di Bracciano, che sono impostati in aree vulcaniche, il Trasimeno ha tutta un'altra storia geologica. La sua formazione ed evoluzione, infatti, è stata delineata da processi tettonici.
Prima di descrivere la storia geologica dell'area del Trasimeno, osserviamo dove il lago è situato oggi. Da un punto di vista geologico, il lago Trasimeno si trova nella porzione interna dell'Appennino Settentrionale, (Figura 2) una catena montuosa a forma arcuata [1] generatasi a partire dall'Oligocene dallo scontro di due placche tettoniche, quella Europea e quella Africana. Questa collisione ha portato a processi di compressione e conseguente corrugamento della crosta terrestre, con la formazione delle catene montuose (orogenesi) che circondano attualmente il Mar Mediterraneo.



Figura 2 Mappa che mostra la posizione del lago Trasimeno, bordato a Nord, Est e Sud da rilievi collinari, che fanno parte dell'Appennino Settentrionale e ad Ovest dalla pianeggiante Val di Chiana.

Figure 2 *A map illustrating the location of Lake Trasimeno, bordered to the north, east and south by the rolling hills of the Northern Apennines, and to the west by the flat plains of the Val di Chiana.*

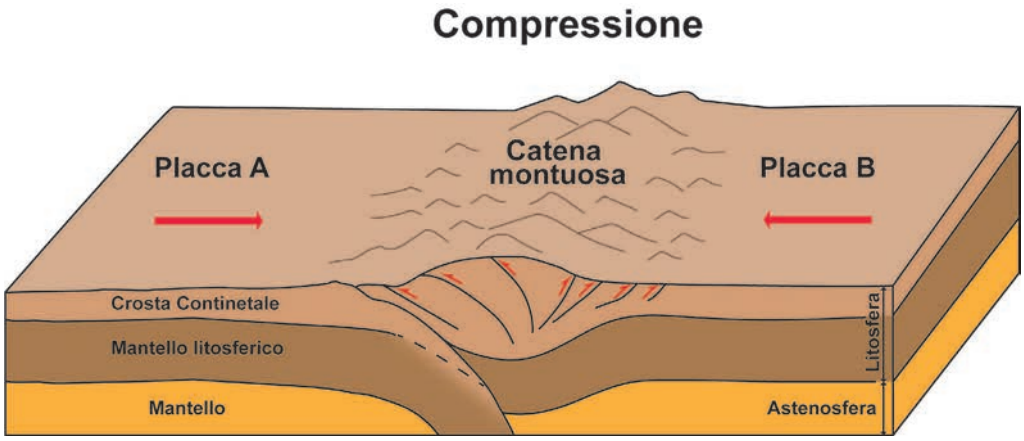


Figura 3 Schema semplificato che mostra il processo di collisione che porta alla formazione di un rilievo montuoso, per corrugamento ed inspessimento della crosta terrestre sotto l'azione di forze compressive (vedi catena orogenica). (Grafica di C. Caricchi)

Figure 3 *Simplified diagram illustrating the collision process that results in the formation of a mountain range through the folding and thickening of the Earth's crust under compressive forces(see orogenic belt). (Graphics by C. Caricchi)*

Successivamente a questa fase di compressione, a partire da circa 5 milioni di anni fa l'area del Trasimeno è stata interessata da una nuova fase tettonica di tipo estensionale, in cui faglie

dirette, hanno portano alla genesi di aree sollevate, o dorsali, ed aree depresse, o bacini (Figura 4), come ad esempio le attuali Val di Chiana e la Valtiberina. Il lago Trasimeno si posiziona sul bordo orientale del bacino della Valdichiana (Figura 2).

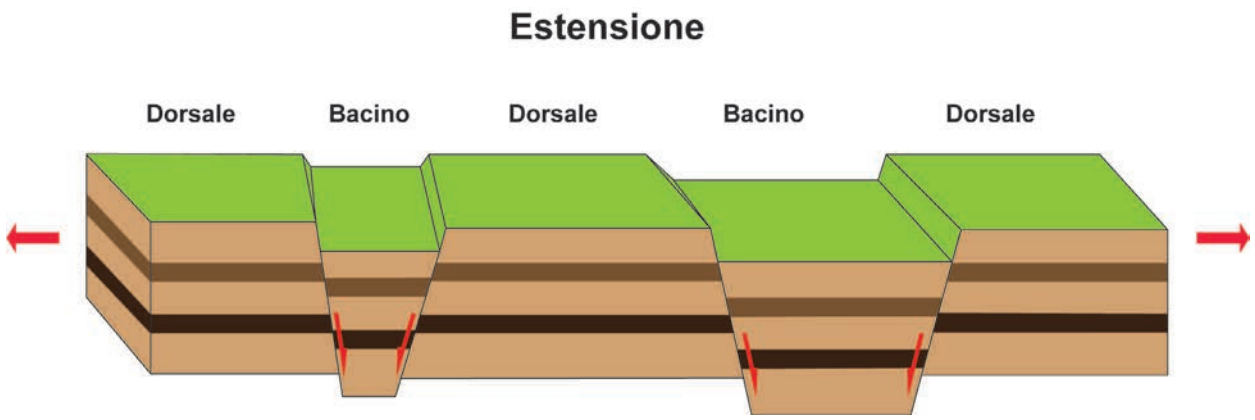


Figura 4 Schema semplificato che mostra il processo di estensione a mezzo di faglie dirette (o normali) che porta la formazione di aree sollevate (dorsali) ed aree depresse (bacini). (Grafica di C. Caricchi)
Figure 4 *A simplified diagram illustrating the extension process through normal faults, which leads to the formation of uplifted areas (horsts) and depressed areas (basins). (Graphics by C. Caricchi)*

Ma quando è che si forma il lago e per quali processi geologici?

L'ambiente lacustre si imposta nel Pleistocene medio (tra 1.4 e 0.7 milioni di anni fa) ma possiamo far iniziare la storia geologica dell'area del Trasimeno qualche milione di anni prima, nel Miocene (13 milioni di anni fa). Vediamo insieme cosa è successo!
Nel corso dell'Oligocene e di parte del Miocene, la fase tettonica compressiva aveva portato alla formazione della catena montuosa dell'Appennino Settentrionale, costituita da unità tettoniche, sovrapposte una sull'altra, il cui nome deriva dalla loro originale posizione paleogeografica: spostandosi da Ovest verso Est, si parla di Unità Liguri, Unità Toscane e Unità Umbro-Marchigiane (Figura 5). Nell'area del Trasimeno, questa fase di collisione ed avvallamento terminò nel Serravalliano, circa 13 milioni di anni fa.
Successivamente, durante il Messiniano (7-5 milioni di anni fa) la comunicazione tra Mar Mediterraneo ed Oceano Atlantico si ridusse fino ad interrompersi totalmente. Il Mar Mediterraneo andò incontro ad una riduzione del suo livello (con un abbassamento di circa 1.500 m), trasformandosi in un grande lago le cui acque erano soggette a condizioni di forte evaporazione [2].
Questo portò delle conseguenze anche nell'area del Trasimeno, dove la catena, ora emersa, andò incontro ad una fase di erosione da parte degli agenti esogeni (Figura 6). In questo periodo l'area del Trasimeno era caratterizzata da un paesaggio fluviale con una delle valli principali posizionata proprio dove oggi si trova il lago.
A partire da 5 milioni di anni fa (Pliocene), l'area fu interessata da una fase di estensione, che portò alla formazione di aree depresse (bacini) come quelle della Val di Chiana. All'inizio del Pliocene, inoltre, ci fu un innalzamento rapido del livello del mare, che si insinuò tra le strutture emerse della catena appenninica. A quell'epoca il Mar Tirreno si estendeva fino all'attuale bacino della Valdichiana, e il Lago Trasimeno ne costituiva un Golfo, in cui il mare rientrava all'interno della costa, occupando la valle, scavata durante la precedente fase di erosione (Figura 7).
Durante il Pleistocene, circa 2 Milioni di anni fa, la conformazione dell'area del Trasimeno cambiò ancora. Il mare si ritirò temporaneamente, e l'area del Trasimeno si trovò a far parte di un

ambiente di tipo continentale. La costa del Mar Tirreno si trovava allora circa 40 km più a sud e la depressione del Trasimeno venne a far parte di una valle fluviale, i cui corsi d'acqua portavano i sedimenti erosi dalle colline verso il mare.

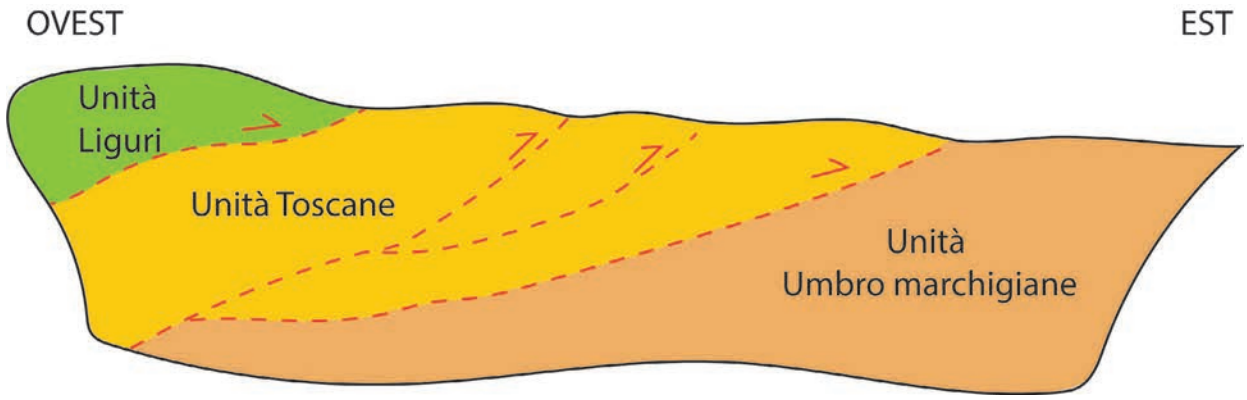


Figura 5 Sezione Geologica semplificata che mostra l'area del Trasimeno alla fine della fase di compressione e la strutturazione della catena con le unità tettoniche sovrapposte. (Ridisegnata da Gasperini et al. [2010])

Figure 5 *Simplified geological section showing the Trasimeno area at the end of the compression phase and the structuring of the chain with the overlapping tectonic units. (Redrawn by Gasperini et al. [2010])*

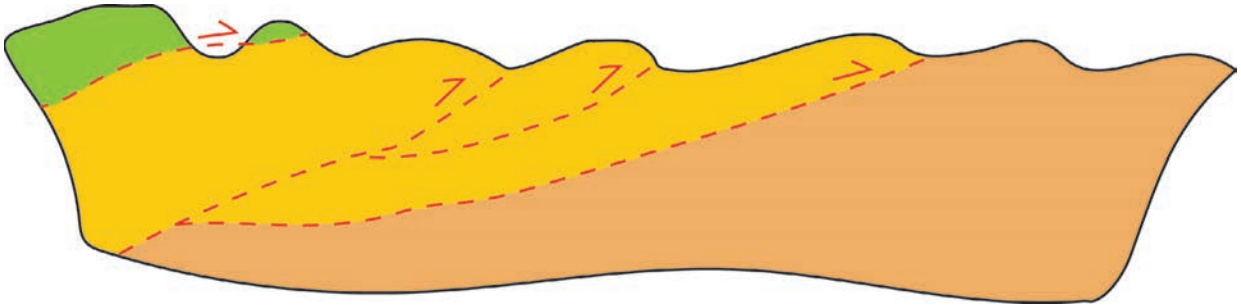


Figura 6 Sezione Geologica semplificata che mostra l'area del Trasimeno alla fine della fase di erosione avvenuta nel Messiniano. (Ridisegnata da Gasperini et al. [2010])

Figure 6 *Simplified geological section showing the Trasimeno area at the end of the erosional phase that occurred in the Messinian. (Redrawn by Gasperini et al. [2010])*

Il mare si ritirò definitivamente dalla regione tra 1.4 e 0.7 milioni di anni fa, alla fine del Pleistocene inferiore, ma l'attività tettonica estensionale continuò a caratterizzare l'area, portando ad un lento e continuo approfondimento (subsidenza) della depressione del Trasimeno, dove si impostò l'ambiente lacustre.

In questo periodo, molti altri bacini lacustri, grandi e piccoli, si svilupparono nelle zone vallive della regione Umbria, da Pietrafitta a Gubbio, da Colfiorito a Norcia. Il Trasimeno è l'unico di questi laghi, sopravvissuto fino ai giorni nostri. Siamo così arrivati alla fine della nostra storia.

Questa ricostruzione è stata possibile grazie ad uno studio multidisciplinare, condotto dall'Università degli Studi di Perugia in collaborazione con il CNR-ISMAR di Bologna e la Regione Umbria, che ha messo insieme i risultati di diversi tipi di investigazioni, dalle analisi geofisiche del sottosuolo alla geologia di terreno.

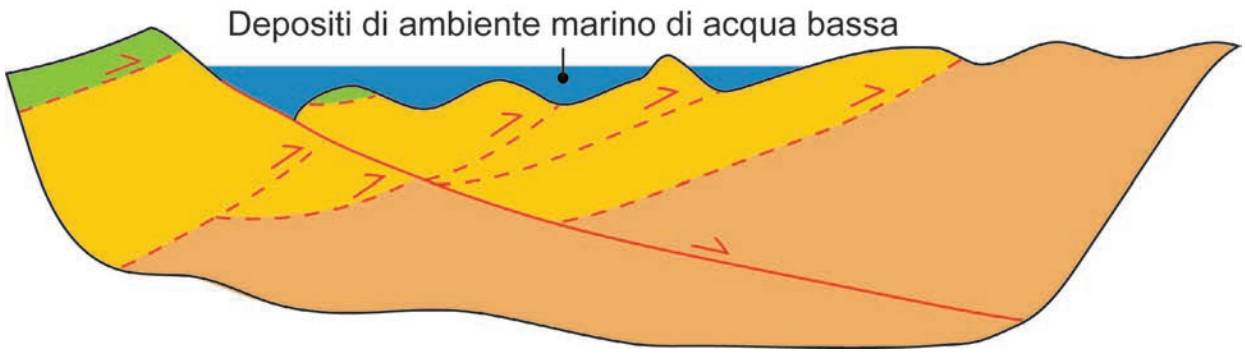


Figura 7 Sezione Geologica semplificata che mostra la fase di ingressione marina del Pliocene e l'inizio della fase tettonica estensionale (Pliocene 4 milioni di anni fa). (Ridisegnata da Gasperini et al. [2010])
Figure 7 *Simplified geological section showing the marine transgression phase during the Pliocene time and the beginning of the extensional tectonic phase (Pliocene, 4 million years ago). (Redrawn by Gasperini et al. [2010])*

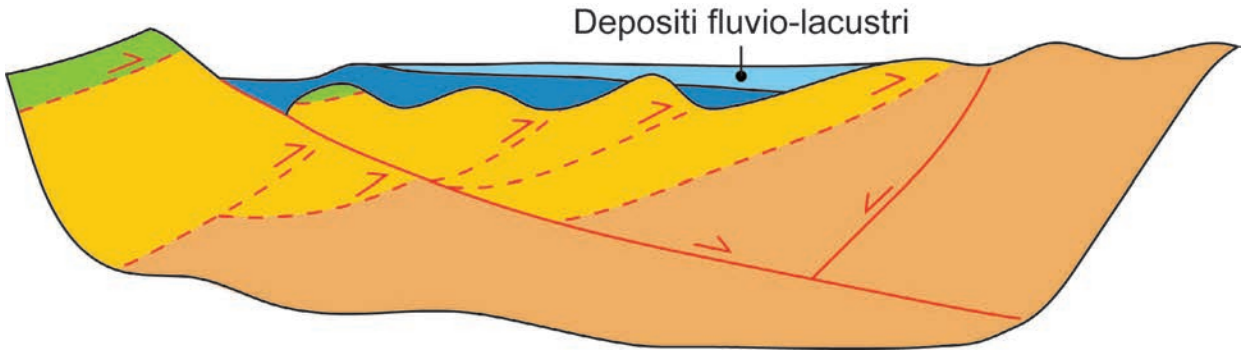


Figura 8 Sezione Geologica semplificata che mostra l'area del Trasimeno (Fine Pliocene-Oggi). (Ridisegnata da Gasperini et al. [2010])
Figure 8 *Simplified geological section showing the Trasimeno area (Late Pliocene-Today). (Redrawn by Gasperini et al. [2010])*

Glossario

Catena orogenica: stretta ed allungata zona della Terra, indicata in superficie da un rilievo montuoso e caratterizzata in profondità da inspessimento crostale [*3*]. È prodotta dalle forze compressive che agiscono tra due placche convergenti.
Crosta terrestre: è lo strato più superficiale della Terra, la crosta continentale si distingue da quella oceanica per composizione, densità e spessore. Insieme alla parte superiore del mantello, costituisce la Litosfera, involucro esterno rigido del pianeta.
Mantello terrestre: strato intermedio della Terra, compreso tra la crosta ed il nucleo.
Orogenesi: insieme dei processi tettonici, metamorfici e magmatici che determinano la formazione di una catena montuosa, al limite tra due placche convergenti.
Faglia normale: frattura (deformazione fragile) della roccia, con relativo movimento delle due parti a contatto, legata a processi di distensione crostale.
Sezione geologica: un profilo verticale attraverso una porzione di territorio, che mette in evidenza l'andamento dei corpi rocciosi in profondità.
Subduzione: processo per il quale la litosfera densa e fredda sprofonda nel mantello.
Unità tettoniche: insieme di rocce che si sovrappongono le une sulle altre all'interno di una catena orogenica, in risposta a forze di compressione.



Figura 9 Foto del lago Trasimeno scattata dal suo versante meridionale verso nord. Si possono osservare la sponda sud-orientale e l'Appennino Settentrionale sullo sfondo. (Foto di C. Caricchi)

Figure 9 *Photo of Trasimeno Lake taken from its southern shore towards the north. You can observe the South-Eastern shore and the Northern Apennines in the background. (Photo by C. Caricchi)*

Bibliografia

Gasperini L., Barchi M.R., Bellucci L.C., Bortoluzzi G., Ligi, M., Pauselli C., (2010). *Tectonostratigraphy of Lake Trasimeno (Italy) and the geological evolution of the Northern Apennines*. Tectonophysics, 492, 164-174.

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2019/05/07/perche-lappennino-settentrionale-ha-una-forma-arcuata/

[2] https://ingvambiente.com/2020/04/26/a-lezione-di-geologia-la-crisi-di-salinita-del-mediterraneo/

[3] https://ingvambiente.com/2020/04/01/anche-le-montagne-hanno-le-radici/

L'Era della plastica

Marina Locritani[1] e Silvia Merlino[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2
[2]CNR | Istituto di Scienze Marine

La plastica pervade ormai i nostri mari con pesanti ripercussioni sull'uomo e sull'ambiente. Il mondo scientifico pone l'attenzione su questa importante problematica con numerosi studi e progetti dedicati al monitoraggio dei rifiuti dispersi in mare e lungo le coste.

Il termine **plastica** si applica ad una vasta gamma di materiali con proprietà diverse ed incredibilmente versatili. Sono economici, leggeri, resistenti, durevoli, hanno un elevato isolamento termico ed elettrico. La plastica è costituita da polimeri sintetici, macromolecole derivate da petrolio o gas, ma anche da materiale biologico con aggiunta di additivi chimici. La diversità dei polimeri e la versatilità delle loro proprietà facilita la produzione di una vasta gamma di prodotti in plastica che portano a progressi tecnologici, risparmi energetici e numerosi altri vantaggi per la società. Il primo polimero sintetico, la **bachelite**, è stato sviluppato dal chimico belga Leo Baekeland nel 1907. Molte altre materie plastiche furono successivamente sviluppate nel corso dei pochi successivi decenni. La produzione di oggetti di utilizzo comune in plastica è iniziata a partire dagli anni '40 e '50 e ha preso realmente piede dagli anni '60 in poi.

Qual è l'impatto della plastica sul pianeta?

È quindi da circa un centinaio di anni che la plastica è entrata nella vita dell'uomo e oggi la quantità di plastica prodotta annualmente corrisponde circa alla biomassa umana globale. Purtroppo una grossa parte di questa viene ancora rilasciata e dispersa in modo non appropriato sul nostro Pianeta. Il collettore della maggior parte dei rifiuti plastici non correttamente smaltiti o riciclati è l'oceano. Se non si interrompe lo sversamento dei rifiuti di plastica, **nel 2025 il rapporto tra quantitativo di plastica e pesci sarà di uno a cinque e nel 2050 la percentuale di plastica in mare sarà maggiore di quella di pesce.** Questo porterà a gravi conseguenze per gli ecosistemi e tutta la catena alimentare.
Nel 2015 sono stati effettuati i primi monitoraggi a livello globale della presenza di plastica nell'oceano. I dati hanno mostrato cinque grandi accumuli di plastica negli oceani. Le **isole di plastica**, così vengono chiamate, sono **due nell'oceano Pacifico**, **due nell'oceano Atlantico** e **una nell'oceano Indiano**. Questi accumuli si creano a causa della circolazione marina che è caratterizzata da grandi vortici oceanici che tendono a concentrare le plastiche nella loro parte centrale. Si stima che 250 milioni di chilogrammi di inquinamento da plastica galleggino sulla superficie dell'oceano globale [Baudena et al., 2022].

E il Mediterraneo?

Anche il nostro Mare Mediterraneo non è estraneo al problema. Un sesto grande accumulo infatti è stato individuato (sempre dal monitoraggio del 2015) proprio qui, dove **sono concentrate circa il 7% delle microplastiche totali stimate nell'Oceano.** Il nostro, infatti, è un mare chiuso e plastiche e microplastiche si accumulano in concentrazioni preoccupanti.

È stimato che nel Mediterraneo galleggino circa 650 miliardi di particelle di plastica. La distribuzione è però più omogenea rispetto a quella che si ha in oceano, non ci sono infatti zone di accumulo permanente a causa del forte dinamismo delle correnti superficiali; tuttavia, concentrazioni più elevate di rifiuti sono state riscontrate nella parte **Occidentale del Mediterraneo** e in **Adriatico**. La quantità di materiale plastico disperso in mare e nelle zone costiere è così in continuo aumento, al punto da rendere inevitabile lo studio dei possibili impatti di tali materiali sull'ecosistema marino. Gli studi hanno dimostrato che gli effetti delle plastiche in mare sono molteplici e dipendono dalle diverse tipologie e dimensioni dei frammenti dispersi.
La combinazione di radiazione solare e acqua salata accelera la frammentazione delle plastiche, formando le cosiddette **microplastiche** che, "confuse" con il fitoplancton, entrano nella catena alimentare dei pesci.

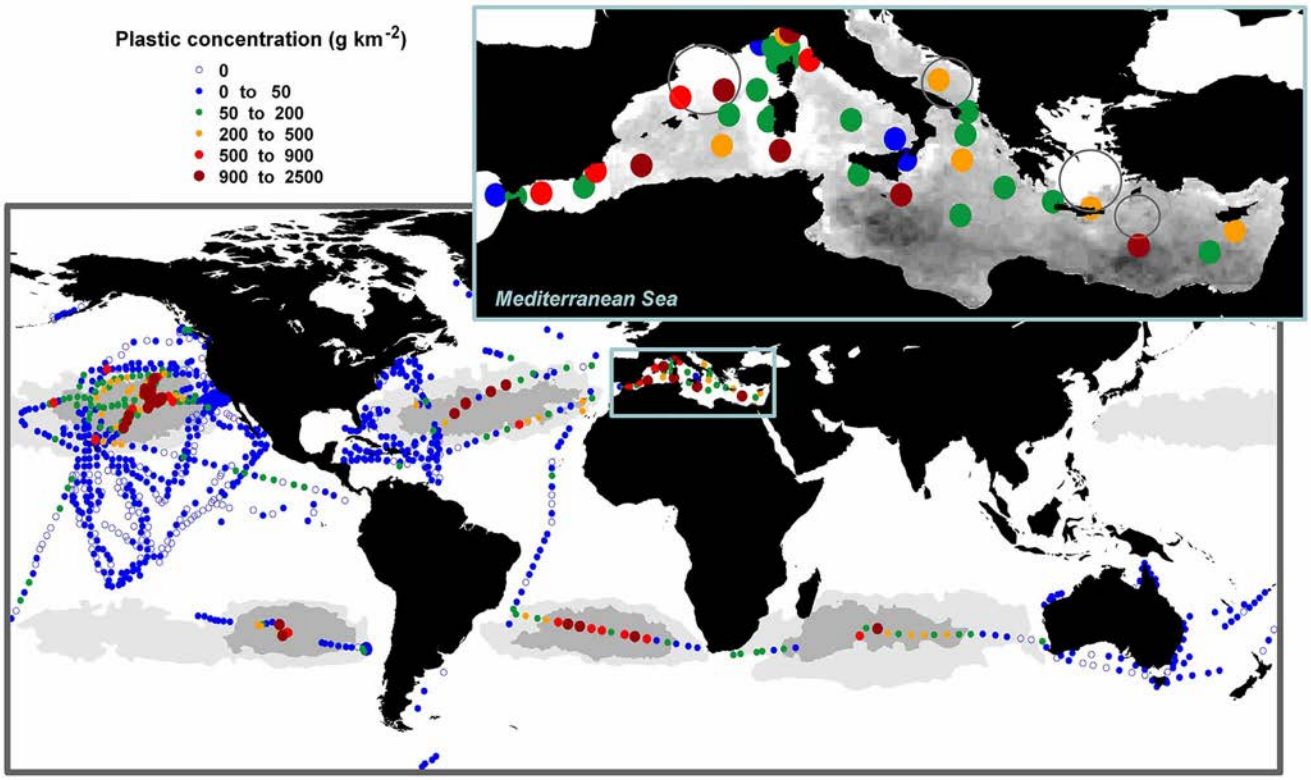


Figura 1 Distribuzione della plastica negli oceani con dettaglio sul Mediterraneo. Le aree grigie indicano le zone di accumulo previste da un modello globale di circolazione superficiale della corrente. La densità media di plastica che galleggia sulla superficie del Mediterraneo è risultata essere paragonabile alle zone di accumulo descritte per i cinque vortici oceanici subtropicali. (Da Cozar et al. [2015])

Figure 1 *Distribution of plastic in the Oceans with a focus on the Mediterranean. The gray areas indicate the zones of accumulation predicted by a global surface current circulation model. The average density of plastic floating on the surface of the Mediterranean has been found to be comparable to that in the accumulation zones described for the five subtropical oceanic gyres. (From Cozar et al. [2015])*

Tutto questo danneggia direttamente anche l'uomo?

L'analisi *No Plastic in Nature: Assessing Plastic Ingestion from Nature to People* del 2019, è stata condotta dall'Università di Newcastle (Australia) su commissione del WWF e si basa su 52 studi preesistenti. Lo studio stima che l'uomo ingerisca (attraverso inalazione, cibo e bevande) circa **2.000 pezzi di microplastica ogni settimana**, 5 g, ossia **l'equivalente di una carta di credito**.

Gli effetti specifici dell'ingestione di microplastiche sulla salute umana non sono ancora completamente compresi, ma gli scienziati sospettano che il rischio per la salute possa essere più importante di quanto si possa pensare.
Abbiamo descritto brevemente i dati sulla distribuzione superficiale della plastica negli oceani mondiali e nel Mediterraneo. Ma quella che galleggia sulla superficie marina è probabilmente **solo la punta di un iceberg** perché molti dei rifiuti rilasciati in mare, provenienti principalmente dai fiumi e quindi dall'entroterra, si riversano sulle spiagge e finiscono sui fondali marini. Infatti, le plastiche disperse in ambiente marino spesso sono soggette ad incrostazioni. Una volta che la densità dell'oggetto supera quella dell'acqua di mare, affonda all'interno della colonna d'acqua depositandosi sul fondo. Su questi due comparti (mare profondo e coste) c'è ancora molto da studiare.

Il Progetto SeaCleaner

Negli ultimi 10 anni il mondo scientifico ha posto l'attenzione su questa problematica e, incoraggiati dalla Comunità Europea [1] [2], è cresciuto il numero di progetti e di studi dedicati al monitoraggio di rifiuti dispersi in mare e lungo le coste.
L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (**INGV**) è impegnato, sin dal 2013, nel progetto **SEACleaner** [3], accanto al Consiglio Nazionale Ricerche – Istituto di Scienze MARine della Spezia (CNR-ISMAR) e numerosi altri enti ed associazioni, con il duplice obiettivo di **monitorare l'accumulo di rifiuti spiaggiati** (beached marine litter) nell'Alto Mar Tirreno e nel Mar Ligure Orientale (incluso il Santuario dei Cetacei), e di **sensibilizzare la popolazione** su questo delicato argomento. Il progetto ha coinvolto, negli ultimi 10 anni, più di 5.000 tra studenti e cittadini nel monitoraggio dei rifiuti spiaggiati.
Le spiagge in cui sono stati eseguiti i monitoraggi si dividono in:

- aree collocate in zone turistiche pulite regolarmente (Urbane, U);
- aree vicine ai centri urbani, visitate sporadicamente da turisti e pulite solo occasionalmente (Urbanizzate, Uz);
- zone protette in cui è interdetta la presenza dell'uomo e di regola non soggette a pulizie (Naturali, N).

In particolare i siti scelti sono:

- A1 – Parco Nazionale delle Cinque Terre, area di tipo U;
- A2 – Parco Naturale Regionale di Portovenere, area di tipo Uz;
- A3 – una spiaggia cittadina non inserita in un Parco, Venere Azzurra, area di tipo U;
- A4 – Parco Naturale Regionale Migliarino, San Rossore-Massaciuccoli, area di tipo N;
- A5 – Isola di Pianosa (Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano), area di tipo Uz.

Nei primi due anni in cui il progetto è stato avviato (2013-2015), in un'area di 32.154 m2, **sono stati rimossi e classificati 34.027 rifiuti.**

I siti con più alta densità di rifiuti sono risultati essere A4, A2 e A5 (Figura 3).
L'area A4 è un sito N (Naturali); nonostante non sia accessibile al turismo, il sito è molto vicino alla foce dell'Arno. Di conseguenza raccoglie tutti i rifiuti provenienti dall'entroterra e per la mancanza di pulizie li accumula nel tempo (sono stati riscontrati numerosi rifiuti stratificati nelle dune).
L'area A2 è un sito Uz (urbanizzato), sottoposto a pulizie sporadiche e alla presenza limitata del turismo. È un sito collocato in prossimità di un porto commerciale con un'elevata attività di pesca. Probabilmente questo causa l'alta percentuale di polistirolo raccolta in questa località.
Il sito A5 è un altro sito Uz, lontano da fonti di inquinamento (città o fiumi), interdetto all'uomo

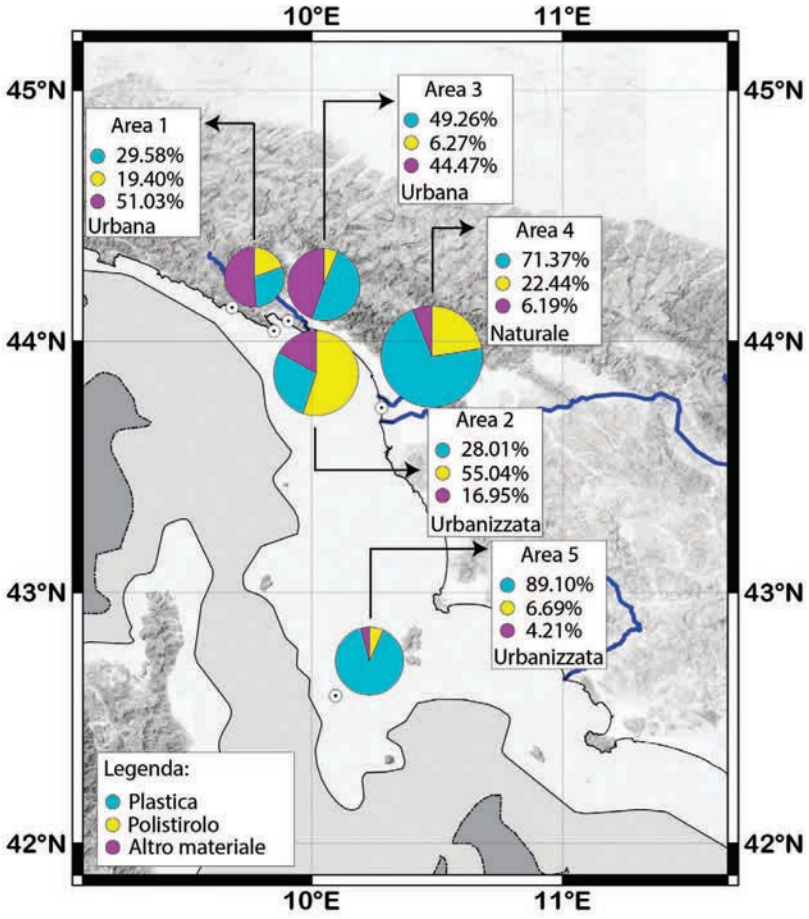


Figura 3 Distribuzione dei marine litter spiaggiati nel Santuario dei Cetacei. La mappa indica le percentuali medie di densità di rifiuti suddivisi in plastica, polistirolo e altri materiali. (Adattato da Giovacchini et al. [2018])

Figure 3 *Distribution of marine litter beached in the Cetacean Sanctuary coastal area. The map shows average percentages of litter density broken down into plastic, polystyrene, and other materials. (Adapted from Giovacchini et al. [2018])*



Figura 4 Fotografie delle spiagge monitorate all'interno delle 5 Aree di studio: Area 1 (A1) Parco Nazionale delle Cinque Terre; Area 2 (A2) Parco Naturale Regionale di Portovenere, Area 3 (A3) Venere Azzurra non inserita in un Parco; Area 4 (A4) Parco Naturale Regionale Migliarino, San Rossore-Massaciuccoli; Area 5 (A5) Parco Nazionale dell'Arcipelago Toscano. (Foto di S. Merlino, M. Locritani, A. Giacchè e E. Mioni)

Figure 4 *Beaches photographs monitored within the 5 Study Areas: Area 1 (A1) Cinque Terre National Park; Area 2 (A2) Portovenere Regional Natural Park; Area 3 (A3) Venere Azzurra not included in a Park; Area 4 (A4) Migliarino, San Rossore-Massaciuccoli Regional Natural Park; Area 5 (A5) Tuscan Archipelago National Park. (Photos by S. Merlino, M. Locritani, A. Giacchè and E. Mioni)*

e sottoposto a pulizie sporadiche. Mostra una densità di rifiuti maggiore delle due restanti aree A1 e A3 entrambe U (urbane), sottoposte ad una regolare pressione turistica e antropica e con pulizie periodiche e regolari.



Figura 5 Spiaggia all'interno del Parco Naturale Regionale di Migliarino San Rossore Massaciuccoli. (Foto di M. Locritani)

Figure 5 *Beach within the Migliarino San Rossore Massaciuccoli Regional Natural Park. (Photo by M. Locritani)*

Risultati

Il risultato paradossale di questo studio è che **la maggior parte di marine litter** è stata raccolta **nelle aree a maggior protezione ambientale**, dove non è consentito l'accesso al turismo e dove non vengono effettuate pulizie della spiaggia. **La plastica, in particolare, è risultata essere, molto più abbondante nei siti interdetti al turismo (N) o poco frequentati**, come si può vedere dalla mappa: il 71,37% nell'area A4 e l'89,10% nell'area A5, mentre è meno abbondante negli altri siti. Questo è dovuto probabilmente al fatto che il principale apporto di rifiuti in tali zone proviene dal mare, e sono perciò assenti le tipiche categorie associate alla frequentazione turistica (carta, sigarette, vetro ecc).

Tali risultati mostrano come le aree maggiormente protette siano, quindi, **quelle in cui la plastica permane più tempo.** Queste aree sono inoltre soggette a temperature molto elevate in estate. L'esposizione ad alte temperature accelera la degradazione delle plastiche. Il caldo infatti causa fratture sugli strati superficiali, accentuati dallo stress indotto dall'umidità o dagli agenti meteo-marini, e dall'abrasione contro la sabbia. La riduzione delle dimensioni delle particelle non riduce la quantità di plastica in ambiente, anzi, i frammenti più piccoli sono più difficili da rimuovere.

Quanto più piccola è la dimensione della microplastica, tanto più ampia sarà la gamma di organismi marini che sono in grado di ingerirla o comunque interagire con essa.
Le Aree Marine Protette ad elevata restrizione, dove non sono concesse le pulizie periodiche, **potrebbero diventare quindi potenziali siti sorgenti di microplastiche** derivate dall'azione di degradazione solare (fotodegradazione) e meccanica in seguito alla lunga permanenza sulle spiagge.
Questi risultati ci hanno fatto riflettere sull'utilizzo della plastica, che rimane un materiale indispensabile, ma che deve essere usato e soprattutto smaltito correttamente. Le numerose ricerche fatte negli ultimi 10 anni, e l'aumento della consapevolezza dei problemi che la plastica può creare all'ecosistema e all'uomo, hanno portato ad un cambio di rotta a livello legislativo. Un grande progresso è stato fatto con la direttiva europea SUP (Single use plastic), in vigore in Italia dal 14 gennaio 2022, che regolamenta la riduzione del consumo di plastica monouso e limita la sua dispersione nell'ambiente e negli oceani.
Il progetto SeaCleaner, oltre a raccogliere i dati con la modalità citizen science, si occupa anche di diffondere e divulgare i risultati ottenuti, realizzando progetti in ambito scolastico, filmati divulgativi, mostre interattive e altri tipi di attività che coinvolgano il più possibile le nuove generazioni.
Nel 2023 SeaCleaner ha ricevuto un importante riconoscimento, risultando il miglior progetto di Citizen Science nell'ambito del concorso nazionale indetto dal CNR "Premio Biblioteca Marconi".

Bibliografia

Baudena A., Ser-Giacomi E., Jalón-Rojas I., Galgani F., Pedrotti M. L. (2022). *The streaming of plastic in the Mediterranean Sea*, Nature Communications, 13(1), 2981. https://doi.org/10.1038/s41467-022-30572-5

Cózar A., Sanz-Martín M., Martí E., González-Gordillo J.I., Ubeda B., Gálvez J.A., Irigoien,X., Duarte C.M. (2015). *Plastic accumulation in the Mediterranean Sea*. PLOS ONE, 10(4), e0121762. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121762

Giovacchini A., Merlino S., Locritani M., Stroobant M., (2018). *Spatial distribution of marine litter along italian coastal areas in the Pelagos sanctuary (Ligurian Sea - NW Mediterranean Sea): A focus on natural and urban beaches*, Marine Pollution Bulletin, 130, 140-152. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.02.042

Sitografia

[1] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028
[2] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0904.
[3] https://sites.google.com/view/seacleaner

Qual è lo stato di salute dei ghiacciai continentali?

Daniele Melini

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

A causa delle crescenti emissioni di gas serra, le temperature globali aumentano ed i ghiacciai continentali fondono a ritmi sempre più elevati. Un team internazionale di scienziati polari ha unito le forze per costruire un quadro aggiornato dello stato di salute dei ghiacciai dell'Antartide e della Groenlandia.

Il **riscaldamento globale** è una realtà che già oggi possiamo toccare con mano e che, nei prossimi decenni, avrà un impatto sempre maggiore sulla nostra società. L'aumento delle concentrazioni di anidride carbonica nell'atmosfera terrestre, dovuto principalmente all'impiego dei combustibili fossili, sta progressivamente alterando i delicati equilibri che regolano la temperatura del nostro pianeta. I dati dimostrano in modo inequivocabile che **le temperature medie globali sono aumentate di circa 1 grado rispetto al periodo che precede la rivoluzione industriale**.
L'effetto più evidente dell'aumento delle temperature è la **fusione dei ghiacciai**. Sulla Terra esistono due grandi ghiacciai continentali: la **Groenlandia** e l'**Antartide**. Se il ghiaccio della Groenlandia fondesse completamente, l'acqua prodotta sarebbe sufficiente a far salire in tutto il mondo il livello medio degli oceani di oltre **7 metri**. Se invece fondessero i ghiacciai dell'Antartide, molto più estesi, il livello marino crescerebbe di **quasi 60 metri**.

In che stato di salute si trovano i ghiacciai della Groenlandia e dell'Antartide?

Tenere sotto controllo lo stato di salute dei ghiacciai della Groenlandia e dell'Antartide è molto importante sia per monitorare gli effetti dei cambiamenti climatici in atto, sia per raccogliere dati utili per prevedere l'evoluzione del clima nel prossimo futuro.
A partire dai primi anni '90 sono stati lanciati in orbita satelliti dotati di strumenti in grado di misurare l'evoluzione dei ghiacciai dallo spazio. Misurando la distanza fra il satellite e la superficie del ghiaccio con speciali altimetri, ad esempio, è possibile capire se lo spessore della calotta stia crescendo o assottigliandosi. Una nuova generazione di strumenti, sviluppati a partire dagli anni 2000, misura con grandissima precisione il campo gravitazionale della Terra, ed è in grado di rilevare i debolissimi cambiamenti di gravità dovuti alla variazione della massa di ghiaccio.
Utilizzare la mole di dati raccolti in quasi 30 anni di misure satellitari per costruire un quadro preciso dell'evoluzione dei ghiacciai continentali richiede un lavoro di analisi piuttosto complesso. Occorre infatti mettere insieme dati raccolti con tecniche diverse, e tenere traccia della precisione dei vari strumenti per calcolare il margine d'errore associato al risultato finale. Inoltre occorre tenere conto dell'interazione fra il ghiaccio e la Terra su cui poggia. Infatti, se un ghiacciaio si assottiglia, il suo peso si riduce. Conseguentemente la superficie della Terra si solleva, dal momento che il carico che vi poggia si è alleggerito. Questo effetto, chiamato **rimbalzo post-glaciale**, può essere calcolato con modelli geodinamici globali e deve essere rimosso dai dati osservati per isolare il solo contributo dovuto ai cambiamenti climatici. Inoltre, poiché la Terra non ha un comportamento perfettamente elastico, la terraferma sotto i ghiacciai si sta ancora sollevando in seguito allo scioglimento delle calotte dell'ultima era glaciale, iniziato circa 20.000 anni fa. Anche questo effetto deve essere tenuto in considerazione per migliorare la precisione e l'affidabilità delle stime dei tassi di scioglimento.

Per ottenere le migliori stime possibili dell'evoluzione dei ghiacciai continentali, da alcuni anni è stato formato un team internazionale di ricerca, chiamato **IMBIE** (International Mass Balance Intercomparison Exercise, http://www.imbie.org). L'obiettivo della collaborazione IMBIE, finanziata dall'**Agenzia Spaziale Europea** (ESA) e dalla **NASA**, è quello di unire gli sforzi della comunità internazionale di scienziati polari per **ottenere un quadro aggiornato e preciso dello stato di salute dei ghiacciai continentali**. Attualmente il team è composto di 68 ricercatori appartenenti a 41 università e centri di ricerca sparsi per il mondo, fra cui l'**INGV** e l'**Università di Bologna**.

Negli ultimi anni, la collaborazione IMBIE ha pubblicato sulla prestigiosa rivista *Nature* i risultati di due studi sullo stato di salute dei ghiacciai dell'Antartide [Shepherd et al., 2018] e della Groenlandia [Shepherd et al., 2020]. Più recentemente, il team IMBIE ha pubblicato un terzo studio sulla rivista *Earth System Science Data* [Otosaka et al., 2023], nel quale è stata presentata una ricostruzione integrata della variazione della quantità di ghiaccio in Antartide e in Groenlandia durante il periodo dal 1992 al 2020, attraverso l'analisi dei dati raccolti da 17 satelliti, integrati con modelli indipendenti di rimbalzo post-glaciale e modelli climatici regionali.



Figura 1 Nel corso degli anni, il flusso turbolento dell'acqua proveniente dalla fusione dei ghiacciai ha scavato questo canyon profondo 18 metri; notare le persone sulla destra per avere un'idea delle dimensioni. (Foto di Ian Jaughin)

Figure 1 *Over the years, the turbulent flow of water coming from melting glaciers has carved out this 18 meter deep canyon; note the people on the right to get an idea of size. (Photo by Ian Joughin)*

I risultati ottenuti rappresentano lo stato dell'arte delle nostre attuali conoscenze sui ghiacciai continentali. **Mostrano in maniera inequivocabile una perdita costante di ghiaccio nel periodo esaminato**, seppure con una velocità di fusione notevolmente variabile nel tempo: dal 1992 al 2020, le calotte polari hanno perso complessivamente 7560 miliardi di tonnellate di ghiaccio, equivalenti a **un cubo di ghiaccio di 20 km di lato**.

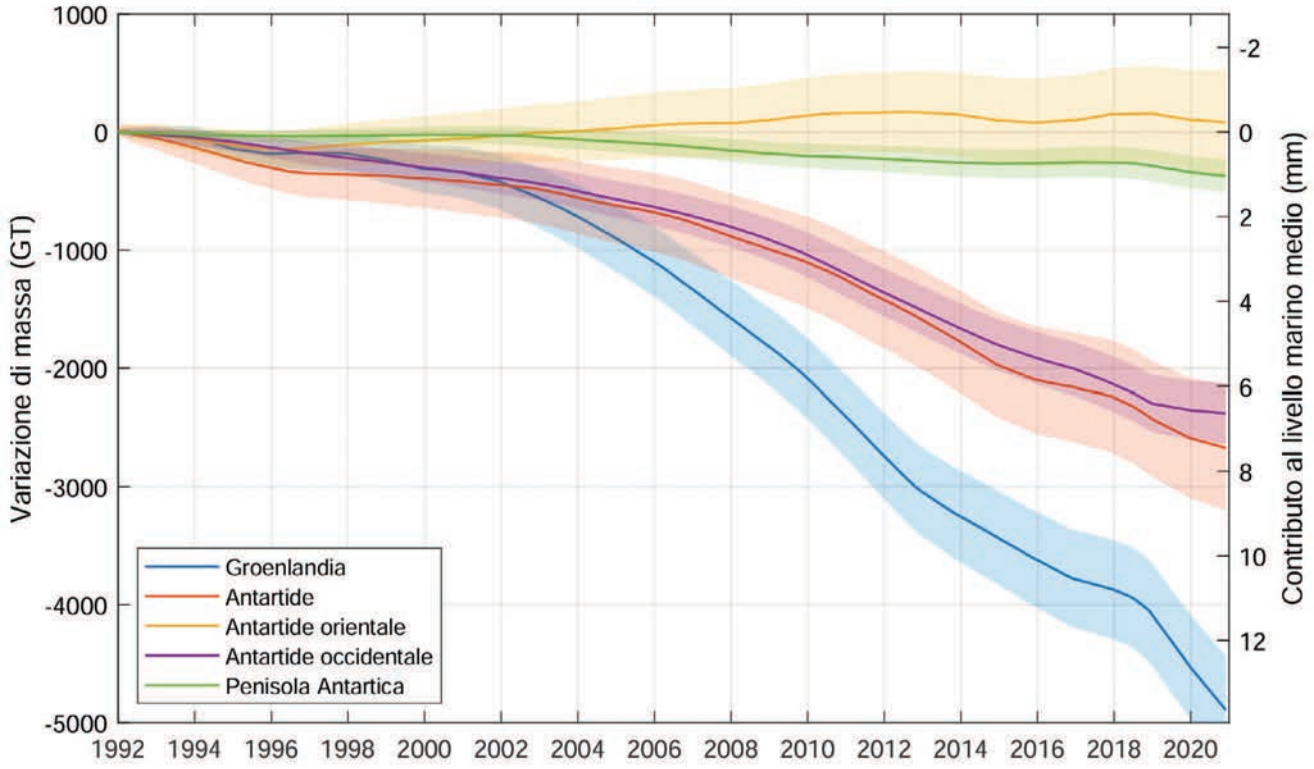


Figura 2 Il grafico mostra la variazione complessiva della massa dei ghiacciai continentali a partire dal 1992, secondo le stime della collaborazione IMBIE (http://www.imbie.org). Le linee continue rappresentano il bilancio di massa dell'Antartide e della Groenlandia ed i contributi individuali dell'Antartide orientale, dell'Antartide occidentale e della penisola antartica. Le bande colorate rappresentano il margine di incertezza associato a ciascuna stima. La scala sulla sinistra rappresenta la variazione complessiva di massa di ghiaccio in miliardi di tonnellate (Gt), mentre la scala sulla destra di rappresenta la corrispondente variazione complessiva del livello marino globale medio in millimetri l'anno. (Ridisegnata da Otosaka et al. [2023])

***Figure 2** The graph shows the overall change in the mass of continental glaciers since 1992, according to the estimate of the IMBIE (http://www.imbie.org) collaboration. The solid lines represent the mass balance of Antarctica and Greenland and the individual contributions of East Antarctica, West Antarctica and the Antarctic Peninsula. The colored bands represent the margin of uncertainty associated with each estimate. The scale on the left represents the overall change in ice mass in billions of tons (Gt), while the scale on the right represents the corresponding overall change in average global sea level in millimeters per year. (Redrawn from Otosaka et al. [2023])*

In particolare, i dati indicano un bilancio di massa negativo per le calotte polari in tutti gli anni presi in considerazione, con i sette anni con tasso di scioglimento più elevato registrati tutti nel corso dell'ultimo decennio. **Il 2019 è stato un anno record per lo scioglimento delle calotte polari**, con una perdita di ben 612 miliardi di tonnellate di ghiaccio. Il picco è stato dovuto a un'ondata di calore di portata eccezionale che ha investito la regione artica.

La Groenlandia merita particolare attenzione poiché, per la sua posizione geografica, è più esposta agli effetti del riscaldamento globale e i suoi ghiacciai registrano i tassi di scioglimento più elevati. Dai dati risulta che negli anni '90 i ghiacciai della Groenlandia erano in una condizione relativamente stabile. In questo periodo il tasso di fusione medio si attestava sui 33 miliardi di tonnellate l'anno. A partire dal 2000, le condizioni climatiche hanno favorito un aumento delle temperature dell'atmosfera e degli oceani ed una corrispondente riduzione della copertura di nuvole durante i mesi estivi. Di conseguenza, i ghiacciai hanno iniziato a fondere a velocità sempre crescente: nel 2011 è stato raggiunto un tasso di scioglimento di ben 335 miliardi di tonnellate di ghiaccio, 10 volte il tasso medio degli anni '90. Negli anni successivi lo scioglimento

ha rallentato: nel periodo fra il 2013 ed i 2017 la media è stata di 217 miliardi di tonnellate l'anno, mentre il 2018 si è chiuso con un bilancio di 111 tonnellate di ghiaccio in meno. Questo rallentamento è stato dovuto all'effetto combinato di una serie di cause, fra cui la circolazione atmosferica che ha favorito temperature più basse e l'aumento delle precipitazioni nevose. **Ma a partire dal 2019 la velocità di fusione ha ripreso ad accelerare**, come conseguenza delle ondate di calore di portata eccezionale che hanno investito la regione artica, provocando nel solo 2019 la fusione di oltre 400 miliardi di tonnellate di ghiaccio.

Per l'Antartide, i dati indicano che fino al 2012 i ghiacciai perdevano circa 76 miliardi di tonnellate l'anno. Successivamente la velocità di scioglimento è triplicata a causa della perdita di ghiaccio nell'Antartide occidentale e nella Penisola Antartica, che per la loro posizione geografica sono più esposti al riscaldamento dell'atmosfera e degli oceani, mentre la parte orientale del continente è rimasta in uno stato vicino all'equilibrio, anche grazie all'aumento delle precipitazioni nevose dovuto a una maggiore evaporazione dalla superficie degli oceani.

Nell'ultimo aggiornamento pubblicato dalla collaborazione IMBIE, la tendenza a un'accelerazione dei tassi di scioglimento dei ghiacciai continentali è stata confermata. Analizzando i dati del periodo fra il 1992 e il 2020, è emersa una perdita di ghiaccio dall'Antartide e dalla Groenlandia in tutti gli anni presi in considerazione. Inoltre, i sette anni con il tasso di scioglimento più elevato sono stati registrati tutti nell'ultimo decennio (2010-2020).

Fin qui abbiamo parlato degli ultimi due decenni. Ma cosa possiamo dire su quelli che verranno?



Figura 3 Il sole di mezzanotte getta una luce dorata su un iceberg nella Baia di Disko, in Groenlandia. Gran parte della perdita di ghiaccio in Groenlandia avviene mediante il distacco di iceberg come questo, mediante un processo chiamato "iceberg calving". (Foto di Ian Joughin)

***Figura 3** The midnight sun casts a golden light on an iceberg in Disko Bay, Greenland. Much of Greenland's ice loss occurs through the calving of icebergs like this one, a process called iceberg calving. (Photo by Ian Joughin)*

Le previsioni più autorevoli sull'evoluzione futura del sistema climatico sono elaborate dall'**IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc.ch), un organismo scientifico nato nel 1988 per iniziativa delle Nazioni Unite allo scopo di studiare i cambiamenti climatici. L'IPCC pubblica ad intervalli regolari dei *rapporti di valutazione* (Assessment Reports) contenenti un quadro aggiornato del sistema climatico ed una serie di **proiezioni della sua evoluzione a breve, medio e lungo termine**. L'evoluzione del clima dipende da un gran numero di variabili. L'evoluzione delle temperature dipende ad esempio dalla quantità di gas serra che immetteremo nell'atmosfera nei prossimi anni, un dato che ovviamente oggi non conosciamo. Per questo motivo le proiezioni dell'IPCC consistono in una "forchetta" di valori, che vanno da uno scenario ottimistico ad uno pessimistico, passando per una stima centrale.
I dati elaborati dalla collaborazione IMBIE hanno contribuito alla stesura del *sesto rapporto di valutazione* IPCC [IPCC, 2021]. Le analisi di IMBIE hanno permesso di stabilire che a partire dal 1992 la fusione dei ghiacciai continentali ha causato un aumento di circa 2 cm del livello medio globale dei mari, dovuto per due terzi allo scioglimento dei ghiacciai della Groenlandia e per un terzo all'Antartide. Negli anni '90, la fusione dei ghiacciai continentali contribuiva per una piccola frazione (circa il 5%) all'aumento medio globale del livello dei mari, dominato dall'espansione termica degli oceani. Oggi questo contributo è quintuplicato: la fusione dei ghiacciai polari contribuisce a circa un quarto dell'aumento del livello dei mari. Secondo le proiezioni dell'IPCC, se lo scioglimento dei ghiacciai continuerà al ritmo attuale, nel 2100 la fusione delle calotte polari avrà contribuito a un aumento del livello medio dei mari fra i 15 e i 27 cm, mentre l'aumento complessivo del livello dei mari, in uno scenario di emissioni intermedio, sarà compreso fra 60 cm e 1 m.

60 cm di innalzamento del livello dei mari sono tanti o sono pochi?

Parliamo di centimetri e questi valori possono sembrare poca cosa. In realtà parliamo di variazioni che possono avere impatti enormi. Basti pensare che **1 cm di livello marino in più corrisponde a circa 6 milioni di persone in più a rischio di inondazione costiera.** Il continuo monitoraggio dei due grandi ghiacciai continentali della Terra, l'Antartide e la Groenlandia, è di importanza cruciale per lo studio dei cambiamenti climatici e del loro impatto sulle popolazioni costiere. Ma la vera sfida per i prossimi decenni sarà, da un lato, la significativa **riduzione delle emissioni di gas serra**, e dall'altro l'**adattamento ai cambiamenti climatici** già innescati.

Bibliografia

IPCC, (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157896

Otosaka I.N. et al., (2023). *Mass balance of the Greenland and Antarctic ice sheets from 1992 to 2020*. Earth Syst. Sci. Data, 15, 1597–1616. https://doi.org/10.5194/essd-15-1597-2023

Shepherd A. et al., (2018). *Mass balance of the Antarctic Ice Sheet from 1992 to 2017*. Nature, 558, 219–222. https://doi.org/10.1038/s41586-018-0179-y

Shepherd A. et al., (2020). *Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018*. Nature, 579, 233–239. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2

Qual è lo stato di salute dei ghiacciai alpini? Ci aiuta la radar glaciologia

Achille Zirizzotti, Stefano Urbini e Cesidio Bianchi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Grazie alle proprietà elettromagnetiche isolanti del ghiaccio è possibile indagare i ghiacciai con tecniche radar per studiarne lo stato di salute in relazione ai cambiamenti climatici.

I **cambiamenti climatici** non sono più solo un argomento di discussione per climatologi, ma un dato di fatto che ognuno di noi oggi comincia a sperimentare nella propria vita quotidiana. Stagioni straordinariamente anomale ed eventi meteorologici estremi come alluvioni, mareggiate, bombe d'acqua, valanghe, incendi e siccità sono ormai notizie quotidiane nei nostri telegiornali. D'altra parte, i cambiamenti climatici sono responsabili anche della mancanza d'acqua che aggraverà sempre di più la situazione di siccità dei paesi più poveri causando sempre maggiori conflitti sociali.
Uno dei fattori che più incide nel progressivo stravolgimento del clima terrestre è sicuramente l'**immissione in atmosfera di grandi quantità di gas serra** e in particolare di CO_2. La concentrazione di gas serra ha raggiunto livelli mai toccati nella storia recente (ultimi milioni di anni) del nostro pianeta, come dimostrano molti studi recenti.
Tra gli ambienti naturali più colpiti da questi cambiamenti risultano le calotte glaciali ma soprattutto i **ghiacciai alpini** che, negli ultimi decenni, hanno subito arretramenti costanti. La semplice comparazione di testimonianze fotografiche [1] ed eventi drammatici come il crollo del ghiacciaio della Marmolada dell'estate del 2022 sono testimonianze di quello che sta avvenendo [2]. Lo studio e il monitoraggio dei parametri dell'atmosfera, idrosfera e criosfera, che continuamente vengono effettuati anche dal nostro istituto, sono di fondamentale importanza per comprendere il fenomeno.
L'**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia** porta avanti, sin dal 1997, il monitoraggio dei ghiacciai in Italia ed in Antartide attraverso misure di radar glaciologia, in collaborazione con il Programma Nazionale di Ricerca in Antartide (PNRA), l'Istituto di Scienze Polari del CNR e l'Università Ca' Foscari di Venezia.

Cosa è la radar glaciologia?

Grazie alle sue proprietà fisiche, **il ghiaccio è quasi trasparente alle onde radio di frequenza non elevata** (minori del GHz). Le onde radio quindi possono attraversare chilometri di ghiaccio senza subire una grande attenuazione. Questo permette di ottenere una "**radiografia**" del ghiacciaio utilizzando le tecniche radar (vedi anche il post pubblicato sul blog INGVambiente [3] sui radar utilizzati nella geofisica).
Il principio di funzionamento del RADAR, è piuttosto semplice. Si utilizza un trasmettitore e ricevitore di onde elettromagnetiche. Un impulso viene emesso dal trasmettitore e viaggia nello spazio (aria) alla velocità della luce. Quando incontra sul suo cammino un oggetto caratterizzato da proprietà elettromagnetiche diverse viene riflesso e torna, sia pure attenuato, al ricevitore del radar. La misura del tempo intercorso tra l'emissione e la ricezione dell'impulso permette di calcolare la distanza tra il sistema radar e l'oggetto riflettente. Nel caso di un ghiacciaio, l'impulso elettromagnetico può venire riflesso da diverse superfici: dalla superficie di separazione tra aria e ghiaccio, da stratificazioni interne o dalla superficie di separazione tra ghiaccio e fondo roccioso.

Nel contesto di indagine dello stato dei ghiacciai alpini, la misurazione radar avviene da aeromobile o da terra. Ciascuna misura fornisce il valore dello spessore del ghiaccio nel punto di indagine.

Misure sui ghiacciai alpini

Data la loro collocazione geografica e il limitato spessore, **i ghiacciai alpini sono i luoghi dove il riscaldamento globale produce cambiamenti morfologici più evidenti**. Non esiste altro luogo dove, nell'arco temporale di una-due generazioni, l'impatto del riscaldamento globale sulla morfologia del luogo sia stato così evidente. La comparazione di foto dei nostri ghiacciai all'inizio del Novecento con quelle attuali rende perfettamente l'idea di quanto tale cambiamento sia drammaticamente profondo.

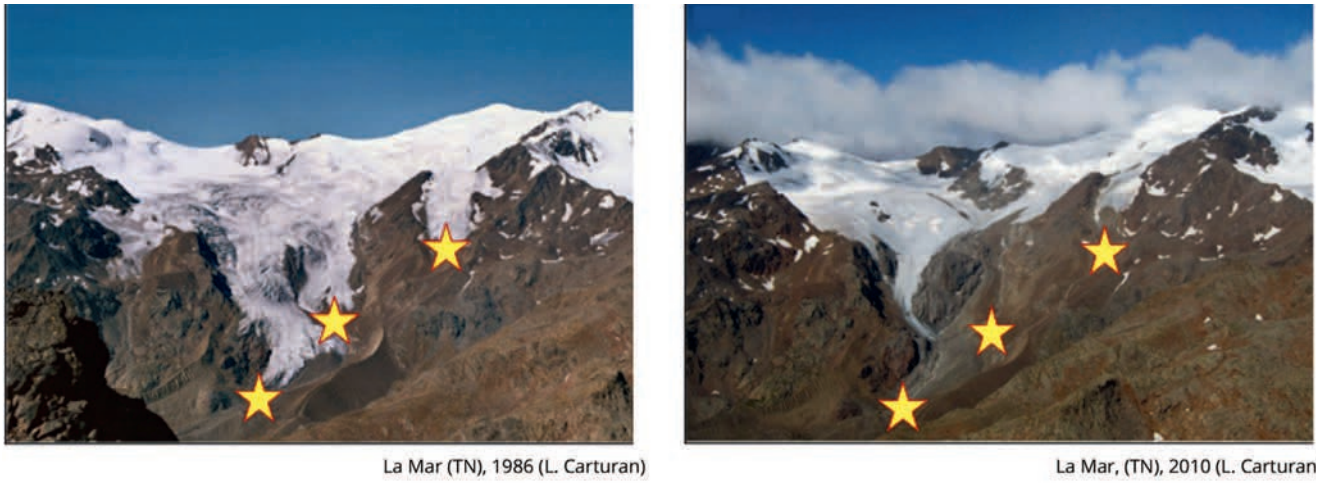


Figura 1 Variazioni dell'estensione del ghiacciaio La Mare (Trento IT) tra il 1986 e il 2010. (Grafica di L. Carturan)
***Figure 1** Variations in the extent of the La Mare glacier (Trento IT) between 1986 and 2010.* (Graphics by L. Carturan)

Recentemente il problema della fragilità delle rocce nelle Alpi ha attirato l'attenzione di media internazionali, tra i quali l'emittente televisiva **CNN**, che hanno a lungo parlato delle Alpi e dei rapidi cambiamenti che stanno subendo. Anche l'ente di monitoraggio **GLAMOS** ha dichiarato recentemente che i ghiacciai alpini hanno registrato **il più alto tasso di fusione** da quando sono iniziate le registrazioni più di un secolo fa. Da recenti studi risulta che le Alpi abbiano perso il 6% del loro volume residuo solo nel 2022, quasi il doppio del 2003, considerato un anno record. La fusione è stata così estrema che **in alcuni siti sono riemerse rocce nude rimaste sepolte per millenni**. Sono stati recuperati corpi, persino un aereo, persi sulle Alpi decenni fa. Alcuni piccoli ghiacciai sono quasi scomparsi.
Gli scenari climatici in atto erano stati previsti nel futuro, certamente non nell'immediato come sembra stia succedendo. Recentemente i glaciologi impegnati in questi studi hanno dichiarato che è necessario rendersi conto del fatto che il futuro è già qui.

L'attività INGV

In questo quadro il gruppo di radio-glaciologia dell'INGV è impegnato con il **Comitato Glaciologico Italiano**, con l'**Istituto di Scienze Polari** del CNR e l'**Università Ca' Foscari** di Venezia nel monitoraggio di alcuni ghiacciai alpini italiani. La collaborazione è inquadrata nell'ambito del

progetto **Ice Memory** [4] che si pone come obiettivo la raccolta di carote di ghiaccio di tutti i ghiacciai alpini mondiali e la loro conservazione in Antartide in modo che possano essere a disposizione nel futuro, quando purtroppo il destino dei ghiacciai di provenienza sarà compiuto.
Nei laboratori di elettronica INGV sono stati progettati e brevettati nel tempo diversi tipi di radar, destinati ad essere utilizzati nell'ambito di studi differenti. Il **radar RES** (Radio Echo Sounding) è quello che ha consentito di indagare i ghiacciai italiani ma anche le **calotte glaciali Antartiche**.
Le campagne svolte fino ad oggi (maggio 2024) per il monitoraggio dei ghiacciai alpini sono state effettuate sul Forni, sullo Sforzellina, sul Careser (vedi Figura 2), sul Miage, sul Gran Combin, sulla Marmolada e sul ghiacciaio appenninico del Calderone [Urbini et al., 2017]. Per ciascuna di esse sono stati prodotti dei modelli sullo spessore del ghiaccio e della morfologia del fondo roccioso. Nella Figura 4 è riportato l'esempio della Marmolada.



Figura 2 Ghiacciai alpini indagati tramite l'impiego di strumentazione INGV. (Grafica di S. Urbini)
***Figure 2** Alpine glaciers investigated by INGV GlacioRadar. (Graphics by S. Urbini)*

Questi ghiacciai si stanno ritirando rapidamente, sia per la forte riduzione dell'accumulo nevoso invernale che per l'elevato grado di fusione della stagione estiva causata dal riscaldamento globale. Studi recenti riportano un valore **medio** di riduzione annuale dei ghiacciai dell'arco alpino pari al 6%. Il che vuol dire che **in meno di venti anni potrebbero scomparire buona parte dei ghiacciai che oggi conosciamo**.
Per fare un esempio più specifico, nell'anno 2019-2020 il ghiacciaio della Sforzellina (Figura 3) ha registrato una riduzione annuale di spessore medio di circa 4.5 m.

Il portale dei dati IRES

Tutte queste informazioni e tutti i dati raccolti nelle campagne di misura eseguiti dal gruppo Italiano di radar glaciologia sono stati raccolti e pubblicati in un portale dedicato IRES (Italian Radio Echo Sounding) [5]. Qui, oltre a illustrare i dettagli delle tecniche e delle campagne di misura in Italia ed in Antartide, è anche possibile scaricare i dati raccolti messi a disposizione della comunità scientifica per ulteriori studi.
IRES è un **archivio GIS** che contiene i dati di radioglaciologia acquisiti con tecniche RES, i percorsi dei voli e le misure da terra effettuati dal 1995 ad oggi sui ghiacciai Antartici e Alpini [6].

Per rendere facilmente accessibili agli utenti i dati acquisiti sono state realizzate due mappe webGIS dell'Italia e dell'Antartide che consentono una veloce consultazione del database.

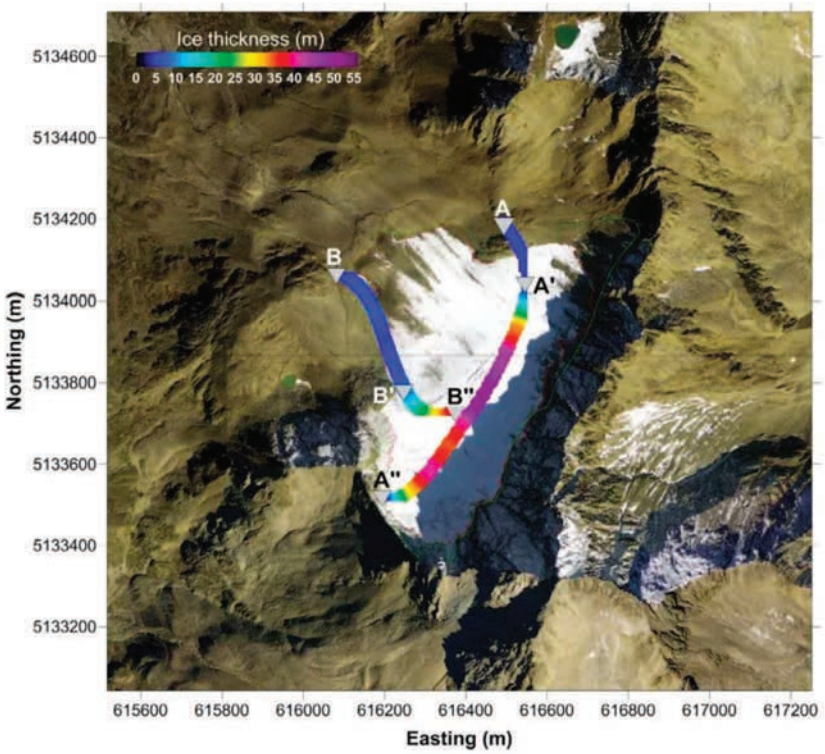


Figura 3 Spessori registrati sul ghiacciaio Sforzellina: i tratti in rosso indicano spessori maggiori dei tratti in blu. (Grafica di S. Urbini)
Figure 3 *Thicknesses detected on the Sforzellina glacier: the red sections indicate greater thicknesses than those on blue sections. (Graphics by S. Urbini)*

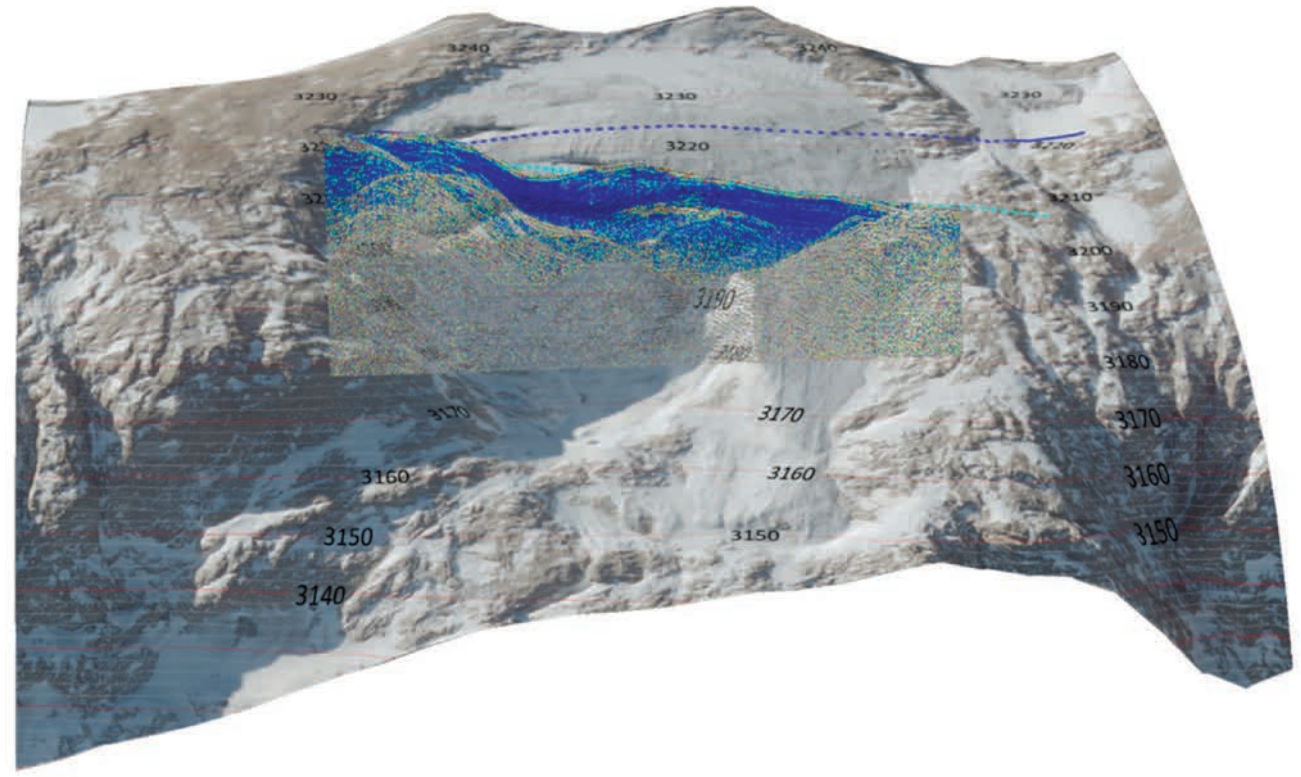


Figura 4 Ricostruzione 3D dello spessore e della morfologia di fondo di uno dei ghiacciai della Marmolada sulla base di un modello digitale del terreno (Digital Terrain Model) ottenuto con metodo fotogrammetrico. (Grafica di S. Urbini)
Figure 4 *3D view of thickness and bedrock morphology of a Marmolada lateral glacier overlaid to a Digital Terrain Model obtained by photogrammetry. (Graphics by S. Urbini)*

Bibliografia

Urbini S., Zirizzotti A., Baskaradas J.A., Tabacco I.E., Cafarella L., Senese A., Smiraglia C., Diolaiuti G., (2017). *Airborne Radio Echo Sounding (RES) measures on Alpine Glaciers to evaluate ice thickness and bedrock geometry: preliminary results from pilot tests performed in the Ortles-Cevedale Group (Italian Alps).* ANNALS OF GEOPHYSICS, 60, 2. http://doi.otg/10.4401/ag-7122

Sitografia

[1] https://sulletraccedeighiacciai.com/spedizioni/alpi-2020/
[2] https://ingvambiente.com/2022/07/13/ghiaccio-bollente/
[3] https://ingvambiente.com/2018/11/20/il-radar-nella-vita-di-tutti-i-giorni/
[4] https://www.isp.cnr.it/index.php/it/ricerca/progetti-di-ricerca/item/478-ice-memory
[5] https://ires.ingv.it
[6] https://ires.ingv.it/index.php/mappe/mappa-voli-in-italia

TERRA

L'asse vagante, ovvero la rotazione mutevole della Terra

Gaia Soldati

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

L'asse di rotazione della Terra, lungi dall'essere un riferimento geometrico fisso, oscilla e vaga lentamente sulla superficie del nostro pianeta. L'origine del suo vagabondare può essere una chiave per comprendere meglio il cambiamento climatico.

Like a rolling stone

Tanto tempo fa, in una galassia lontana lontana… anzi, nella nostra galassia, si formava il sistema solare dal collasso gravitazionale di una nube di gas. Il sistema solare neonato aveva un sacco di momento angolare, una quantità che descrive la tendenza degli oggetti a mantenere il moto di rotazione. Come conseguenza, i pianeti che si andavano formando ruotavano tutti nello stesso verso. Poiché non c'è un granché nello spazio che possa rallentare le cose, una volta che un corpo inizia a ruotare di solito continua a farlo. Ecco perché ci ritroviamo oggi coi piedi su una sfera rocciosa! Essa gira intorno al proprio asse a 1.600 km all'ora e intorno al Sole ad una velocità 100 volte più alta!

L'asse è mobile, qual piuma al vento

In realtà la forma della Terra è solo approssimativamente sferica. Ha uno schiacciamento ai poli ed un rigonfiamento all'equatore, sul quale Sole e Luna esercitano un'attrazione gravitazionale. Questa attrazione tende a raddrizzare l'asse rispetto al piano dell'orbita sul quale è inclinato di 23° e 27'.
La Terra, ruotando intorno al proprio asse, si oppone a questa duplice attrazione. Il risultato è che il suo asse si muove nello spazio come farebbe quello di una trottola. Questo moto è quasi circolare e viene chiamato precessione luni–solare. Poiché l'attrazione di Sole e Luna varia, ad esempio al variare della loro distanza dalla Terra, al semplice moto conico dell'asse terrestre si sovrappongono delle piccole oscillazioni, dette nutazioni.
Precessione e nutazione descrivono il moto del nostro pianeta nello spazio. Tuttavia l'asse istantaneo di rotazione si muove anche rispetto alla superficie terrestre, o rispetto all'asse principale di inerzia (asse di simmetria passante per il baricentro).
Il moto dell'asse di rotazione terrestre, il cosiddetto moto del polo, avviene su scale temporali diverse. Nel breve termine consiste in un moto a spirale: combinazione di una componente ellittica con periodo 1 anno e una componente circolare con periodo di circa 14 mesi, detta oscillazione di Chandler.
Sul lungo termine, nel XX secolo il polo ha avuto una deriva secolare verso sud lungo la longitudine 75° ovest (cioè verso il Canada) di circa 10 cm all'anno.
La posizione istantanea del polo terrestre Nord è il punto in cui l'asse di rotazione della Terra interseca la superficie nell'emisfero settentrionale. È determinata da un organismo chiamato IERS (International Earth Rotation and Reference System Service [1]) tramite tecniche satellitari basate sulla stima della posizione geocentrica dei satelliti. Per ricostruire il moto del polo prima degli anni '70 si utilizzava invece la posizione relativa delle stelle.

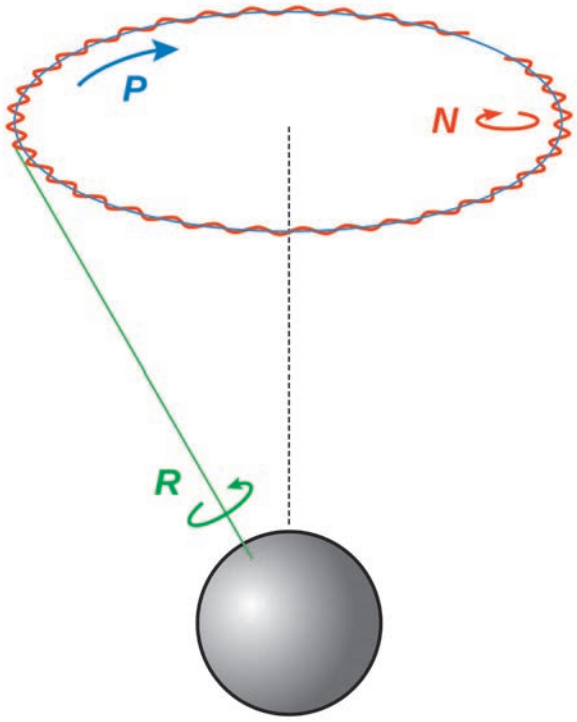


Figura 1 I moti di rotazione, precessione e nutazione. (Crediti: disegno di Dr. H. Sulzer, Wikimedia Commons)
Figure 1 *Rotation, precession and nutation motion. (Credits: designed by Dr. H. Sulzer, Wikimedia Commons)*

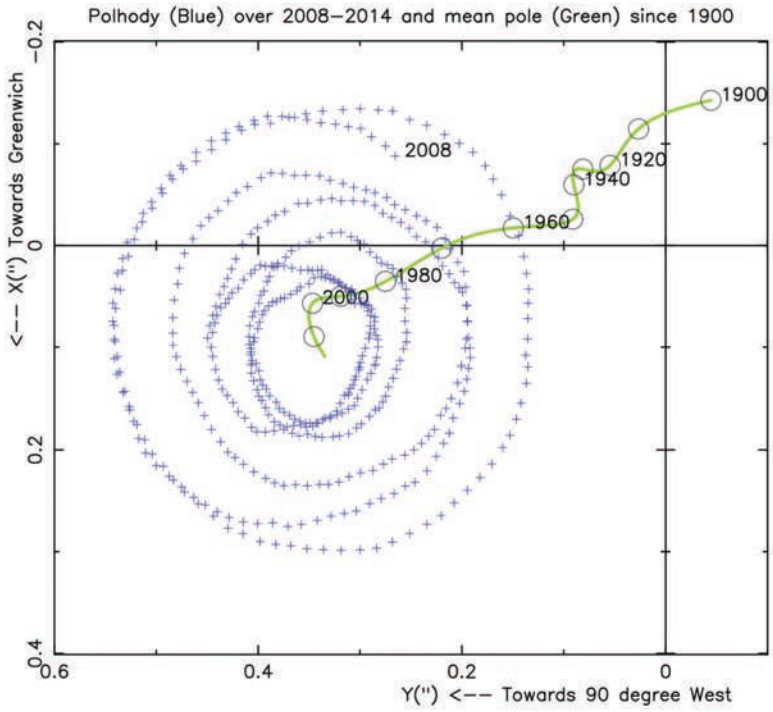


Figura 2 Moto del polo dal 1900. La posizione istantanea del polo dal 2008 al 2014 è mostrata in blu (oscillazione annuale e di Chandler), quella media (il centro della spirale) dal 1900 al 2014 è mostrata in verde. (Da: IERS Annual Report 2013)
Figure 2 *Position of the Earth's instantaneous pole of rotation (blue) over 2008-2014 and mean pole position (green) since 1900. (From: IERS Annual Report 2013)*

Da cosa dipende il moto dell'asse di rotazione terrestre?

Poiché le componenti del moto del polo hanno scale temporali diverse, possiamo supporre che diversi siano i fenomeni ad originarle.
Nel caso dell'**oscillazione di Chandler,** è stato dimostrato che è causata da una combinazione di fluttuazioni di pressione sul fondo oceanico e di variazioni di pressione atmosferica [Gross, 2000]. I due fenomeni sarebbero responsabili rispettivamente di 2/3 e 1/3 dell'effetto, ma la loro importanza relativa può variare nel tempo.

Per quanto riguarda la deriva del polo di più di 10 metri osservata nell'ultimo secolo, gli scienziati della NASA hanno identificato tre processi su larga scala, ognuno responsabile di circa 1/3 del fenomeno [Adhikari et al., 2018].
Fusione dei ghiacci, in particolare quelli della Groenlandia che, per motivi geometrici, hanno un impatto maggiore. L'aumento di temperatura globale di circa 1°C rispetto ai livelli preindustriali ha trasferito una massa enorme dalla superficie della Terra agli oceani.
Sollevamento post-glaciale, ritenuto il maggiore responsabile del moto del polo sul lungo termine. È in grado di spiegare solo il 30% di questo moto nell'ultimo secolo.
Convezione nel mantello, cioè la circolazione di materiale indotta dal calore del nucleo terrestre, simile a quella di un pentolone di zuppa che ribolle se messo a scaldare sul fornello.
Diventa quindi possibile distinguere le cause su cui abbiamo poco o nessun controllo da quelle di origine antropica, relative al cambiamento del clima.

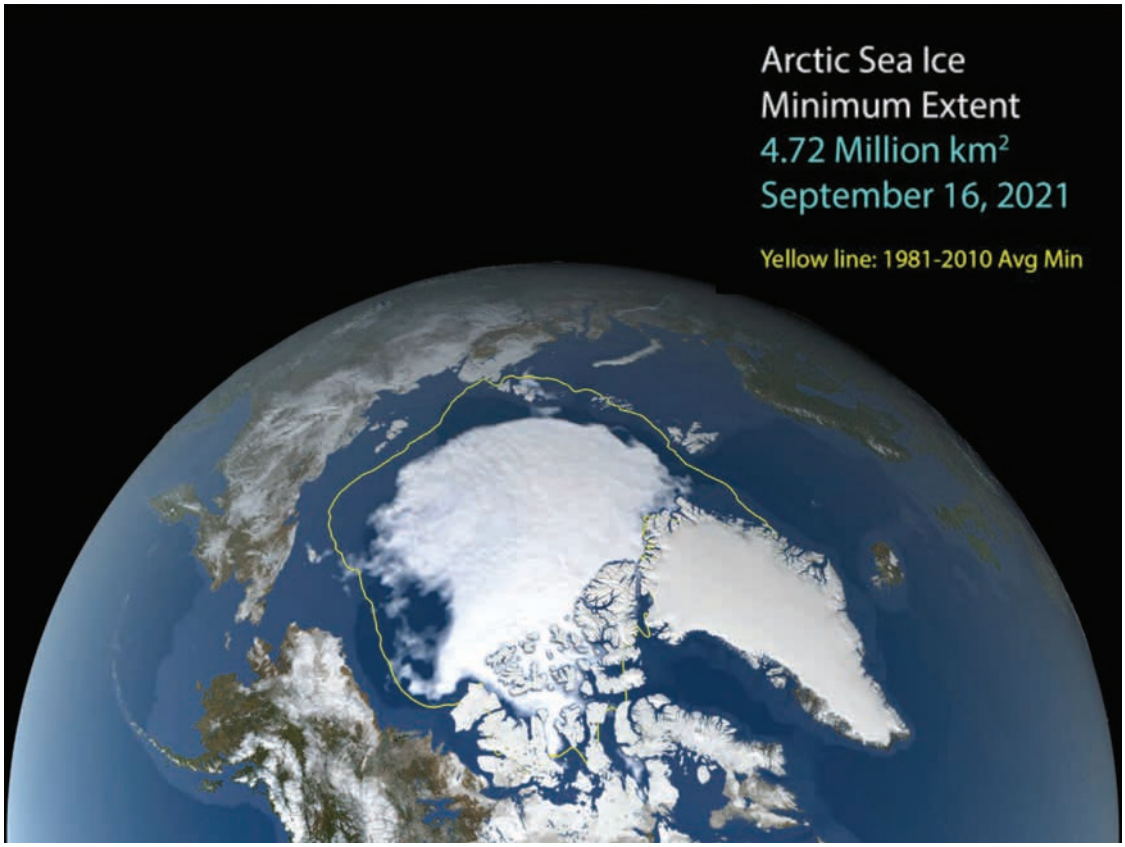


Figura 3 Estensione dei ghiacci artici relativa a settembre 2021, confrontata con la mediana relativa al periodo 1981-2010 (linea gialla). (Crediti: NASA Scientific Visualization Studio)
Figure 3 *Arctic sea ice minimum extent on September 2021, compared to its median value of the period 1981-2010 (yellow line). (Credits: NASA Scientific Visualization Studio)*

Moto dell'asse di rotazione terrestre e cambiamento climatico

Lo stretto legame fra moto del polo e cambiamento climatico nel recente passato è testimoniato da un altro caso significativo.
Nel secolo scorso la deriva del polo era in direzione del Canada. A partire dal 2000 ha deviato bruscamente, puntando verso la Gran Bretagna. Questo repentino cambio di direzione è dovuto all'altrettanto rapida diminuzione del contenuto di acqua nei continenti, col conseguente trasporto di massa su scala globale verso gli oceani. Dalla seconda metà del 1900, infatti, la

quota di ghiacciai persa ogni anno è cresciuta a una velocità sempre maggiore, con un aumento del 57% dagli anni '90 al 2017. Questa accelerazione è dovuta al surriscaldamento di atmosfera e oceani. La fusione dei ghiacci artici e antartici spiega solo 2/3 della perdita di acqua totale. Il resto è dovuto alla diminuzione della quantità di acqua immagazzinata nei continenti (in particolare l'Eurasia), soggetti a impoverimento degli acquiferi e siccità. La fisica degli oggetti rotanti ci dice che le latitudini che più influenzano il moto dei poli sono quelle vicine ai +/- 45°. Tali regioni corrispondono proprio alle aree dove è più evidente la perdita di acqua.

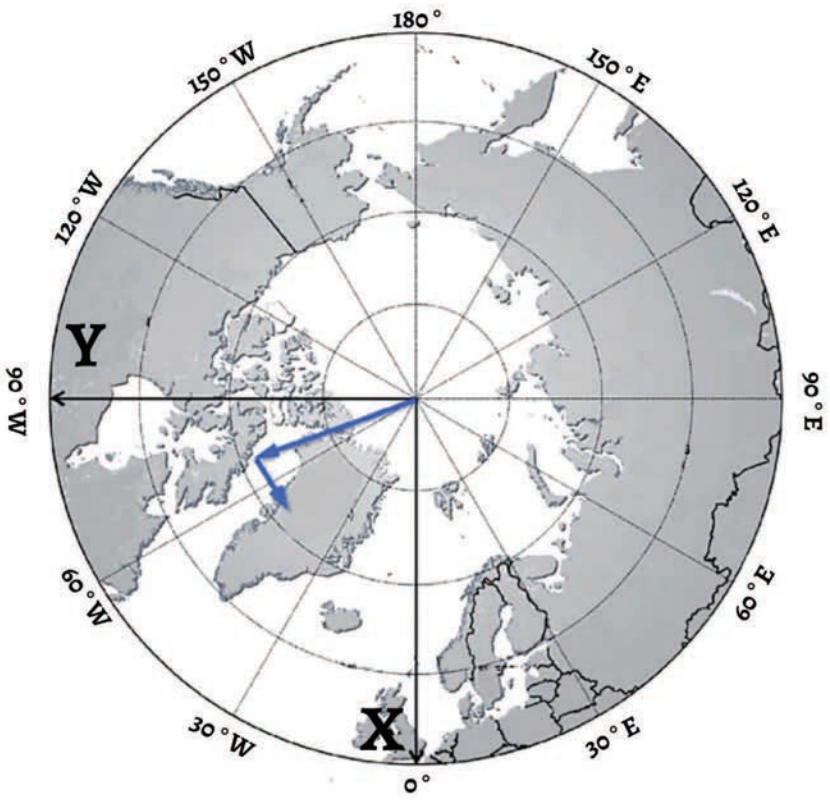


Figura 4 Direzione media di deriva del polo sulla superficie terrestre. La freccia lunga si riferisce al XX secolo, quella corta al periodo 2006-2011 [Chen et al., 2013].
Figure 4 *Mean pole drift directions on the Earth surface. The long blue arrow represents the last century long-term drift, and the short arrow represents the direction for the period 2006–2011 [Chen et al., 2013].*

E i terremoti come contribuiscono?

Tutte le instabilità rotazionali della Terra sono causate da variazioni del momento d'inerzia. Tale grandezza misura la resistenza di un corpo, in questo caso la Terra, a ruotare rispetto ad un asse di riferimento. Il momento d'inerzia dipende dalla distanza delle masse dall'asse di rotazione: più le masse sono lontane dal centro, maggiore è il momento di inerzia. Imponenti spostamenti di massa, sia sulla superficie della Terra che al suo interno, possono modificare il momento d'inerzia. Tra le varie cause possibili ci sono i terremoti. Diversi studi hanno rivelato che due sono gli effetti fisici riconducibili ad essi (https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html).
Primo: poiché alcuni terremoti spostano grandi masse di roccia dalla superficie verso il centro della Terra, tendono a renderla più compatta diminuendo così il momento d'inerzia. Per la legge di conservazione del momento angolare – una forma di conservazione dell'energia – la rotazione terrestre accelera e parallelamente la durata del giorno diminuisce.
Secondo: globalmente i terremoti inducono un moto del polo in direzione 140° E, opposta a quella osservata. Ciò risulta dal fatto che i terremoti più forti sono solitamente terremoti di subduzione, conseguenza dell'immersione di una placca tettonica oceanica sotto una continentale. Nell'ultimo secolo questi terremoti si sono concentrati prevalentemente nelle zone di subduzione del Pacifico occidentale.

Per quanto riguarda l'entità di questi effetti, un singolo forte terremoto è in grado di deviare istantaneamente il moto del polo di qualche decina di cm al massimo. Inoltre, è in grado di accorciare la durata del giorno di pochi microsecondi, con conseguenze per noi impercettibili. Anche a livello globale, la sismicità del periodo 1977-1997 ha avuto un effetto trascurabile (1/100 del valore osservato) sia sull'oscillazione di Chandler che sulla deriva secolare del polo. Includere il contributo dei terremoti profondi e del rilassamento viscoelastico del mantello terrestre non cambia molto il risultato. Inoltre, l'effetto della sismicità è bilanciato da quello dell'attività tettonica globale (sprofondamenti ed emersioni di massa in corrispondenza di slab e dorsali), di stessa entità e direzione opposta, con un effetto totale praticamente nullo.

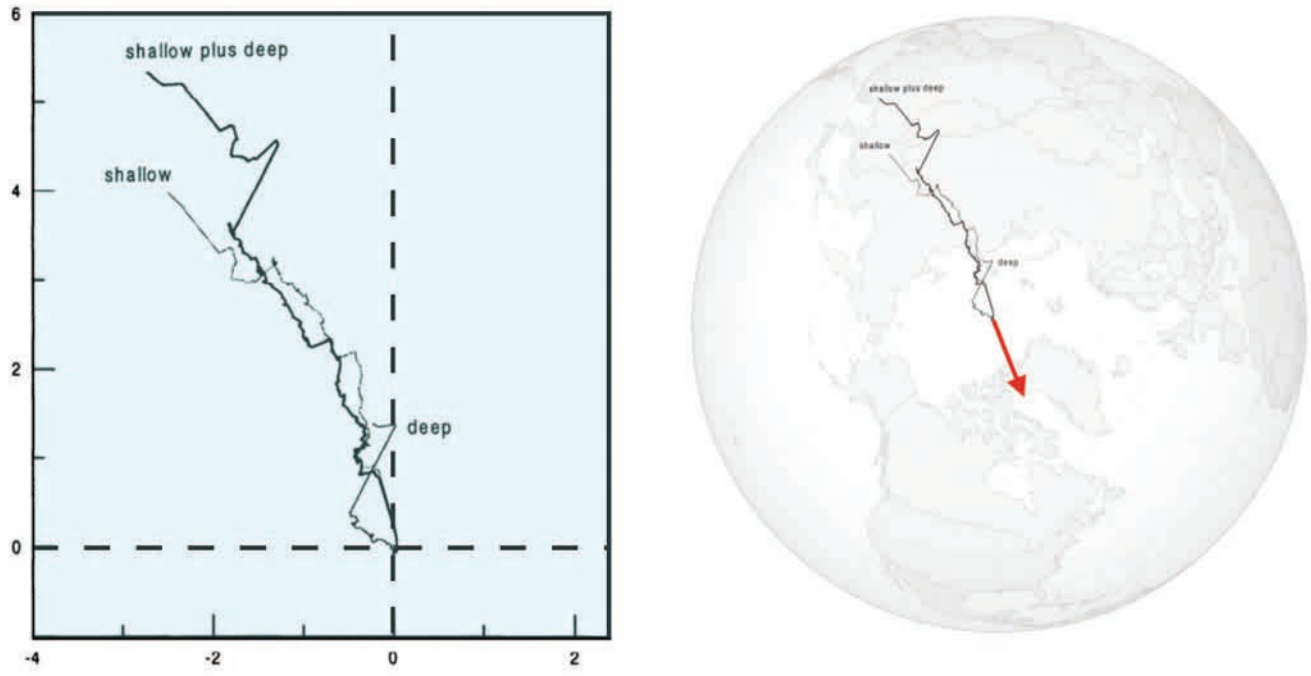


Figura 5 Moto del polo cumulativo (in millisecondi di arco, o mas) calcolato come risposta a 20 anni (1977-1997) della sismicità globale, considerando separatamente terremoti superficiali e profondi (>100 km). La figura a destra, non in scala, mostra la proiezione di questo moto sul globo terrestre e, in rosso, la direzione del polo osservata. (Figura modificata da Soldati et al. [2001] e Wikipedia)
Figure 5 *Cumulative polar drift (mas) resulting from the global seismicity during the time interval 1977-1997, considering shallow, deep (>100 km), and deep plus shallow global seismicity. On the right, projection of this motion on the Earth surface, along with the observed polar motion direction (red arrow).*
(Modify from Soldati et al. [2001] and Wikipedia)

Gli tsunami possono contribuire?

Poiché i terremoti più forti si registrano in corrispondenza delle zone di subduzione, spesso essi generano degli tsunami. Può la propagazione di un'onda di tsunami – con la ridistribuzione di una grande massa d'acqua che comporta – influenzare il moto del polo? Nel caso del terremoto di Sumatra del 2004 (di magnitudo 9.3), la variazione temporale del moto del polo, calcolata sulla base dello tsunami generato, è qualitativamente in accordo con quella osservata (ha la forma di un gradino), ma anche in questo caso 100 volte più piccola.

Ricapitolando

Le irregolarità mostrate dalla Terra nel suo moto di rotazione possono essere spiegate come effetto di molteplici cause, dall'attrazione gravitazionale esercitata dai corpi celesti agli spostamenti di massa interni al pianeta e sulla sua superficie. Ne segue che una interpretazione comprensiva deve tenere conto di una moltitudine di aspetti che vanno dalle caratteristiche e dalle dimensioni dei diversi gusci che compongono il nostro pianeta ai fenomeni che modificano anche solo uno di essi. Da qui l'importanza di considerare la Terra come un insieme delicato e complesso, in cui la salvaguardia delle varie "geosfere", dalla Terra solida, all'idrosfera, alla criosfera e all'atmosfera, è di vitale importanza per garantire l'equilibrio degli ecosistemi dell'intero pianeta.

Bibliografia

Adhikari S., Caron L., Steinberger B., Reager J.T., Kjeldsen K.K., Marzeion B., Larour E., Ivins E.R., (2018). *What drives 20th century polar motion?* Earth Planet. Sci. Lett., 502, 126-132. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.08.059

Chen J.L., Wilson C.R., Ries J.C., Tapley B.D., (2013). *Rapid ice melting drives Earth's pole to the east*. Geophysical Research Letters, 40(11), 2625–2630. https://doi.org/10.1002/grl.50552

Gross R., (2000). *The excitation of the Chandler wobble*. Geophys. Res. Lett., 27, 2329–2332. https://doi.org/10.1029/2000GL011450

Soldati G., Boschi L., Piersanti A., Spada G., (2001). *The effect of global seismicity on the polar motion of a viscoelastic Earth*. Journal of Geophysical Research, 106(B4), 6761–6767. https://doi.org/10.1029/2000JB900354

I poli della Terra

Laura Alfonsi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Parlando di Terra e dei suoi poli, molti penseranno alla rete geografica e ai corrispondenti poli geografici, speculari nell'emisfero Nord e Sud. Non tutti sanno però che la Terra, oltre al polo geografico, di poli ne ha diversi. Alcuni alquanto bizzarri!

Forse non molti sanno che esistono diversi **Poli** nel nostro Pianeta. Alcuni di questi sono punti reali sulla superficie terrestre, altri sono frutto di calcoli e modelli matematici. Nel seguito parleremo dei *Poli Sud* del Pianeta ma, in modo quasi speculare, esistono i corrispondenti nell'emisfero Nord.
Nell'emisfero Sud, e in particolare nel continente antartico e nelle sue acque circostanti, ricade il **Polo Sud**, noto come **Polo sud geografico.** Oltre a questo, noto a tutti, esistono: il **Polo Sud geomagnetico**, il **Polo Sud dell'inaccessibilità,** il **Polo Sud celeste** ed il **Polo sud Magnetico.** Questi ultimi localizzati rispettivamente, nella sfera celeste e nei mari circum-antartici. E non possiamo non citare il **Polo Sud Cerimoniale**, sempre in Antartide!

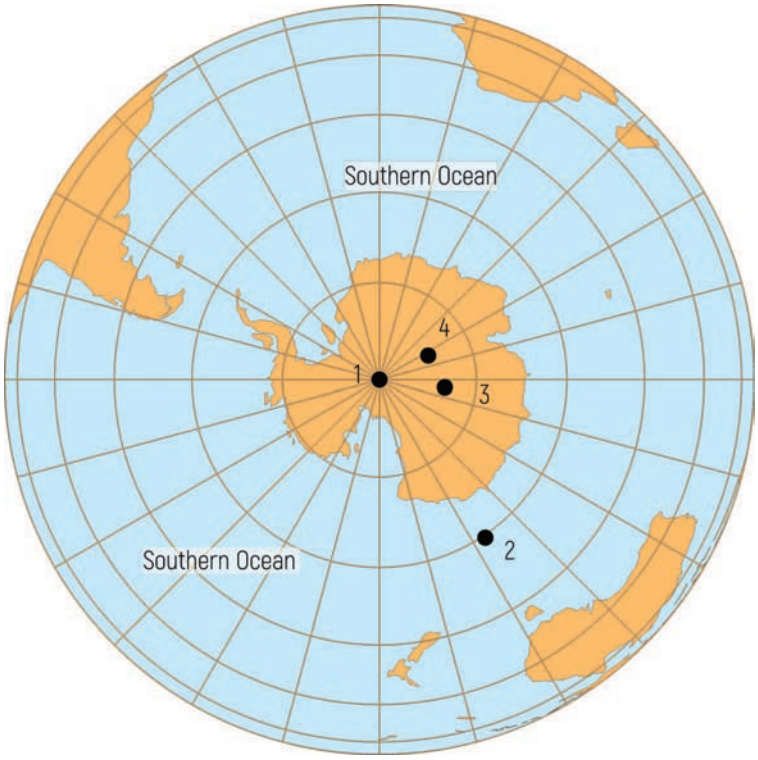


Figura 1 Posizione indicativa dei principali poli terrestri: 1) Polo geografico, e Polo Cerimoniale; 2) Polo Magnetico (2007); 3) Polo geomagnetico (2005); 4) Polo dell'inaccessibilità. (Ridisegnata da L. Alfonsi, licenza da Adobe Stock)
Figure 1 *Indicative position of the main terrestrial poles: 1) Geographical pole and Ceremonial pole; 2) Magnetic Pole (2007); 3) Geomagnetic Pole (2005); 4) Pole of inaccessibility. (Redrawn by L. Alfonsi, licensed from Adobe stock)*

Polo Sud Geografico

Il Polo Sud geografico rappresenta uno dei due punti in cui l'asse di rotazione terrestre incontra la superficie terrestre, e ne rappresenta il punto più a sud di questa. È situato al centro dell'emisfero sud (vedi figura della posizione indicativa dei principali poli terrestri). Il Polo Sud geografico, che ha latitudine 90° sud, è il punto in cui idealmente convergono tutti i meridiani terrestri.



Figura 2 Polo sud Geografico. La bandiera americana sventola accanto alla palina metallica che sorregge il segnalatore della posizione del polo. Nel pannello esplicativo vengono celebrate le imprese di Roald Amundsen e Robert Falcon Scott, i primi esploratori che raggiunsero, a poche settimane uno dall'altro, il polo sud Geografico (rispettivamente dicembre 1911 e gennaio 1912). Sullo sfondo l'edificio principale della base permanente americana dedicata a questi esploratori, la "Amundsen-Scott". (Foto di L. Alfonsi)

Figure 2 *Geographic South Pole. The American flag flies next to the metal pole that holds the pole's position marker. The explanatory panel celebrates the exploits of Roald Amundsen and Robert Falcon Scott, the first explorers who reached the South Geographic Pole within a few weeks of each other (December 1911 and January 1912 respectively). In the background the main building of the permanent American base dedicated to these explorers, the "Amundsen-Scott". (Photo by L. Alfonsi)*

La posizione dell'asse di rotazione terrestre varia nel corso del tempo. La determinazione dell'esatta posizione del polo geografico non può essere accurata e il punto a cui generalmente si fa riferimento è la migliore approssimazione possibile. Per questo e per via dei movimenti dei ghiacci del plateau antartico, **è necessario ogni anno ricalcolarne la posizione**. La massa dei ghiacci polari si muove infatti ad una velocità di circa 10 metri l'anno, traslando l'indicatore che segnala la posizione del POLO Sud geografico.

Ogni primo gennaio, nel corso di una cerimonia, viene posizionato il nuovo contrassegno nel punto esatto del Polo Sud terrestre. Questo, costituito da una piccola placca commemorativa, viene realizzato durante il lungo inverno antartico dal personale presente nella base americana di Amundsen-Scott. Dal 1959 i residenti del Polo Sud, ovvero ricercatori e tecnici della base americana, dopo aver posizionato il nuovo e temporaneo contrassegno sul punto preciso del polo sud, ritirano quello vecchio per esporlo nelle vetrine all'interno della base.



Figura 3 Vari contrassegni realizzati nel corso degli anni per indicare la posizione del Polo Sud geografico, esposti nella base Amundsen-Scott al polo Sud.
(Crediti: NASA.gov)
Figure 3 *Various markers made over the years to indicate the location of the geographic South Pole, displayed at the Amundsen-Scott base at the South Pole. (Credits: NASA.gov)*

Il polo Sud geografico fu raggiunto per la prima volta dall'esploratore **Roald Amundsen** con i suoi compagni il 14 dicembre 1911. Nel gennaio del 1912 il polo fu raggiunto anche dalla spedizione guidata da **Robert Falcon Scott**. All'epoca il Polo sud era un luogo inabitato, una distesa deserta di ghiaccio. Oggi South Pole è ancora una distesa di ghiaccio, ma ospita una base di ricerca permanente, con un via vai quasi continuo di persone durante l'estate antartica e 50 persone circa che la abitano durante il buio inverno antartico.

Polo Sud Cerimoniale

Non molto distante dalla reale posizione del Polo Sud geografico, presso la base Amundsen-Scott, è posizionato il Polo Sud cerimoniale. Una sfera di cristallo, circondata dalle bandiere delle 12 nazioni prime firmatarie del trattato antartico (1 dicembre 1959), ne indica la posizione.
Il Polo cerimoniale è utilizzato per foto e filmati da quanti hanno la fortuna di raggiungere il Polo Sud. A differenza del Polo Sud geografico, il Polo cerimoniale è nello stesso luogo in cui fu posizionato nel 1959. Viene comunque coinvolto nelle cerimonie che si svolgono ogni primo dell'anno, durante le quali un gruppo di audaci percorre la distanza che lo separa dalla base. Individui semi nudi, scarpe e calzoncini ammessi, animano la cerimonia. Considerando che a gennaio, in questi luoghi le temperature medie sono di circa -35°C, si comprende l'audacia e la portata del gesto goliardico. Tuttavia, solo sottomettendosi a questo rituale gli audaci potranno ambire a far parte dell'esclusivo club dei 300. Un club indubbiamente molto selettivo, a cui non molti riescono a far parte, per ovvi motivi di sopravvivenza.



Figura 4 Il polo Sud cerimoniale. (Crediti: NSF/Josh Landis)
Figure 4 *Ceremonial South Pole. (Credits: NSF/Josh Landis)*

Polo Sud Celeste

Polo Sud celeste è il punto di proiezione geografico del polo sud sulla sfera celeste. Se osservassimo il cielo dalla superficie terrestre, lo vedremmo ruotare da est verso ovest con un moto apparente conseguenza della rotazione terrestre intorno al proprio asse. Il polo sud celeste è quindi un punto fisso della sfera celeste, intorno a cui gli astri sembrano ruotare. Inutile cercare la stella che lo indichi: nessuna stella brillante gli è vicina.

Polo Sud Magnetico

Il Polo Sud Magnetico è quel punto della superficie terrestre dove le linee del campo magnetico sono perpendicolari al terreno.

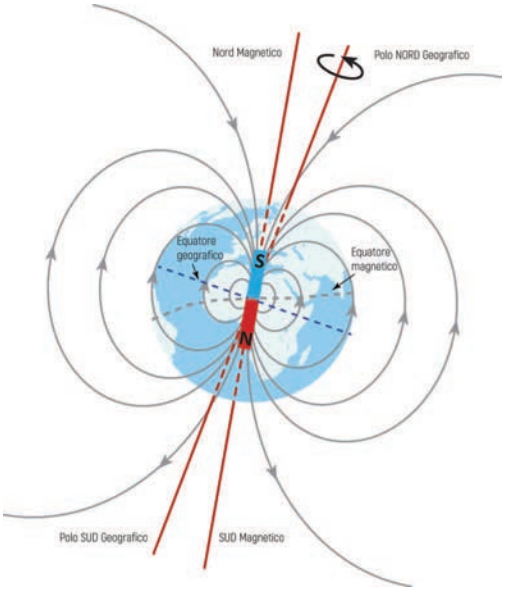


Figura 5 Rappresentazione schematica dei Poli Magnetici e Poli Geografici, nella figura sono indicati anche i rispetti equatori. (Ridisegnato da L. Alfonsi, licenza da Adobe Stock)
Figure 5 *Schematic representation of the Magnetic Poles and Geographical Poles, the respective equators are also indicated in the figure. (Redrawn by L. Alfonsi, licensed from Adobe stock)*

Se camminassimo al di sopra questo punto con una bussola tridimensionale, vedremmo il suo ago posizionarsi in modo perfettamente verticale. In questo punto il campo magnetico ha la sua componente verticale massima, mentre quella orizzontale è nulla. Il Polo Sud Magnetico, come quello Nord del resto, subisce considerevoli spostamenti [1] in base alle mutazioni del campo magnetico terrestre. In questo caso i Poli Sud e Nord magnetico non sono diametralmente opposti.



Figura 6 Nell'ambito della spedizione di Nimrod (1908-1909) comandata da Ernest Henry Shackleton, il gruppo Northern Party (costituito da D. Mackay, E. David e A. Mawson da sinistra a destra nella foto) rivendicò il raggiungimento del Polo Sud Magnetico (latitudine 72°15'S e longitudine 155°16'E) nella Terra della Regina Vittoria, il 17 gennaio 1909. (Immagine da Di Tannatt David (1858, †1934) - Shackleton, Ernest Henry, et al. [1909]. The Heart of the Antarctic. J.B. Lippincott company, pubblico dominio [2])

Figure 6 *As part of the Nimrod expedition (1908-1909) commanded by Ernest Henry Shackleton, the Northern Party group (consisting of D. Mackay, E. David and A. Mawson from left to right in the photo) claimed the achievement of the South Magnetic Pole (latitude 72°15'S and longitude 155°16'E) in Queen Victoria Land, 17 January 1909. (Picture from Di Tannatt David (1858, †1934) - Shackleton, Ernest Henry, et al. [1909]. The Heart of the Antarctic. J.B. Lippincott company, public domain [2])*

Polo Sud Geomagnetico

Il Polo Sud geomagnetico è il polo che viene derivato analiticamente dai modelli di campo magnetico globale. La configurazione fisica che meglio approssima questo campo è costituita da una barra magnetica, approssimabile ad un dipolo magnetico, idealmente posta al centro della Terra. I poli geomagnetici rappresentano l'intersezione tra gli estremi di questa barra e la superficie terrestre. In questo caso il polo Sud geomagnetico ed il Polo nord geomagnetico sono diametralmente opposti.

Polo Sud dell'Inacessibilità

I Poli dell'inaccessibilità sono tutti quei punti della superficie terrestre dotati di caratteristiche notevoli dal punto di vista statistico. In genere soddisfano le seguenti domande: quale è il punto dell'oceano più lontano da qualsiasi terra emersa? Oppure, ed è questo il nostro caso: quale è il punto delle terre emerse più lontano da qualsiasi costa? Questo luogo è appunto il Polo dell'inaccessibilità. Il Polo Sud dell'inaccessibilità (85°50'S, 65°47'E) è il punto del continente Antartico più distante da qualsiasi linea costiera. Una spedizione sovietica lo raggiunse per la prima volta nel 1958 e vi realizzò una stazione di ricerca temporanea denominata *Poljus Nedostupnosti* (in russo: Polo dell'inaccessibilità). In quell'occasione vi fu eretto un busto in onore di Vladimir Lenin. Oggi la stazione è abbandonata e fa parte dei luoghi di interesse storico dell'Antartide. Il busto di Vladimir Lenin ed i resti in rovina della base sono ancora sul luogo a segnalare la posizione del Polo dell'inaccessibilità.

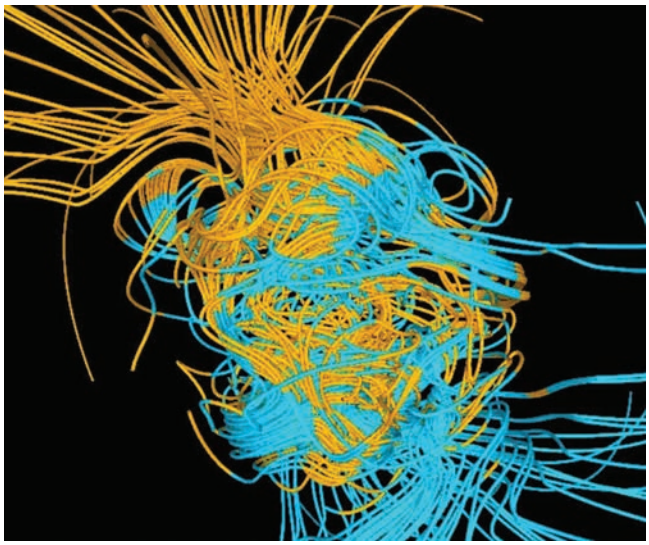


Figura 7 Simulazione della struttura del campo magnetico 3D realizzata con il modello geodinamo di Glatzmaier-Roberts. Le linee del campo magnetico sono blu dove il campo è diretto verso l'interno e gialle dove è diretto verso l'esterno, questa immagine rappresenta l'aspetto che dovrebbe avere il campo magnetico nel corso del processo di inversione.
(Immagine da Gary A. Glatzmaier [3])

Figure 7 *A snapshot of the 3D magnetic field structure simulated with the Glatzmaier-Roberts geodynamo model. The magnetic field lines are blue where the field is directed inwards and yellow where it is directed outwards, this image represents what the magnetic field should look like during the inversion process. (Image from Gary A. Glatzmaier [3])*



Figura 8 Il busto di Lenin eretto nel 1958 presso il Polo Sud dell'inaccessibilità dall'allora spedizione sovietica. Il Polo è ancora lungo le tratte di passaggio delle traverse antartiche, i moderni transumanti dei ghiacci.
(Immagine da By Cookson69, [4])

Figure 8 *The bust of Lenin erected in 1958 at the South Pole of inaccessibility by the then Soviet expedition. The statue still lies along the path of the e Antarctic crossing, the modern ice transhumants. (Image By Cookson69, [4])*

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2019/11/19/quando-i-poli-vanno-a-spasso/
[2] https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4164298
[3] https://websites.pmc.ucsc.edu/~glatz/index.html
[4] https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3192264

Le inversioni del campo magnetico terrestre: cosa sappiamo?

Lili Cafarella, Chiara Caricchi, Domenico Di Mauro e Leonardo Sagnotti

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Einstein considerava la comprensione del meccanismo che genera e governa la dinamica del campo magnetico terrestre come una delle più importanti ed irrisolte sfide della fisica. Il meccanismo che causa le inversioni del campo resta ancora oggi in gran parte ignoto.

Il campo magnetico terrestre spesso è protagonista di animate discussioni su post e articoli pubblicate sui giornali e sul web, soprattutto a causa della sua peculiarità più affascinante: **le inversioni di polarità.** Facciamo un po' di chiarezza sull'argomento.

Le caratteristiche del campo magnetico terrestre

Il campo magnetico terrestre è generato da complessi moti convettivi e turbolenti del materiale metallico fuso, fortemente conduttore di elettricità, che forma il nucleo esterno della Terra.
Il campo magnetico risultante, in prima approssimazione, ha la struttura del campo generato da un magnete a barra posto nel centro della Terra e inclinato, attualmente, di circa 9° rispetto all'asse di rotazione terrestre (campo dipolare).
La teoria generale indica che esistono **due stati possibili di polarità**, **quella normale** (l'attuale, in cui le linee di forza del campo entrano verso l'interno della Terra nell'emisfero settentrionale ed escono verso l'esterno della Terra nell'emisfero meridionale) e **il suo inverso**.

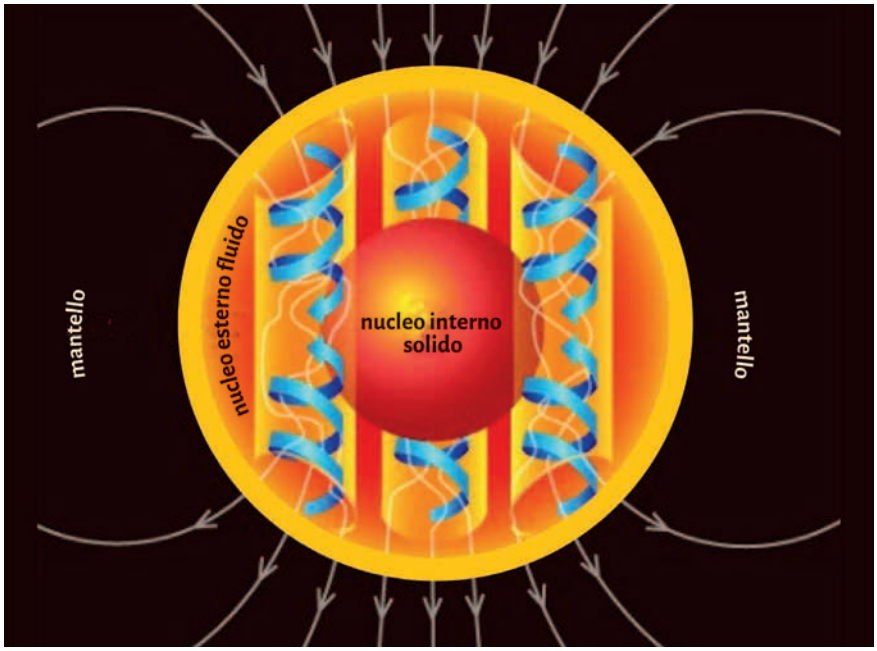


Figura 1 Il nucleo della Terra è costituito da una parte esterna, fluida, e una interna, solida. La rotazione terrestre influisce sul movimento della parte fluida, determinando correnti elettriche che sono all'origine del campo magnetico terrestre. (Adattato da [1])
Figure 1 *The Earth's core consists of an outer, fluid part and an inner, solid part. The Earth's rotation affects the movement of the fluid part, generating electric currents that are the source of the Earth's magnetic field. (Adapted from [1])*

Entrambi gli stati di polarità del campo sono ugualmente probabili e stabili.

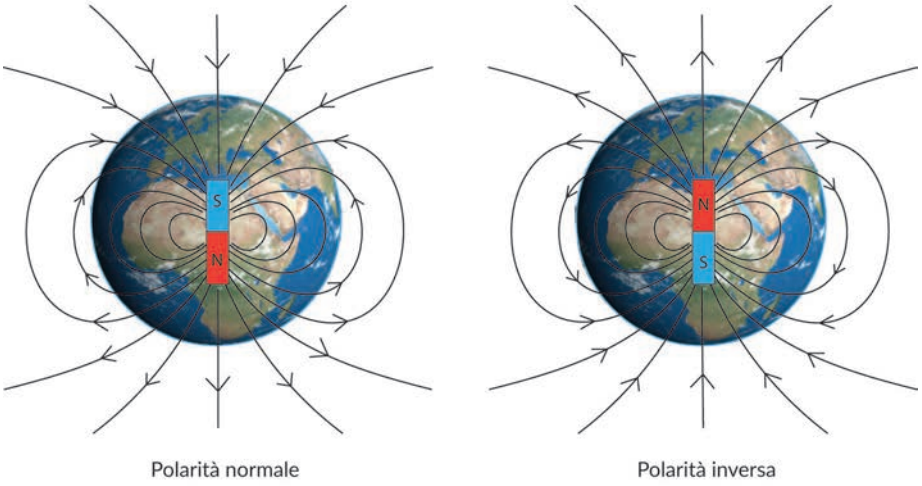


Figura 2 Schematizzazione del campo magnetico terrestre nelle due possibili configurazioni di polarità: polarità normale, a sinistra, e inversa, a destra. Per semplicità l'origine del campo viene raffigurato da una barra magnetica. (Grafica di B. Angioni)

Figure 2 *Schematic representation of the Earth's magnetic field in the two possible polarity configurations: normal polarity on the left and reverse polarity on the right. For simplicity, the origin of the field is depicted by a magnetic bar. (Graphics by B.Angioni)*

Le registrazioni paleomagnetiche mostrano, in effetti, come nel tempo geologico **i due stati di polarità del campo si siano alternati senza prevalenza di uno rispetto all'altro.** La variabilità naturale del campo comprende anche grandi variazioni di intensità. Quando l'intensità del campo è molto debole, fino a valori dell'ordine del 10-20% del valore attuale, si possono innescare le inversioni di campo magnetico terrestre. In caso di innesco di inversione, la morfologia del campo cambia drasticamente, fino a perdere le sue caratteristiche di dipolarità, con ulteriori importanti variazioni nei valori dell'intensità. Ad inversione avvenuta i valori dell'intensità del campo riprendono rapidamente a crescere e recuperano i valori precedenti all'inversione. Il fenomeno è nell'insieme molto complesso e caotico.

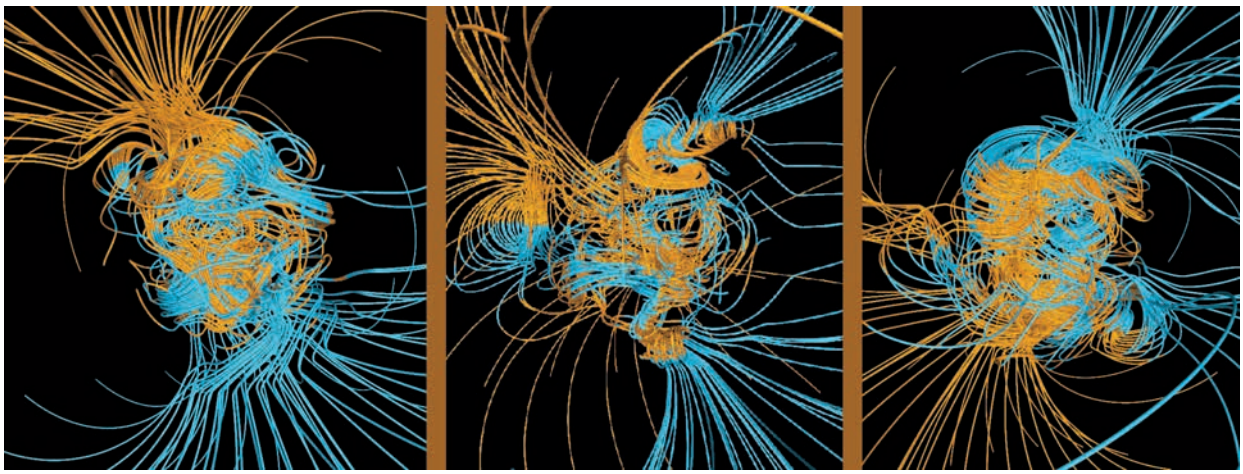


Figura 3 Simulazione delle linee di forza del campo nel nucleo terrestre durante un'inversione di polarità [2]. (Crediti: G.A. Glatzmaier)

Figure 3 *Simulation of the field lines in the Earth's core during a polarity reversal [2]. (Credit:s G.A. Glatzmaier)*

L'inversione del campo magnetico terrestre non è né un fenomeno periodico né regolare.

C'è stato un lunghissimo intervallo di tempo (nel Cretacico superiore [3], tra gli 83 e i 118 milioni di anni fa) in cui il campo non si è affatto invertito e ha mantenuto la stessa polarità per circa 35 milioni di anni. In altri periodi invece la polarità si è invertita frequentemente, come mostrato nella figura sottostante.

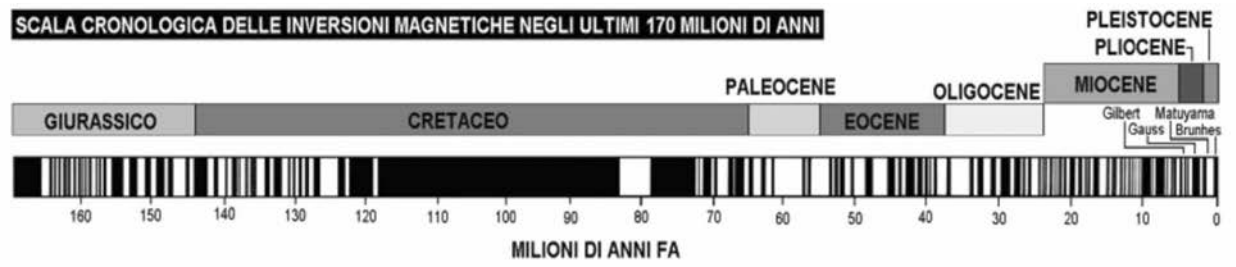


Figura 4 Nell'immagine le bande nere si riferiscono a intervalli temporali a polarità normale, mentre quelle bianche a quelli a polarità inversa.
Figure 4 *In the image, the black bands refer to intervals of normal polarity, while the white bands refer to intervals of reverse polarity.*

Sono documentate centinaia di inversioni del campo magnetico negli ultimi 83 milioni di anni e 21 sono riconosciute per gli ultimi 5.3 milioni di anni. Questo implica che in media, durante questo ultimo periodo, ci sia stata un'inversione del campo ogni circa 250 mila anni. **L'ultima inversione completa è datata a circa 780 mila anni fa**.

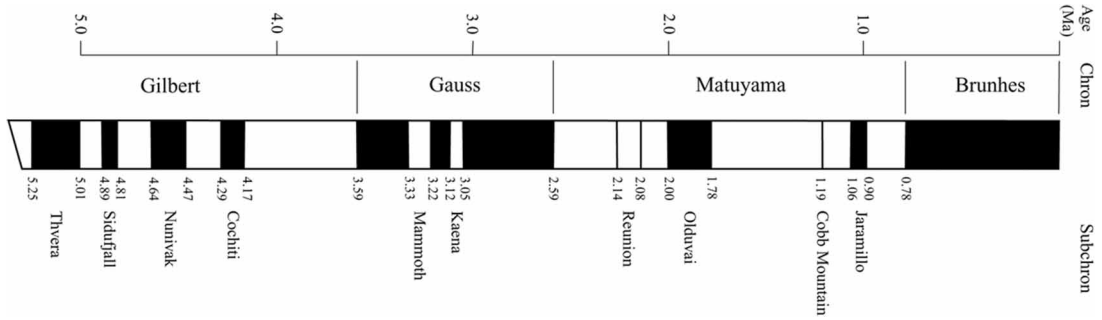


Figura 5 Sequenza delle inversioni di polarità magnetica durante gli ultimi 5.3 milioni di anni.
Figure 5 *Sequence of magnetic polarity reversals spanning the last 5.3 million years.*

Ci avviamo verso una nuova inversione del campo magnetico terrestre?

Sappiamo che l'intensità del campo (la sua componente dipolare) è in diminuzione, a partire dalle prime misure dirette effettuate da Gauss verso la metà del XIX secolo. Questo potrebbe suggerire che ci si stia avviando verso una nuova inversione. Tuttavia, gli studi paleomagnetici indicano che **durante gli ultimi 780 mila anni l'intensità del campo è variata continuamente ed ampiamente** e ha raggiunto un valore di picco positivo circa 2.000-2.500 anni fa. **È dunque normale che, da quel valore, vi sia ora una diminuzione.** Per questo motivo, al momento, **non si**

può stabilire se la decrescita di intensità del campo rappresenti la prima fase della prossima inversione di polarità. Potrebbe infatti essere parte del naturale processo di variazione che caratterizza ogni intervallo di polarità magnetica stabile.
Come detto, è noto che le inversioni avvengono durante periodi di bassa intensità del campo. Durante questi periodi, se sufficientemente lunghi (migliaia di anni), il campo magnetico terrestre può essere instabile e, in alcuni casi, invertirsi. L'inversione vera e propria può essere geologicamente molto rapida: **la durata delle inversioni (ovvero del processo di ribaltamento del polo geomagnetico virtuale da una regione polare all'altra) è stimata nell'ordine di qualche migliaia fino a centinaia di anni,** come suggerito da alcuni studi recenti**.**
L'interesse per una possibile inversione della polarità del campo magnetico terrestre è legato al fatto che quest'ultimo ci protegge dall'azione diretta del vento solare, un flusso continuo di particelle cariche di origine solare e cosmica. Il campo magnetico terrestre genera intorno alla Terra una regione di spazio, nota come magnetosfera, che scherma il pianeta dal flusso di queste particelle. La magnetosfera ha la forma di una cavità a goccia, compressa dal lato del giorno (ovvero del Sole) a causa della pressione esercitata dalle particelle in avvicinamento ed estesa dal lato della notte (per approfondimenti sull'effetto di schermo della magnetosfera puoi vedere anche questo post [4] dedicato al tema).

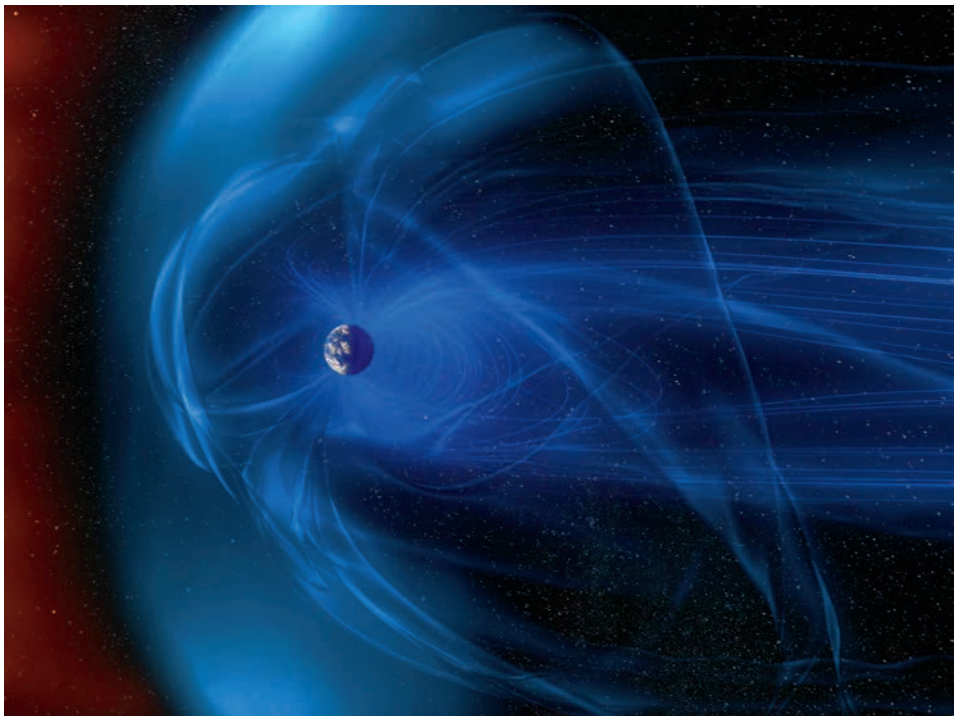


Figura 6 La magnetosfera è una regione dello spazio all'interno della quale è presente il campo magnetico terrestre, che scherma il pianeta dal flusso di particelle solari e cosmiche. (Crediti: Nasa/GSFC)
***Figure 6** The magnetosphere is a region of space where the Earth's magnetic field is present, shielding the planet from the flow of solar and cosmic particles. (Credits: NASA/GSFC)*

Cosa accadrebbe al nostro pianeta se non avesse un campo magnetico?

Nei pianeti con un campo magnetico estremamente debole e dunque senza magnetosfera (come ad esempio Marte) **il vento solare ha spazzato via l'atmosfera** (si veda il bel video [5] della NASA). **Questo chiaramente sulla Terra non è mai avvenuto** (almeno per gli ultimi 3.5 miliardi di anni).

Un campo magnetico terrestre di ridotta intensità implica un minor volume della magnetosfera con maggiore esposizione al vento solare ed ai raggi cosmici. Tuttavia **anche un campo debole esercita un effetto di schermo da queste radiazioni**. **Non sono state trovate** infatti, nonostante numerose ricerche sul tema, **correlazioni significative tra estinzioni biologiche ed inversioni del campo geomagnetico**. D'altra parte, **il genere umano è sopravvissuto senza apparenti effetti a molti eventi di ampia instabilità del campo magnetico nel passato** (le cosiddette "escursioni geomagnetiche", tentativi di inversione di polarità non portate a termine) ed anche ad alcune inversioni complete del campo. 780 mila anni fa infatti, all'epoca dell'ultima inversione, l'*Homo Erectus* era diffuso sul nostro pianeta e non ha subito effetti evidenti. Più in generale, **il genere *Homo* esiste da oltre 2 milioni di anni ed è sopravvissuto ad almeno 5 inversioni principali.**

I rischi nel mondo di oggi

Nella nostra civiltà attuale, sempre più criticamente dipendente dalla tecnologia, **sono senza dubbio invece da tenere in seria considerazione i potenziali effetti dovuti ad un campo magnetico di intensità fortemente ridotta** e con una morfologia molto probabilmente diversa dall'attuale. In questa configurazione infatti ci sarebbe un notevole aumento della penetrazione di particelle cariche nella magnetosfera a quote più prossime alla superficie terrestre, con importanti ripercussioni sul nostro mondo tecnologico.
Il campo magnetico terrestre è una proprietà fisica essenziale del nostro pianeta caratterizzata da una dinamica complessa e vivace, che influisce sull'*ambiente Terra* nel suo complesso e sulle nostre civiltà tecnologiche. Per questo motivo è importante monitorare le sue variazioni e studiare la sua configurazione e dinamica, sia attuale sia nel corso del passato geologico, mediante le informazioni registrate nelle rocce.
L'**INGV** è in prima linea in questo tipo di attività, sia con la gestione degli osservatori geomagnetici italiani e antartici, che con un laboratorio di paleomagnetismo, e con un attivo gruppo di tecnici, tecnologi e ricercatori dedicati allo studio delle tematiche legate al geomagnetismo, al paleomagnetismo e allo *space weather*.

Bibliografia

Brown M., Korte M., Holme R., Wardinski I. and Gunnarson S., (2018). *Earth's magnetic field is probably not reversing*, PNAS, 115(20), 5111–5116. https://doi.org/10.1073/pnas.1722110115

Glatzmaier G.A. and Roberts P.H., (1955). *A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal*, Nature, 377, 203–209. http://doi.org/10.1038/377203a0

Sitografia

[1] https://polarpedia.eu/en/earths-outer-core/
[2] https://websites.pmc.ucsc.edu/~glatz/geodynamo.html
[3] https://bit.ly/2AGTdVi
[4] http://ingvambiente.com/2018/06/20/la-magnetosfera-terrestre/
[5] https://www.youtube.com/watch?v=gX5JCYBZpcg

Il campo magnetico terrestre dà i numeri!

Laura Alfonsi e Domenico Di Mauro

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

La denominazione delle piste aeroportuali in tutto il mondo è legata al campo magnetico terrestre. Il numero dipinto sulla pista è infatti legato ai valori che la direzione magnetica assume rispetto al nord geografico in quel punto. Vediamo insieme come e perché.

Se vi capita di sorvolare sulle piste di atterraggio e decollo di qualsiasi aeroporto nel mondo, fate caso ai numeri stampigliati sull'asfalto all'inizio e alla fine della pista.
È un numero che ha a che fare con il **campo magnetico terrestre** e con lo strumento principe per il suo rilevamento, la **bussola**, di cui ogni velivolo è dotato. Questo ci ricorda, ancora una volta, l'importanza che il campo magnetico del nostro pianeta ha nella navigazione aerea (e non solo).



Figura 1 Suggestiva fotocomposizione del fotografo Mike Kelly dalla sua collezione di Ritratti aerei. (Aeroporto di Zurigo, copyright Mike Kelly)
Figure 1 *An evocative photo composition by photographer Mike Kelly from his the collection of Airportraits. (Zurich Airport, copyright Mike Kelly)*

Il numero, gigantesco e impresso in bianco affinché sia visto dai piloti in avvicinamento durante un volo aereo, **rappresenta l'angolo** (approssimato alla decina) **fra la direzione magnetica dell'asse della pista e il nord geografico**. Questa direzione, per semplificare, è quella che si legge su una bussola posizionata ad una estremità della pista e puntando lungo l'asse della pista stessa. Le due estremità di una pista avranno pertanto valori diametralmente opposti (ossia si differenzieranno per 180°).



Figura 2 Particolare del numero 07 stampato su una delle piste dell'aeroporto di Fiumicino (Roma). (Da Google Earth TM)
Figure 2 *Detail of the number 07 printed on one of the runways at Fiumicino Airport (Rome). (Google Earth TM)*



Figura 3 Pista dell'aeroporto di Lampedusa (AG), in Sicilia. (Da Google Earth TM)
Figure 3 *Runway of Lampedusa Airport (AG), in Sicily. (Google Earth TM)*

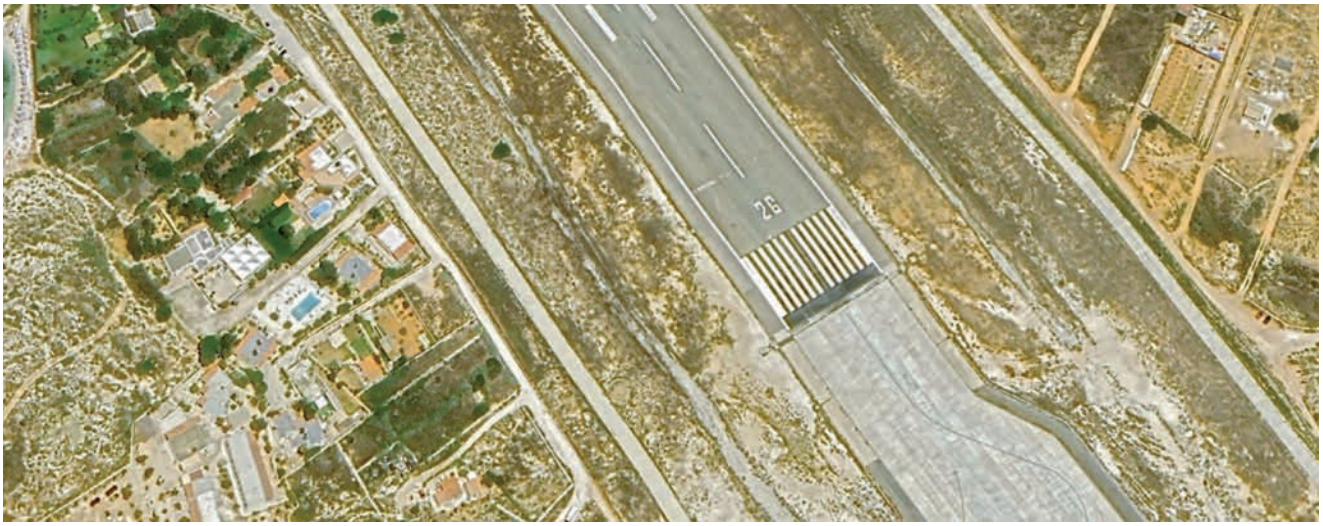


Figura 4 Ingrandimento della pista di Lampedusa ove è visibile il numero stampigliato 26, inteso come direzione di 260° rispetto al Nord geografico (contato in senso orario) dell'asse della pista, riportata nell'immagine precedente. (Da Google Earth TM)
Figure 4 *Enlargement of runways at Lampedusa in which the printed number 26 is visible, indicating a direction of 260° relative to true north (measured clockwise) of the runway axis, as shown in the previous image. (Google Earth TM)*

La scelta di denominare le piste aeroportuali collegandole ai valori del campo magnetico terrestre è dettata dalla necessità di semplificare il lavoro dei piloti che, fra i tanti sofisticati strumenti di bordo, possono pur sempre utilizzare la bussola in tutte le fasi del volo sulla pista, avendo due riferimenti guida: i numeri all'inizio delle piste, in entrambe le estremità (alla pista ci si può avvicinare da entrambi i versi), sono gli stessi valori che deve leggere sulla bussola di bordo, quando l'aereo è allineato alla pista.

La differenza tra la direzione magnetica e la direzione del nord geografico è un fatto inevitabile: l'asse di rotazione della Terra, che determina i due poli geografici e l'asse del dipolo geomagnetico a cui si approssima quello del campo magnetico terrestre, **non coincidono**. Pertanto, in ogni punto sulla superficie terrestre si può misurare la loro differenza angolare, nota come **declinazione magnetica**.

Alle medie latitudini questo angolo è piccolo: in Italia il suo valore medio si attesta intorno ai 3°. Alle alte latitudini la declinazione magnetica può essere un angolo notevole e i numeri stampigliati sulle piste incorporano questa differenza.

C'è di più. La **declinazione magnetica cambia nel tempo**, perché muta nel tempo la geometria del campo magnetico terrestre come effetto dei meccanismi dinamici che generano il campo stesso. Vi è ad esempio la *variazione secolare* (che avviene lentamente, come si intuisce dal suo nome) che determina anche la lenta migrazione verso ovest del meridiano geomagnetico 0 (quello che unisce idealmente i due poli geomagnetici). Il meridiano geografico 0 invece, quello che passa per Greenwich unendo i due poli geografici, **è sempre fisso**.

Questo fatto comporta una variazione (lenta ma inesorabile) **nei valori della direzione magnetica in ogni luogo della Terra**, compreso quello in cui sorgono le piste aeroportuali. È una condizione che anche i naviganti conoscono bene, come è chiaramente indicato sulle carte nautiche. Esse, infatti, riportano sempre il valore della declinazione magnetica e la previsione della sua variazione negli anni per quella parte di mare che rappresentano. Sono valori indispensabili per una corretta pianificazione della rotta.



Figura 5 Carta nautica di un settore del mar Tirreno (da Riva di Traiano a Fiumicino) con l'indicazione della declinazione magnetica come cerchio graduato riportato in basso a sinistra. (Crediti NAVIMAP)

Figure 5 *Nautical chart of a sector of the Tyrrhenian Sea (from Riva di Traiano to Fiumicino) with the indication of magnetic declination as a graduated circle shown in the bottom left corner. (Credits NAVIMAP)*

Anche i numeri stampigliati sulle piste, dunque, necessitano aggiornamenti. È quanto accaduto qualche anno fa all'aeroporto internazionale di Tampa (in Florida, USA): nel 2010 hanno ritinteggiato il numero della pista 36 L in 1 L, come mostrato nelle prossime due fotografie.

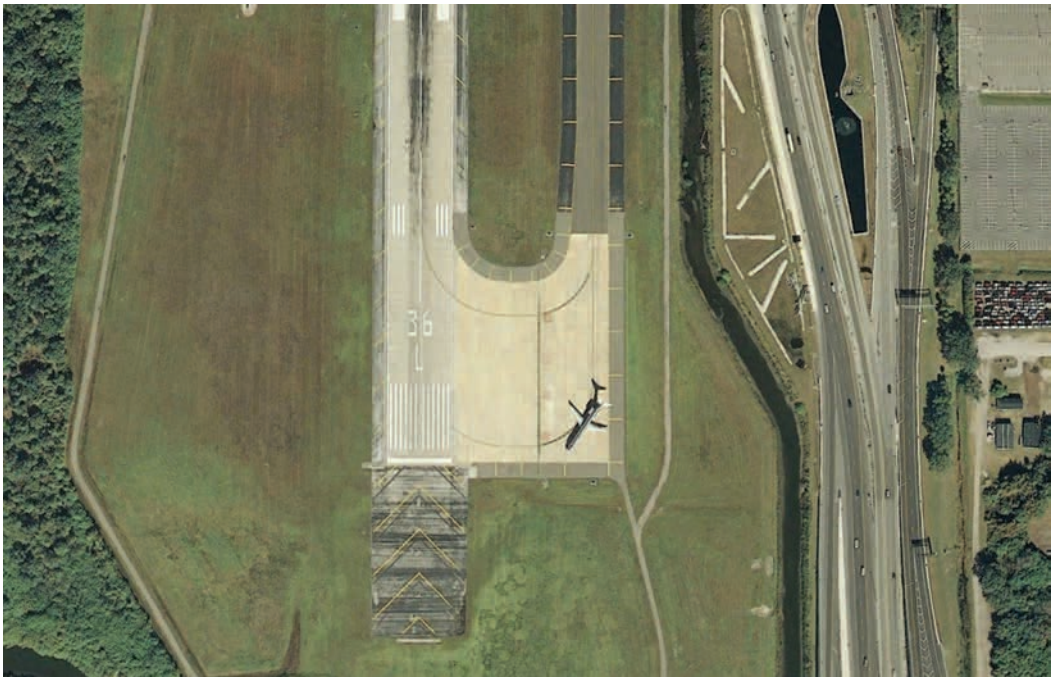


Figura 6 Pista 36 L (Left – sinistra), presso l'aeroporto di Tampa (Florida, USA). Era il nome della pista prima del 2011. (Da Google Earth TM)
Figure 6 *Runway 36L (Left) at Tampa Airport (Florida, USA). This was the name of the runway before 2011. (Google Earth TM)*



Figura 7 Pista 1 L (Left – sinistra), nuovo nome a partire dal 2011 della pista che si chiamava 36L (vedi Figura 6). Nome che conserverà fino alla prossima correzione. (Da Google Earth TM)
Figure 7 *Runway 1L (Left), the new name since 2011 of the runway previously called 36L (see Figure 6). This name will be kept until the next correction. (Google Earth TM)*

Il magnetismo e l'espansione dei fondali oceanici

Chiara Caricchi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Cosa è la teoria della espansione dei fondali oceanici?

La teoria della espansione dei fondali oceanici venne avanzata dallo scienziato statunitense Harry Hammond Hess alla fine degli anni '50 del secolo scorso. Egli affermò che i continenti sono trasportati passivamente dai moti del mantello. Il materiale caldo in movimento dal mantello sale e arriva in superficie e fuoriesce lungo le dorsali oceaniche (zona assottigliata e fratturata della superficie terrestre). Il materiale fuso (lava) si raffredda e solidificandosi genera nuova litosfera. A sua volta questa litosfera, trascinata da movimenti del mantello, si allontana da entrambi i lati della dorsale, andando a formare il fondale delle piane abissali.

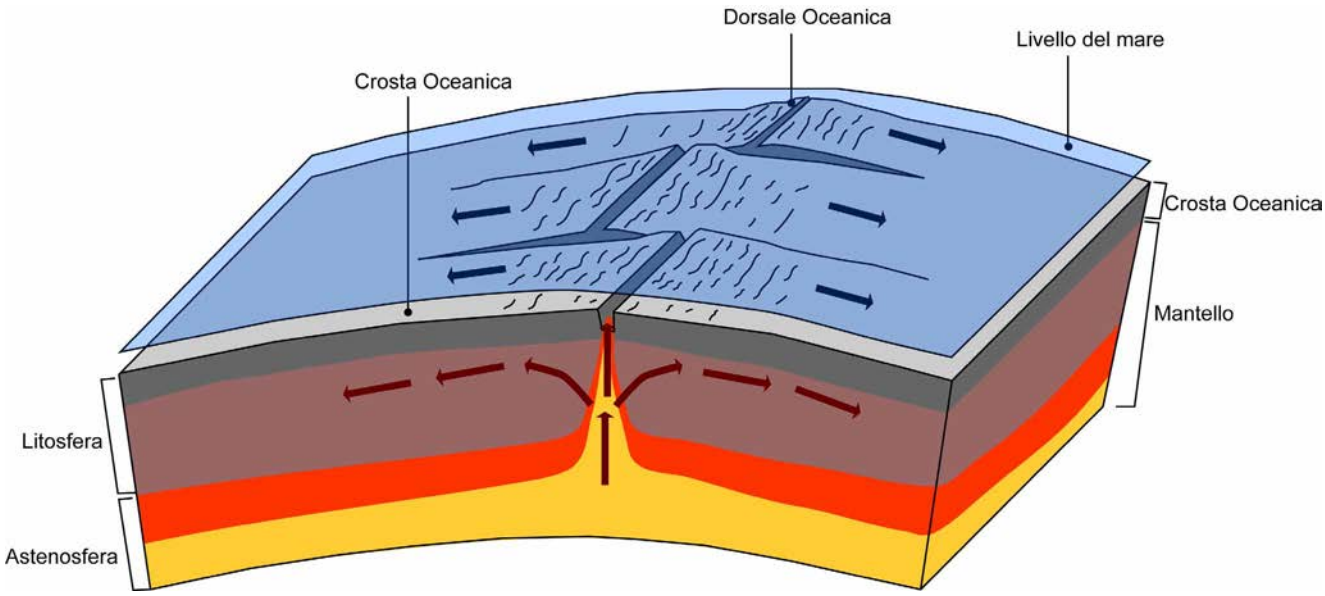


Figura 1 Rappresentazione schematica di una dorsale oceanica. Lungo questa struttura fuoriesce lava, in risalita dal mantello, che raffreddandosi genera nuova crosta (oceanica) che va a formare le piane abissali. (Grafica di C. Caricchi)

Figure 1 *Schematic representation of an oceanic ridge. Along this structure, lava emerges, rising from the mantle, which upon cooling generates new (oceanic) crust that forms the abyssal plains. (Graphics by C. Caricchi)*

Ma se si forma nuova crosta perché la terra non ha cambiato il suo volume?

Questa è una domanda che intrigò molto lo scienziato Hess e che lo portò a teorizzare che una quantità eguale di litosfera deve essere distrutta in altre zone della terra, le zone di subduzione o fosse oceaniche. Man mano che il mantello si allontana dalla dorsale si raffredda e diventa più pesante inizia ridiscendere e con esso anche la sovrastante crosta oceanica che si piega e si immerge nel mantello generando le fosse.

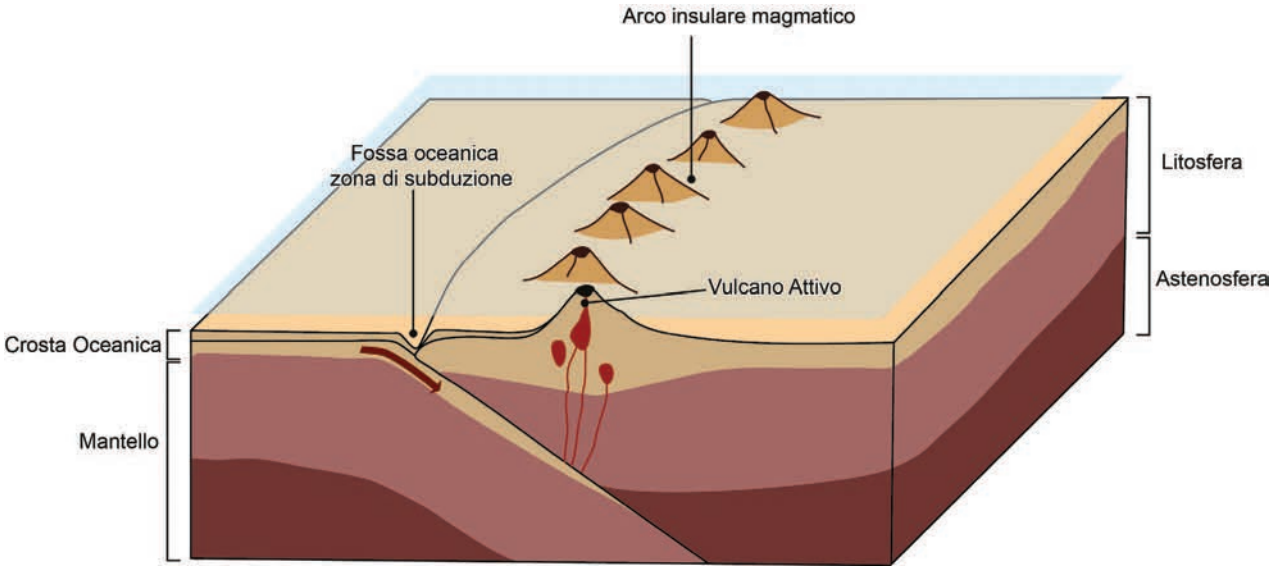


Figura 2 Rappresentazione schematica di una zona in subduzione dove la litosfera fredda e densa inizia a scendere in profondità e fondere generando vulcanismo. (Grafica di C. Caricchi)
Figure 2 *Schematic representation of a subduction zone where the cold and dense lithosphere begins to descend into depth and melt, generating volcanism. (Graphics by C. Caricchi)*

E il magnetismo cosa c'entra in tutto questo?

C'entra moltissimo! Negli anni '60 campagne di misura svolte su navi oceanografiche hanno permesso di descrivere in modo dettagliato i fondali marini evidenziando la presenza delle dorsali oceaniche. Inoltre queste navi avevano a bordo strumenti in grado di misurare l'intensità del campo magnetico. Le misurazioni compiute in mare aperto evidenziarono la presenza di anomalie magnetiche, cioè di deviazioni positive o negative rispetto ai valori normali medi dell'intensità del campo magnetico terrestre. In particolare quello che colpì l'interesse degli studiosi fu osservare fasce di anomalie magnetiche parallele alle dorsali oceaniche, simmetriche tra di loro e con valori di magnetizzazione che si alternavano, da un valore positivo a uno negativo. Nei fondali oceanici veniva osservato un pattern molto simile a quello del mantello di una zebra.



Figura 3 Mappa delle anomalie magnetiche sui fondali oceanici a largo della costa occidentale nordamericana (da 40° a 52° gradi di latitudine). (Immagine da Raff A.D. e Mason R. [1961])
Figure 3 *Map of magnetic anomalies on the ocean floor off the western coast of North America (from 40° to 52° degrees latitude). (Image by Raff A.D. and Mason R. [1961])*

Ma che cosa stavano a significare queste anomalie? La risposta venne dai geofisici Drummond Hoyle Matthews e Frederick John Vine. Questi scienziati spiegarono il fenomeno partendo da due presupposti:

- le rocce che formano i fondali degli oceani sono delle rocce vulcaniche che si magnetizzano al momento della loro formazione;
- il campo magnetico ha manifestato numerose inversioni di polarità nel tempo geologico, ricostruite attraverso dati paleomagnetici.

Su questa base Matthews e Vine affermarono quindi che le anomalie dovevano essere legate a magnetizzazioni delle rocce o con direzione uguale al campo magnetico misurato (anomalie positive-bande nere) o con direzione opposta (anomalie negative-bande bianche).
In seguito, la prova indipendente e sperimentale fornita dai paleomagnetisti permise di correlare la scala temporale delle inversioni di polarità del campo magnetico terrestre – ricostruita attraverso studio di dettagli su sequenze laviche esposte sulla terraferma – alle anomalie magnetiche dei fondali oceanici, confermando l'attendibilità della teoria di Hess e portando alla sua definitiva affermazione.
La conseguenza del fatto che la crosta oceanica ha magnetizzazioni differente, comporta quindi che si sia formata anche in tempi diversi. Ed è qui che ci riagganciamo alla teoria della espansione dei fondali oceanici.
La lava, fuoriuscendo dalla dorsale oceanica, si raffredda e genera nuova crosta oceanica, magnetizzata secondo la polarità del campo magnetico presente al momento della eruzione. In seguito, la crosta neoformata viene fratturata lungo la dorsale e si allontana da essa lasciando spazio alla formazione di nuova crosta, così come mostrato in figura passando dal tempo 1 al tempo 3.

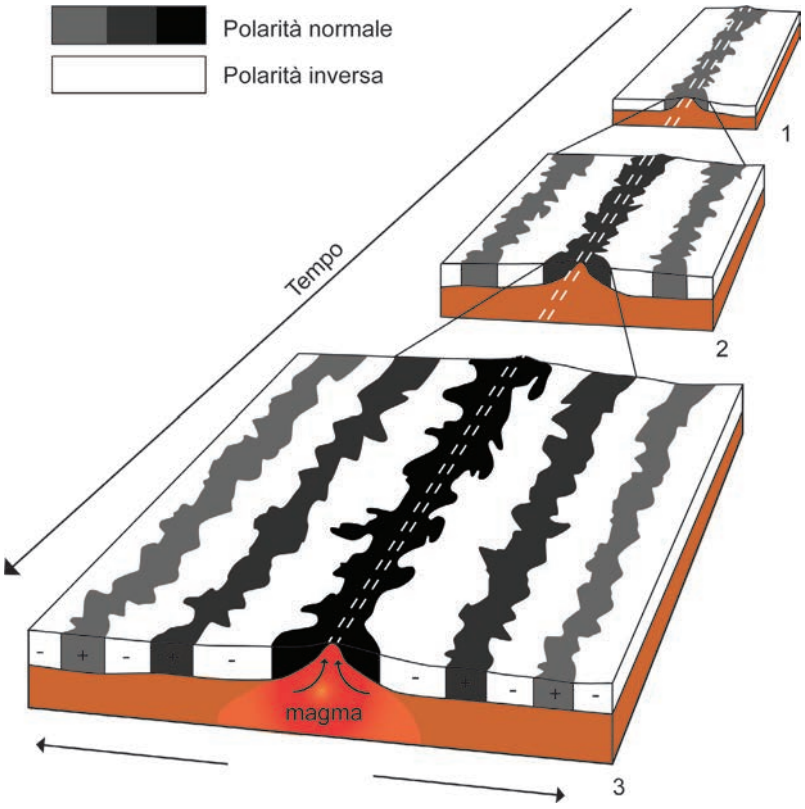


Figura 4 Rappresentazione schematica dell'espansione del fondale presso una dorsale medio oceanica. (Grafica di C. Caricchi)

Figure 4 *Schematic representation of seafloor spreading at a mid-ocean ridge. (Graphics by C. Caricchi)*

L'ipotesi di questa espansione degli oceani porta anche la conseguenza secondo cui l'età delle rocce dei fondali oceanici non è ovunque la stessa, ma deve essere tanto più antica quanto più ci si allontana dalla dorsale.
Questa supposizione è stata definitivamente confermata alla fine degli anni '60 quando una nave da crociera Glomar Challenger permise studi scientifici e ricerche in mare profondo. Vennero prelevati alcuni campioni a seguito i carotaggi dei fondali oceanici. Da misure specifiche effettuate su questi campioni si è risaliti alla età delle diverse bande di anomalia magnetica. Il passo successivo è stato quindi quello di definire la velocità con cui gli oceani si espandono, calcolata considerando la distanza dalla dorsale e la età delle rocce in esame. Tale velocità è risultata essere qualche cm all'anno. Possiamo immaginare che gli oceani si espandono ad una velocità paragonabile a quella della crescita delle unghie delle nostre mani.

Bibliografia

Raff A.D. e Mason R., (1961). *Magnetic survey off the west coast of North America, 40° n. latitude to 52° n. latitude*. Geological Society of America Bulletin, 72, 1267-1270. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1961)72[1267:MSOTWC]2.0.CO;2

La Val Padana è africana! La convergenza tra Africa e Eurasia nel Mediterraneo

Gaia Siravo

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Cosa hanno in comune Pianura Padana e Africa? Esploriamo insieme la teoria della tettonica a placche e la sua espressione nel Mar Mediterraneo.

La pianura Padana è africana!

Detta così sembra una gran baggianata perché tutti sappiamo che la pianura Padana è una grande area pianeggiante situata nell'Italia Settentrionale alle pendici delle Alpi. Ed è anche la pianura dove scorre il fiume più lungo d'Italia, il Po. E per certo sappiamo si trova in nord Italia. Questa, quindi, è la sua posizione nell'ambito della geografia fisica. Geologicamente parlando tuttavia non si può dire lo stesso. Consideriamo per un attimo un tipo diverso di geografia, quello delle **placche tettoniche**.

Le placche tettoniche

La teoria globalmente accettata della tettonica a placche (*plate tectonics*) si basa sull'osservazione che l'involucro più esterno del pianeta, **la litosfera**, è suddiviso in porzioni più piccole, le **placche**. Queste compongo quindi una sorta di guscio fratturato, come le tessere di un puzzle (Figura 1). Le placche "galleggiano" sulla sottostante **astenosfera** e sono in costante movimento. Il moto delle placche è impercettibile all'uomo poiché è di pochi millimetri all'anno. Il moto relativo delle placche a contatto fra loro determina diversi processi geologici e più in generale diversi **margini di placca** (Figura 2). Le zone dove due placche si allontanano l'una dall'altra vengono detti **margini divergenti**. In queste aree avviene una continua emissione di materiale lavico (basalto) lungo le cosiddette **dorsali oceaniche** (es. Oceano Atlantico, Figura 1). Il materiale emesso lungo queste catene sottomarine andrà a formare nuova crosta oceanica, ed il continuo processo di eruzione sottomarina determina esso stesso l'allontanamento delle due placche. Le zone dove il movimento fra due placche adiacenti è puramente orizzontale vengono detti **margini trascorrenti o trasformi.** Questi margini sono essenzialmente conservativi dove cioè non viene né generata né consumata crosta terrestre. Infine, nelle zone dove avviene lo scontro fra due placche si hanno **margini convergenti.**

Le placche si scontrano

Nei margini convergenti (Figura 3) una delle due placche a contatto sprofonda al di sotto della superiore (**subduzione**). La natura della crosta a contatto in margini convergenti può dare origine a diversi fenomeni.

Margine convergente crosta continentale – crosta continentale

Nel caso in cui le due placche siano entrambe costituite da **crosta continentale** (rocce ignee

intrusive o metamorfiche con copertura sedimentaria) si avrà la formazione di una catena montuosa (**orogenesi**). Il materiale di copertura sedimentario verrà piegato, deformato e accavallato. Il lento e costante processo di convergenza porta alla accrezione del materiale delle due placche ed infine alla crescita della catena montuosa.

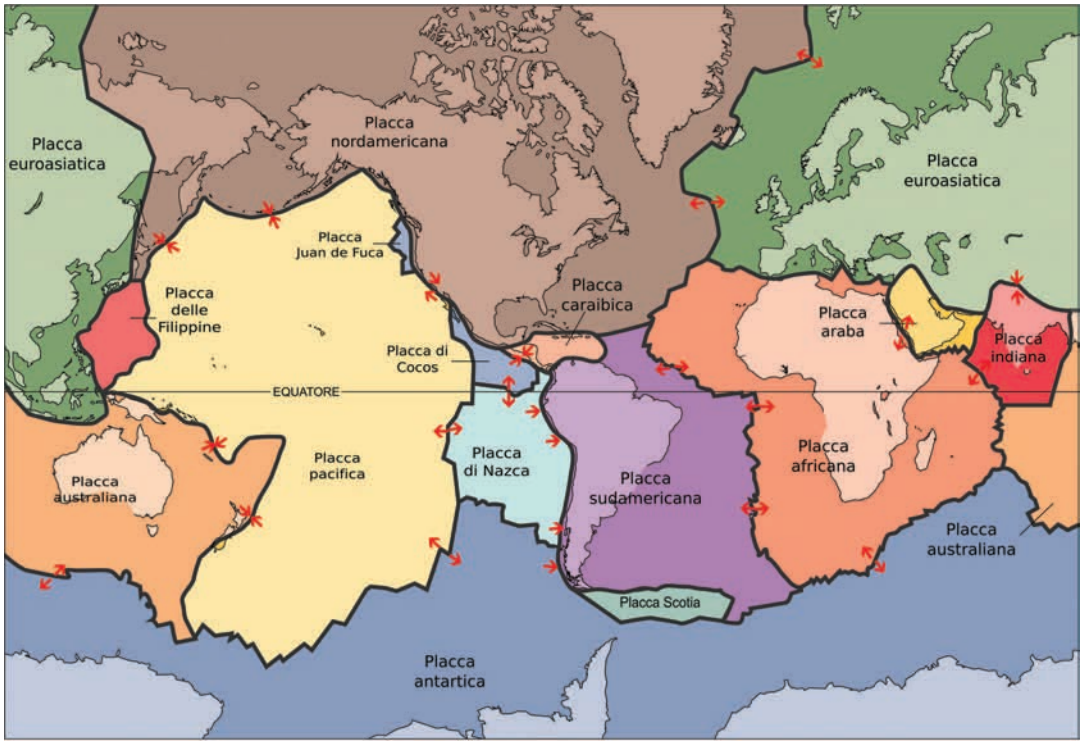


Figura 1 La geografia delle placche tettoniche. La forma e distribuzione delle principali placche tettoniche (linee nere spesse) non coincide con la distribuzione delle masse continentali (linee nere sottili). Le frecce rosse lungo i margini di placca indicano il movimento delle placche a contatto ed il tipo di margine: divergente frecce che si allontanano; convergente frecce che si scontrano; trascorrente frecce che scorrono parallelamente in direzione opposta. (Crediti immagine: Wikimedia Commons)

Figure 1 *The geography of tectonic plates. The shape and distribution of the main tectonic plates (thick black lines) does not coincide with the distribution of continental masses (thin black lines). The red arrows along the plate margins indicate the relative motion of the two plates and the type of margin: divergent arrows receding; converging arrows colliding; conservative arrows moving parallel in the opposite direction. (Credit Wikipedia public domain)*

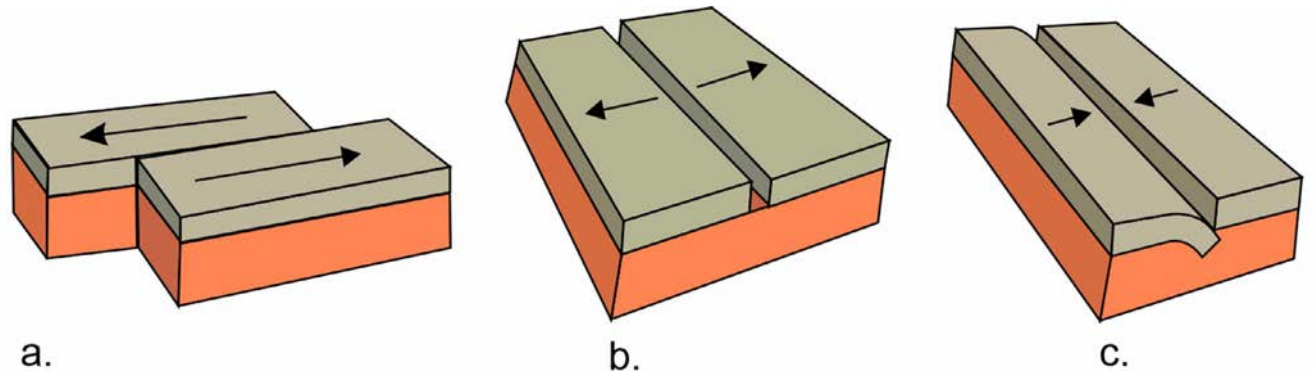


Figura 2 a. Margine trascorrente; b. margine divergente; c. margine convergente. (Crediti immagine: Wikimedia Commons, modificata da Gaia Siravo)

Figure 2 *a. Conservative or stike-slip margin; b. divergent margin; c. convergent margin. (Credit: Wikimedia Commons, modified by Gaia Siravo)*

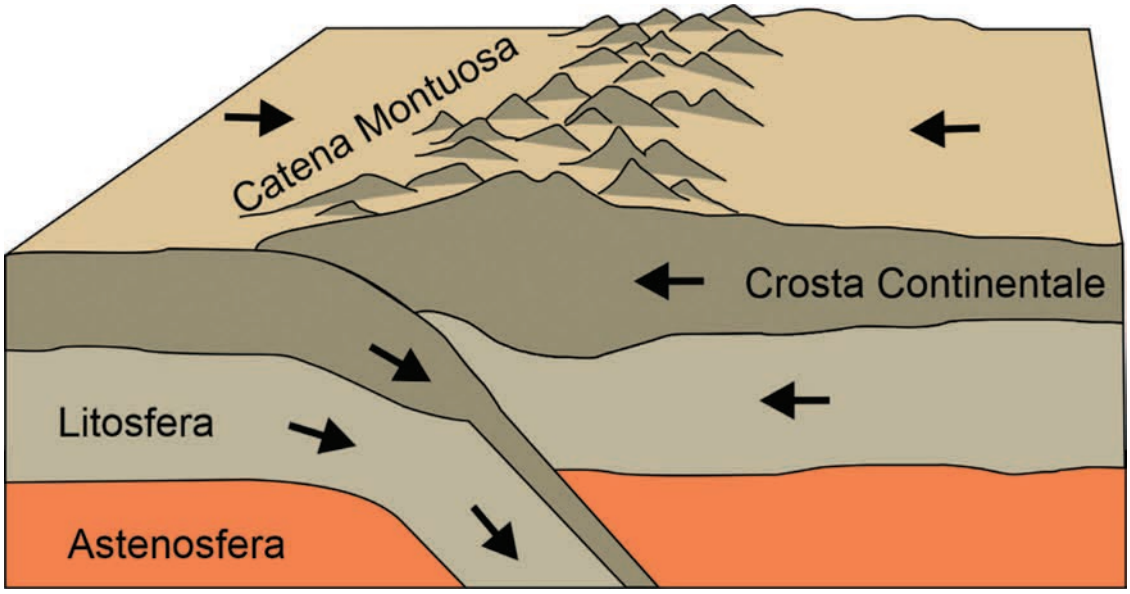


Figura 3: Collisione fra due placche di crosta continentale. (Crediti immagine: Wikimedia Commons, modificata da G. Siravo)

Figure 3: *Collision between two plates of continental crust. (Credit: Wikimedia Commons, modified by G. Siravo)*

Margine convergente crosta oceanica – crosta oceanica

Nel caso in cui si scontrino due placche di crosta oceanica (Figura 4) avverrà la subduzione di una delle due ed un lento consumo della stessa. La lenta fusione della placca oceanica in subduzione determina una risalita ingente di materiale magmatico che darà origine in superficie a vulcani, generalmente disposti a formare un arco. L'insieme della zona di subduzione, che in superficie si esprime con una **fossa oceanica** e dei vulcani posti oltre la fossa stessa viene detto **sistema arco-fossa**.

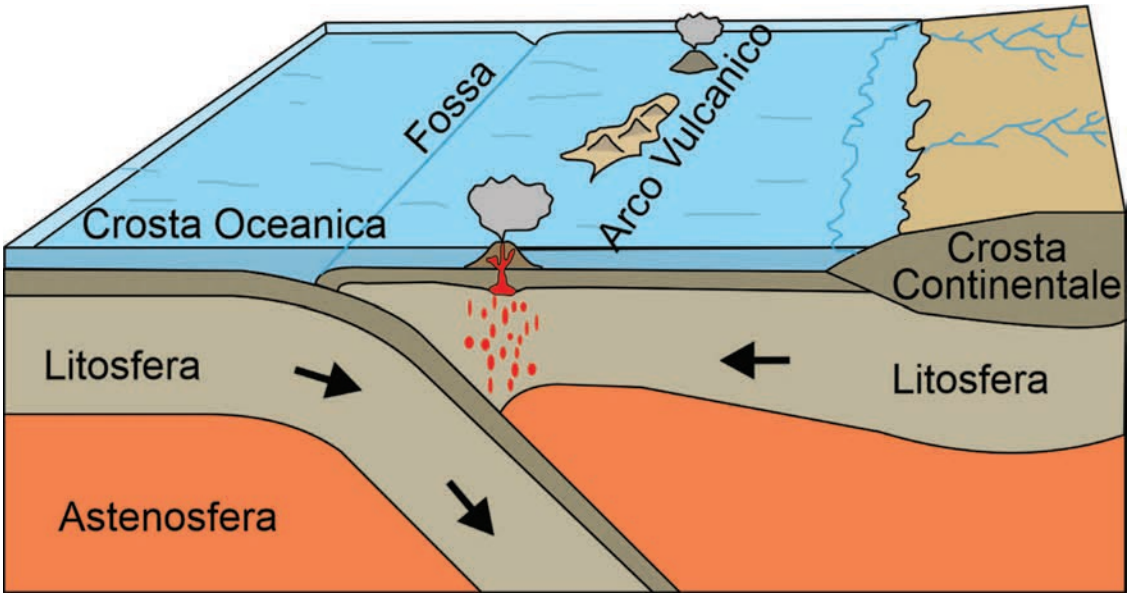


Figura 4 Collisione fra due placche di crosta oceanica. (Crediti immagine: Wikimedia Commons, modificata da G. Siravo)

Figure 4 *Collision between two plates of oceanic crust. (Credit: Wikimedia Commons, modified by G. Siravo)*

Margine convergente crosta continentale – crosta oceanica

Nel caso ibrido di una placca oceanica ed una continentale (Figura 5) si avrà la subduzione della placca di crosta oceanica (costituita prevalentemente da basalti e gabbri e perciò più densa di quella continentale), la formazione di un arco vulcanico impostato su crosta continentale ed il possibile sviluppo di una catena montuosa con deformazione attiva (es. Ande).

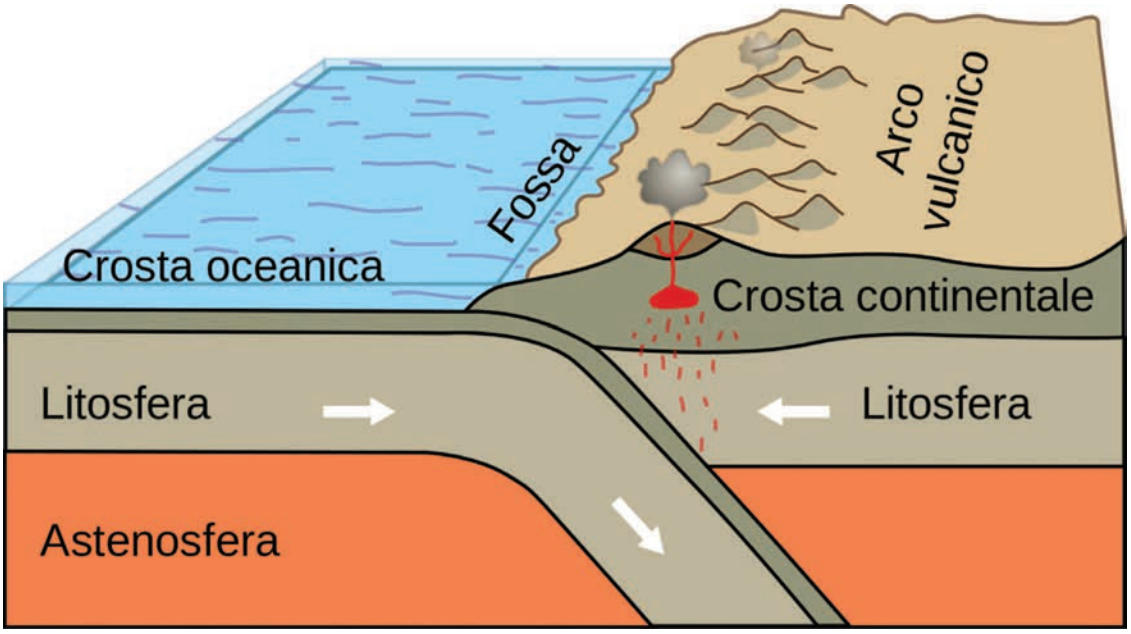


Figura 5 Collisione tra una placca di crosta oceanica ed una continentale. (Crediti immagine: Wikimedia Commons, modificata da G. Siravo)
Figure5 *Collision between an oceanic crust plate and a continental one. (Credit: Wikimedia Commons, modified by G. Siravo)*

Cosa succede nel Mediterraneo?

Si trova proprio in corrispondenza di un margine convergente fra due grandi placche: la placca Africana a Sud e la placca Euroasiatica a Nord (Figura 1). Aumentando il dettaglio di osservazione (Figura 6) si può notare come il confine fra le due placche sia complesso e contorto e come attraversi la penisola italiana per tutta la sua lunghezza. Ne risulta quindi che **la pianura Padana poggia sul lembo più settentrionale della placca Africana**, in particolare su quella sezione nota come Adria.
Il processo di collisione tra Africa ed Eurasia **continua da circa 100 milioni di anni**. Come prova diretta di questo fenomeno ci restano le grandi catene montuose dell'Appennino e delle Alpi e l'arco vulcanico delle Eolie.
Anche il **terremoto dell'Emilia Romagna del 2012** è una testimonianza di questo fenomeno: è avvenuto esattamente lungo il confine fra le due placche ed è dovuto al progressivo sprofondamento della placca Africana sotto quella Euroasiatica.



Figura 6 Geometria del margine convergente fra la placca Africana e la placca Euroasiatica nel Mediterraneo centrale. (Grafica di G. Siravo)

***Figure 6** Geometry of the convergent margin between the African plate and the Eurasian plate in the central Mediterranean. (Graphics by G. Siravo)*

Glossario

Astenosfera. L'astenosfera (dal greco asthenēs "debole" + sfera), o zona delle basse velocità, è una fascia superficiale del mantello terrestre, giacente sotto la litosfera e sopra la mesosfera, compresa tra i 100 e 300 km di profondità. Le rocce sono parzialmente fuse, dal momento che le onde S in essa non si fermano del tutto ma rallentano.

Crosta. La crosta terrestre è la porzione più esterna del pianeta limitata alla base dalla discontinuità di Mohorovicic. Si differenzia in crosta continentale ed oceanica per composizione e spessore.

Crosta continentale. La crosta continentale è la parte di crosta terrestre posta al di sotto delle aree continentali. La crosta continentale ha uno spessore medio di 30 km che raggiunge anche i 70 km al di sotto delle catene montuose. È generalmente composta da una sottile copertura di rocce sedimentarie e una grande spessore di rocce intrusive ignee acide) e metamorfiche.

Crosta oceanica. La crosta oceanica costituisce il fondo degli oceani e si forma per emissione di rocce laviche basiche in corrispondenza delle dorsali oceaniche. Ha uno spessore variabile fra 6 ed 8 km. È composta da uno strato superficiale di sedimenti oceanici, uno spessore di basalti ed uno spessore sottostante di gabbri (rocce intrusive basiche).

Litosfera. La litosfera (dal greco: λίθος (lithos) = "pietra, roccia" + σφαίρα (sphaira) = "sfera", vale a dire "sfera rocciosa") è la parte esterna (circa 100 km) più rigida del pianeta Terra, comprendente la crosta terrestre e la porzione del mantello esterno, fino all'astenosfera.

I gradienti e la dinamica del pianeta Terra[1]

Carlo Doglioni

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

La Terra è un pianeta dinamico perché è dotata di gradienti che ne controllano i fenomeni fisici e chimici, regolando i processi della Terra fluida (atmosfera, oceani) e della Terra solida (crosta, mantello). Ma qual è la natura dei gradienti che governano il nostro pianeta?

Un **gradiente** indica una variazione di un qualsiasi parametro fisico o chimico. Più gradienti di parametri che agiscono insieme con tempi e tassi diversi determinano comportamenti non lineari, sistemi caotici, anche auto-organizzati che possono evolvere in comportamenti collettivi catastrofici. Un gradiente genera **energia,** produce o è l'espressione di una differenza.
I fiumi scorrono a valle perché c'è sempre un gradiente topografico e quindi gravitazionale: la gravità non smette mai di funzionare. Le perturbazioni atmosferiche determinano forti piogge, che a loro volta abbassano la frizione nel suolo e nelle rocce, provocando frane: è un susseguirsi di gradienti che modellano la superficie terrestre. I vulcani eruttano perché all'interno delle camere magmatiche, dove si accumula la lava che fonde anche le rocce incassanti, si creano dei gradienti di pressione tali da sfondare la crosta terrestre sovrastante.

I gradienti della Terra

La **litosfera** è il guscio esterno della Terra con uno spessore medio di circa 100 km (variabile tra 30 e 250 km) ed è costituita dalla crosta terrestre e dal mantello litosferico.
La **crosta** rappresenta il differenziato chimico più leggero della Terra e può essere continentale o oceanica, con spessori medi di 30-40 km e 3-10 km, rispettivamente. La crosta ha un gradiente termico medio di circa 30°C/km nei primi 10 km, poi scende a 15 °C/km e a 8°C/km nella crosta superiore e inferiore. La **Moho** è il limite tra crosta e mantello e ha una temperatura stimata tra 450°C e 700°C.
La **litosfera** ha alla sua base una temperatura di circa 1.300°C e poggia sull'astenosfera (sfera debole). L'astenosfera va da circa 100 a 410 km di profondità e tra 100 e 180 km è caratterizzata da un relativo abbassamento della velocità delle onde sismiche. Per questo motivo tale livello è chiamato canale a bassa velocità (in inglese "low-velocity zone", LVZ). Nel sottostante mantello, fino a 2.890 km, il gradiente termico medio è inferiore a 1°C/km.
Al centro della Terra la temperatura T massima stimata è di circa 6.000°C.
La litosfera è rotta in frammenti, le cosiddette placche, che, trovandosi su una sfera, sono delle calotte che si muovono l'una rispetto all'altra.
Da dove viene la forza che genera la tettonica delle placche, cioè la dinamica dei frammenti di litosfera che si muovono l'uno rispetto all'altro?
L'energia è in genere interpretata come la dissipazione della convezione mantellica, dovuta al **gradiente di temperatura** tra la parte superficiale della Terra e la base del mantello terrestre. L'astenosfera presenta un abbassamento della viscosità che permette alla litosfera di "scivolare" sull'astenosfera. Quindi la litosfera è leggermente disaccoppiata rispetto al mantello sottostante,

[1] Contenuto estratto dalla voce "Terra" – pubblicata nell'opera Parole del XXI secolo della Enciclopedia Italiana Treccani.

riuscendo a muoversi di alcuni centimetri l'anno. Questo movimento è polarizzato verso ovest, o meglio lungo un flusso esemplificato dall'equatore tettonico che è un cerchio massimo formante un angolo di circa 30° con l'equatore geografico.

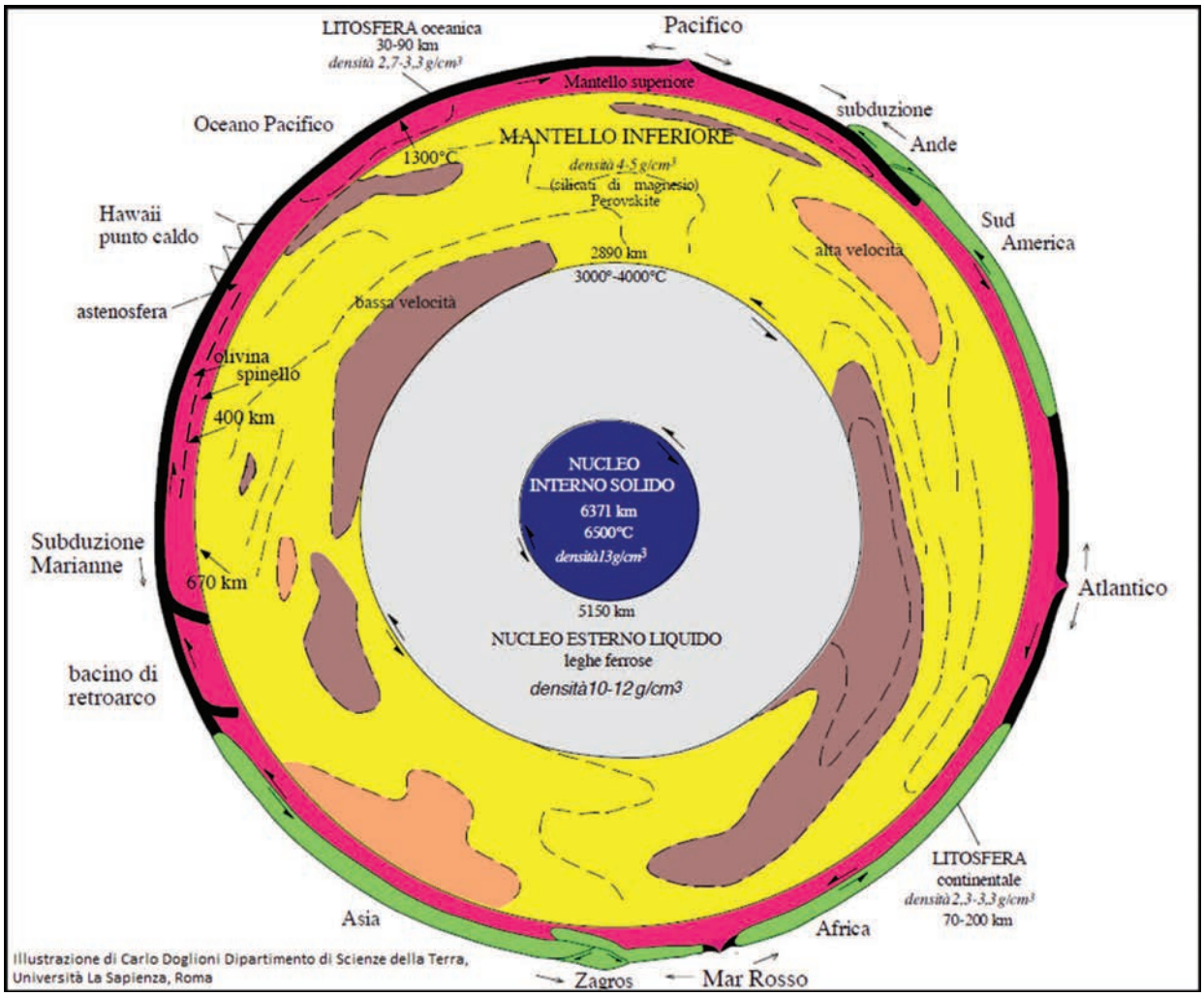


Figura 1 Gli strati della Terra. (Grafica di C. Doglioni)
Figure 1 *The layers of our planet. (Graphics by C. Doglioni)*

La tettonica delle placche

Possiamo quindi definire una placca come un **frammento di litosfera** caratterizzato da una velocità propria, diversa da quella degli elementi litosferici attigui. **Perché c'è differenza di velocità tra le placche?**
Una spiegazione semplice è che nel canale a bassa velocità vi siano delle variazioni di viscosità che vincolano il grado di disaccoppiamento tra la singola placca e il mantello.
Gradienti laterali di viscosità sul piano di scollamento controllano cioè i gradienti di velocità tra le placche e, quindi, la sismicità, che è dovuta a gradienti di pressione che si sviluppano ai margini tra le placche, siano esse in avvicinamento, allontanamento o scorrimento laterale.
La placca più veloce al mondo è quella Pacifica che si muove verso ovest nord-ovest rispetto al mantello di oltre 10 cm (forse 20 cm) all'anno. È la placca che ha al di sotto un canale a bassa velocità con la minore viscosità conosciuta (1.017 Pa × s), a riprova che la velocità delle placche rispetto al mantello e, quindi, anche tra loro stesse, sia funzione dei gradienti di viscosità alla loro base.

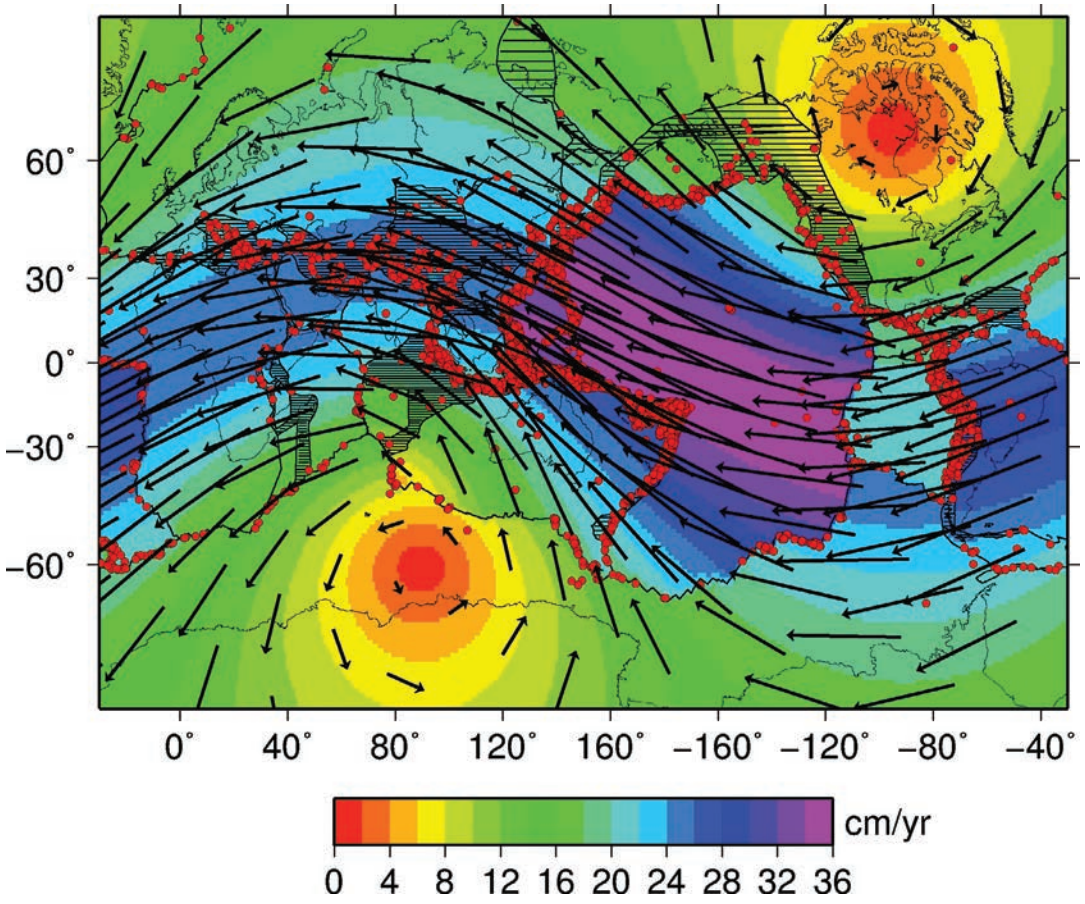


Figura 2 Modello cinematico delle placche rispetto al mantello; i pallini rossi identificano i terremoti di magnitudo maggiore/uguale a 6 che disegnano i margini delle placche dove si creano i maggiori gradienti di pressione. (Cuffaro, Doglioni [2018])

Figure 2 *Kinematic model of the plates relative to the mantle; the red dots identify earthquakes with a magnitude greater than or equal to 6, which outline the plate boundaries where the greatest pressure gradients are created. (Cuffaro, Doglioni [2018])*

Un fattore fondamentale nel controllo della tettonica delle placche è, dunque, l'influenza delle variazioni laterali di spessore, densità e composizione sia nella litosfera sia nel mantello astenosferico. Se vi fosse uno scollamento relativo globale uniforme tra litosfera e mantello, allora la litosfera si comporterebbe come un **guscio unico**, coerente e senza velocità relative interne: non ci sarebbe, cioè, tettonica delle placche.

Questa è forse anche la situazione di **altri pianeti**, dove probabilmente la litosfera continentale si è accresciuta fino a ricoprire l'intero globo, cosa che lentamente sta avvenendo anche sulla Terra. Con una litosfera continentale spessa e uniforme di 150-200 km che coprisse l'intero pianeta, non ci sarebbe tettonica delle placche, perché essendoci una condizione di equilibrio non ci sarebbe la possibilità di comprimere o di distendere la litosfera. È forse anche questa una delle ragioni del perché non esiste la tettonica delle placche, così come la conosciamo noi, su altri pianeti.

Invece, la presenza limitata di litosfera continentale sulla superficie terrestre e il contrasto con quella oceanica più sottile e più densa, inducono l'instaurarsi di velocità differenziali e, quindi, di movimenti relativi tra elementi di litosfera. Questo perché ognuno di essi è caratterizzato alla sua base da valori di viscosità diversa dell'astenosfera, gradienti che controllano l'entità dello scollamento della litosfera e, quindi, della sua velocità.

La polarizzazione della litosfera verso ovest è in grado di spiegare la maggiore inclinazione delle subduzioni dirette verso ovest rispetto a quelle opposte, oltre che alla differenza tra le catene

montuose associate. Esempi paradigmatici sono il confronto tra il Pacifico occidentale con quello orientale oppure, semplicemente, la comparazione tra le caratteristiche degli Appennini rispetto alle Alpi. Un elemento chiave di lettura è la cinematica della cerniera delle zone di subduzione che in genere si allontana dalla placca a tetto nelle subduzioni dirette a 'ovest', mentre si avvicina alla placca a tetto nelle subduzioni opposte.

Sulla base delle velocità delle stazioni **GPS** e del comportamento della cerniera delle zone di subduzione, è possibile calcolare i volumi di litosfera che si incuneano nel mantello terrestre: sono circa 300 milioni di km^3. C'è però un'asimmetria, cioè il volume delle subduzioni che si immergono verso ovest è di oltre 214 km^3. Il rimanente è per le subduzioni opposte verso est (cordigliere americane) o nord-est (sistema alpino-himalayano). Vi è quindi una differenza di riciclo tra i due sistemi che implica un gradiente di volumi e, quindi, di compensazione all'interno del mantello terrestre, che deve relativamente migrare da ovest a est per reintegrare il gradiente di massa.

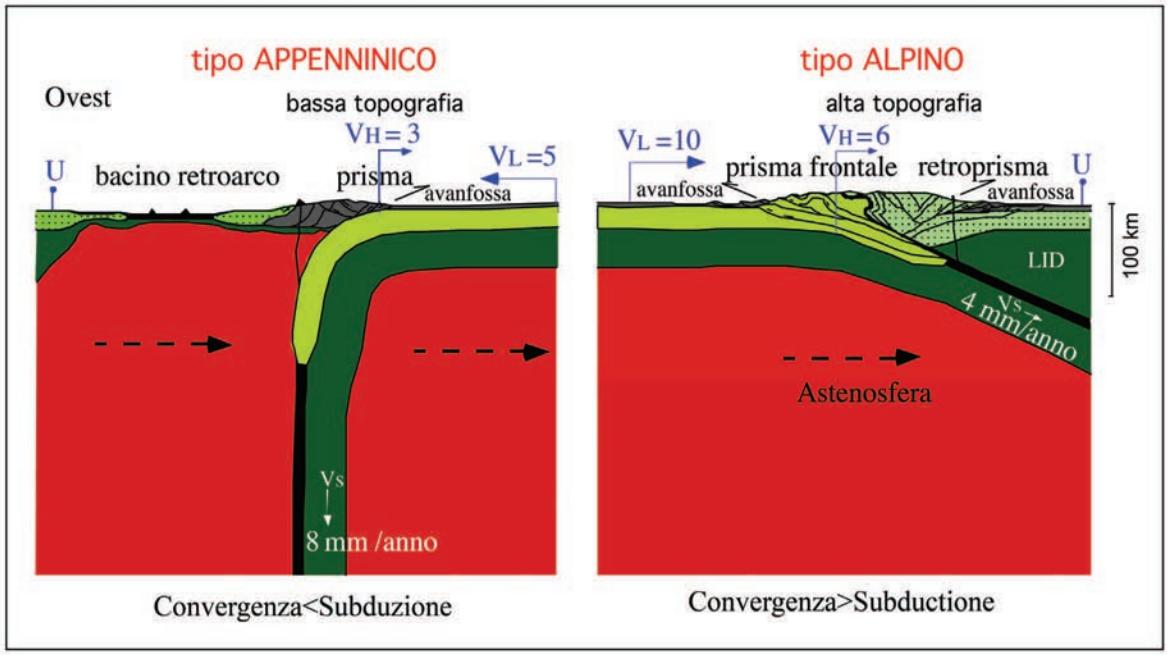


Figura 3 Asimmetria delle zone di subduzione in funzione della loro polarità rispetto al movimento della litosfera verso ovest relativamente al mantello astenosferico; i numeri indicano le velocità in mm/anno, ma in molte subduzioni del mondo sono cm/anno. (Doglioni, Panza [2015])

Figure 3 *Asymmetry of subduction zones as a function of their polarity relative to the westward movement of the lithosphere with respect to the asthenospheric mantle; the numbers indicate velocities in mm/year, but in many subductions around the world, they are in cm/year. (Doglioni, Panza [2015])*

Tutto questo è coerente con una tettonica delle placche polarizzata, con la litosfera che si muove relativamente verso ovest rispetto al mantello, per l'effetto combinato dei gradienti astronomici generati da disallineamenti gravitazionali ed endogeni, quali gradienti di temperatura, composizione e viscosità.

Questa asimmetria è compatibile con la differenza tra le catene montuose associate alle zone di subduzione: basse, con un profondo bacino di avanfossa e la presenza di un bacino di retroarco per le subduzioni dirette a ovest, mentre elevate e costituite da grandi affioramenti di rocce profonde e cristalline, con un'avanfossa poco profonda e l'assenza del bacino di retroarco per le subduzioni dirette a est o nord-est. Esempi di questa asimmetria sono le subduzioni dell'ovest rispetto a quelle del Pacifico orientale, oppure gli Appennini rispetto alle Alpi.

Nelle subduzioni dirette a ovest (tipo appenninico), la cerniera della subduzione (VH) si allontana rispetto alla placca a tetto (U) e la velocità di subduzione (VS) è maggiore della convergenza (VL, placca a letto). Viceversa, nelle subduzioni verso est o nordest, la cerniera si avvicina rispetto alla placca a tetto e la convergenza è maggiore della subduzione (tipo alpino).
Nelle subduzioni verso ovest si forma un bacino di retroarco e la catena ha bassa elevazione, è costituita per lo più da rocce superficiali e ha una singola vergenza. Nelle subduzioni opposte, invece, la catena ha doppia vergenza, alta elevazione e affiorano rocce cristalline profonde.

Qual è la forza che spinge la litosfera verso ovest?

Nel suo moto di rotazione verso est, la Terra è soggetta all'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole, fenomeno che genera le maree, sia liquide sia solide. La parte solida della Terra è soggetta a continue oscillazioni, sia verticali sia orizzontali, accompagnate da variazioni della gravità terrestre. Non ce ne rendiamo conto e i pavimenti di casa non si deformano per la marea solida perché la bolla mareale ha una lunghezza di migliaia di chilometri.
La Terra, però, non è un corpo perfettamente elastico, ma ha una certa componente di anelasticità. L'anelasticità della Terra fa sì che quando la Luna è allo zenit, la superficie si protragga verso il nostro satellite con alcuni minuti di ritardo, determinando un rigonfiamento che è disallineato rispetto alla linea di massima attrazione gravitazionale Terra-Luna. Questo rialzo si trova dunque in condizione di instabilità e tende a produrre un momento e quindi una forza orientata verso ovest, dando una spiegazione della deriva della litosfera verso ovest.

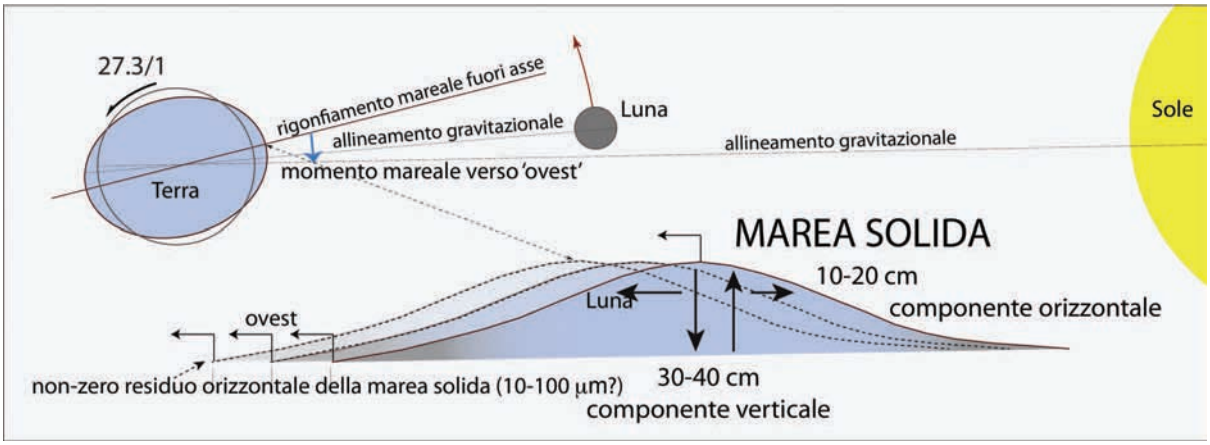


Figura 4 Rialzo della marea solida e spostamento in orizzontale del suolo a ogni passaggio dell'attrazione lunisolare; la Terra ruota 27,3 volte rispetto a una rivoluzione della Luna attorno alla Terra. (Zaccagnino, Vespe, Doglioni [2020])
Figure 4 *Lunisolar tidal drag on the Earth; The Earth viewed from above the North pole rotates eastward about 27,3 times faster than the Moon. (Zaccagnino, Vespe, Doglioni [2020])*

Ciò rappresenta un freno alla rotazione terrestre, che rallenta di 2 millisecondi al secolo. 400 milioni di anni fa, infatti, l'anno durava circa 400 giorni e il giorno circa 20 ore.
Inoltre, la Luna si sta allontanando dalla Terra di circa 3,8 cm all'anno per la conservazione del momento angolare. Il disallineamento tra rigonfiamento mareale e linea di forza gravitazionale Terra-Luna provoca un gradiente in grado di spingere la litosfera verso ovest.
Per innescare una subduzione, dove la litosfera entra nel mantello terrestre, è sempre necessaria la presenza di un contrasto di spessori litosferici e di velocità relative diverse: il più sottile e più

denso sarà sempre quello che va in subduzione e la subduzione sarà verso ovest se la litosfera più sottile si trova a est, mentre sarà verso est se la litosfera più sottile si trova a ovest o, più precisamente, lungo il tracciato delle linee di flusso esemplificate dall'equatore tettonico. Questo vale sia per la litosfera oceanica sia per quella continentale, sebbene la litosfera oceanica abbia capacità di gran lunga superiore di scendere in subduzione.
La tettonica delle placche si realizza, dunque, perché le varie placche hanno velocità variabili lungo le linee di flusso, con valori relativi di movimento oscillanti tra 0 e 18 cm l'anno.

Bibliografia

Cuffaro M., Doglioni C., (2015). *On the increasing size of the orogens moving from the Alps to the Himalayas in the frame of the net rotation of the lithosphere.* Gondwana Research, 62, 2-13. https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.09.008

Doglioni C., Panza G., (2015). *Chapter One - Polarized Plate Tectonics.* Advances in Geophysics, 56, 1-167. https://doi.org/10.1016/bs.agph.2014.12.001

Zaccagnino D., Vespe F., Doglioni C., (2020). *Tidal modulation of plate motions.* Earth-Science Reviews, 205,103179. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103179

I luoghi nascosti della Terra

Ilaria Isola

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa

Ogni angolo della Terra è stato esplorato, fotografato e misurato dall'uomo, se non direttamente, attraverso l'occhio infallibile dei satelliti. Una delle ultime possibilità di vedere luoghi inesplorati, di andare dove nessun essere umano ha ancora messo piede, è quella di scendere nelle profondità della Terra, in grotta.

Attualmente sono conosciuti solo una piccola parte dei chilometri e chilometri di gallerie, stretti cunicoli o sale enormi che esistono nel sottosuolo. Che siano percorsi da fiumi impetuosi o colmati dalle acque immobili di un lago, nel frastuono assordante di una cascata o nel silenzio interrotto soltanto dal ticchettio di goccioline di acqua che staccandosi dal soffitto cadono al suolo, le grotte, sono accomunate da una caratteristica fondamentale: il buio assoluto. Questo ne fa un ambiente non facile da affrontare, ma il cui studio può riservarci grandi sorprese.
La parola "grotta" deriva dalle parole latina Crypta e questa dal greco Krýptō che significa nascosto, coperto.

Diversi tipi di grotte

Grotte di origine vulcanica, possono formarsi da colate laviche. Le parti più esterne di un flusso lavico, a contatto con le rocce del substrato e con l'aria, raffreddando si solidificano, mentre la parte centrale del flusso, rimanendo più calda, continua a fluire verso il basso. Quando la spinta eruttiva cala, il tunnel di lava si svuota dando origine ad una grotta (lava tube, Figure 1 e 2).

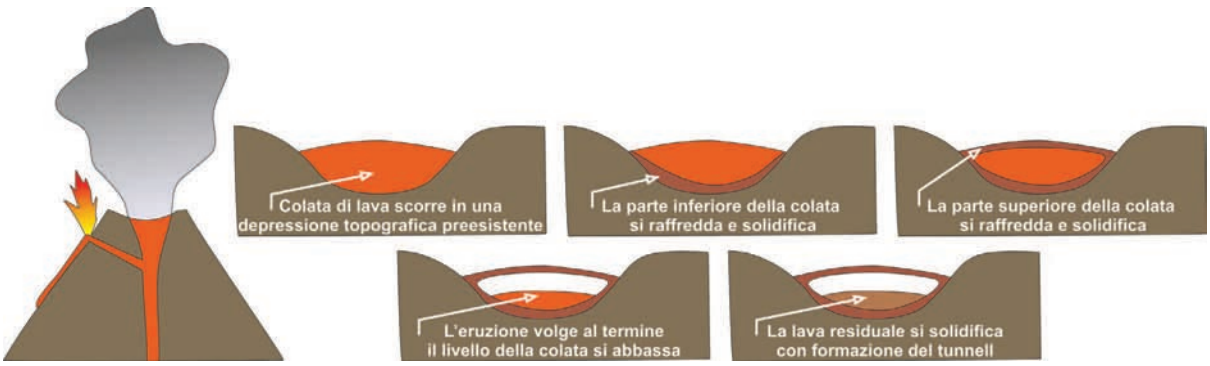


Figura 1 Schema semplificato della formazione di una grotta lavica. (Grafica di I. Isola)
***Figure 1** Simplified scheme of the formation of a lava tube. (Graphics by I. Isola)*

Grotte di origine marina, formate dall'azione erosiva del mare. Il moto ondoso battente su una falesia la erode, formando cavità lunghe fino a qualche decina di metri (Figure 3 e 4).
Le **grotte** più frequenti sono **di origine carsica.** Con la parola carsismo si indica un particolare processo chimico che permette all'acqua, arricchita di anidride carbonica, di aggredire e corrodere alcuni tipi di rocce, come gessi, calcari, marmi ecc. Le acque piovane assorbono questo gas durante il loro passaggio attraverso l'atmosfera, ma in modo particolare infiltrandosi



Figura 2 Galleria lavica, Monte Etna. (Foto di A. Roncioni)
Figure 2 *Lava tube, Mt. Etna. (Photo by A. Roncioni)*

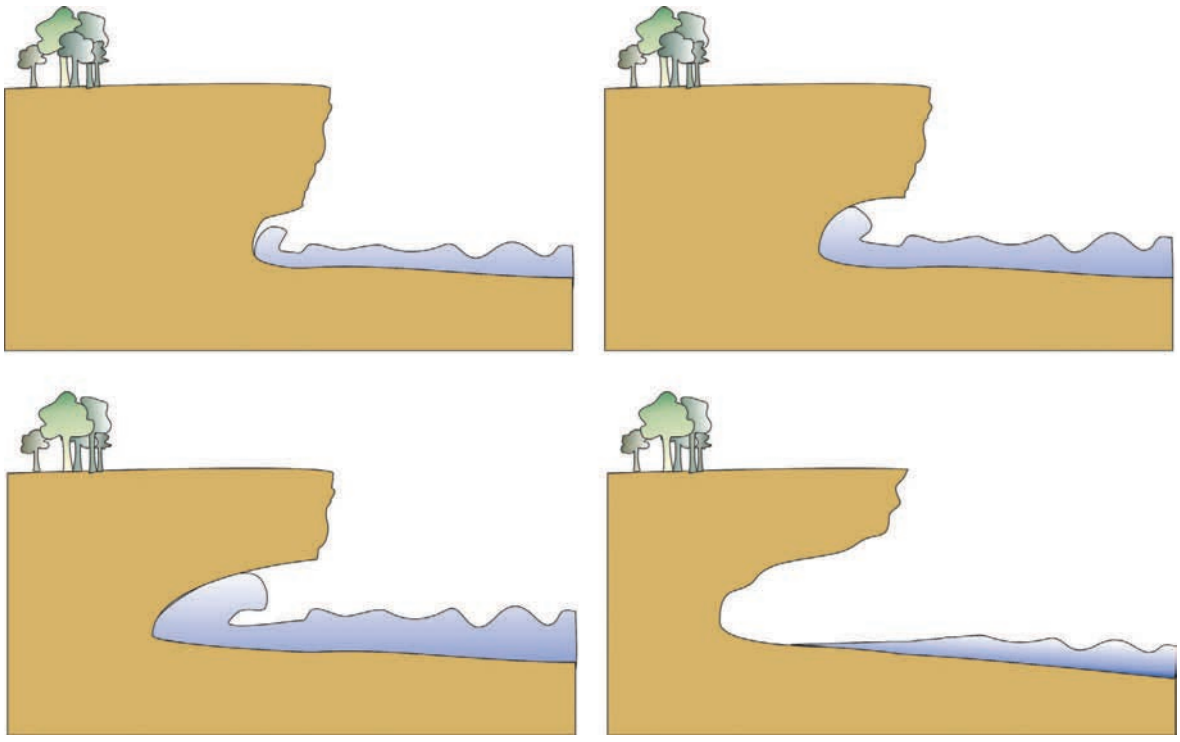


Figura 3 Schema semplificato dell'evoluzione di una grotta marina. (Grafica di I. Isola)
Figure 3 *Simplified scheme of the evolution of a sea cave. (Graphics by I. Isola)*

attraverso il suolo, ricco di anidride carbonica grazie ai processi di decomposizione delle sostanze organiche. Al di sotto dell'orizzonte di suolo le acque continuano il loro percorso verso il basso guidate dalla gravità, percorrendo il reticolo di fratture preesistente nella roccia e allargandolo per dissoluzione e\o erosione (Figura 5).



Figura 4 Ingresso di una grotta marina, Marina di Camerota. (Foto di I. Isola)
Figure 4 *Entrance of a sea cave, Marina di Camerota. (Photo by I. Isola)*

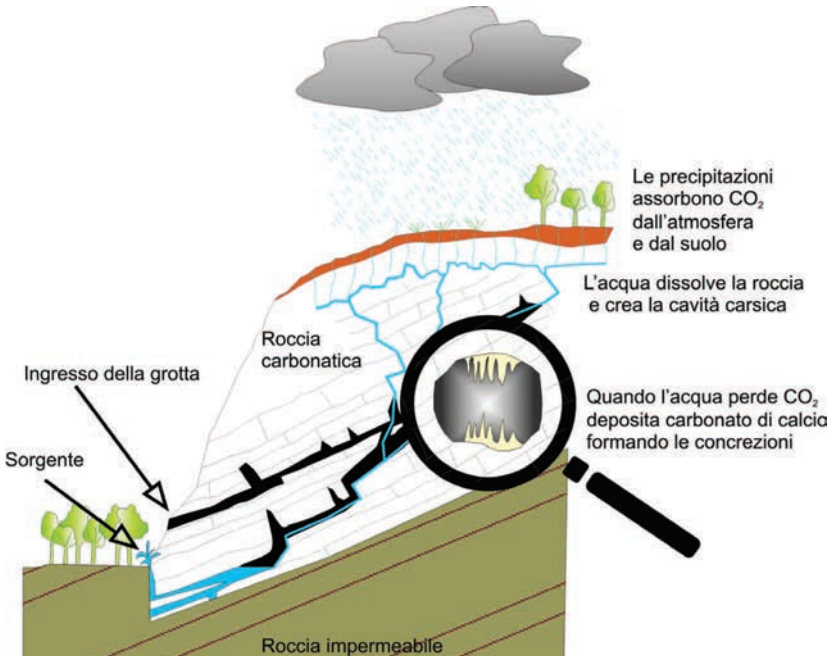


Figura 5 Schema semplificato della formazione di una grotta carsica. (Grafica di I. Isola)
Figure 5 *Simplified scheme of the formation of a karst cave. (Graphics by I. Isola)*

Con il tempo le piccole fratture vengono ampliate creando ambienti sempre più vasti in cui le acque circolanti possono riunirsi fino a formare veri e propri fiumi sotterranei. Questo processo può continuare per centinaia di migliaia, fino a milioni di anni e portare allo sviluppo di grotte lunghe decine e decine di chilometri.
I vuoti creati nella roccia dall'erosione possono essere di nuovo riempiti da sedimenti esterni trasportati dalle acque, dal vento, dai ghiacciai, oppure da massi crollati dalla volta e dalle pareti delle gallerie stesse, così come da concrezioni depositate dalle acque circolanti. Passando dal reticolo di fratture ad ambienti più ampi, l'acqua, che è stata in grado di corrodere la roccia ed è quindi carica di sali disciolti (essenzialmente bicarbonato di calcio), perde parte del contenuto di anidride carbonica. Le condizioni di equilibrio all'interno della soluzione cambiano, il bicarbonato disciolto viene deposto sotto forma di carbonato di calcio (calcite o aragonite) formando quelle spettacolari concrezioni che tutti conosciamo (Figura 6).



Figura 6 Cannule e concrezioni eccentriche, Antro del Corchia, Lucca. (Foto di I. Isola)
Figure 6 *Straw stalactites and helictite concretions, Antro del Corchia, Lucca. (Photo by I. Isola)*

L'ambiente sotterraneo è in continua trasformazione: da una parte le acque creano vuoti scavando nuove gallerie o aumentandone le dimensioni, dall'altra li riempiono con depositi detritici e concrezioni, ma questo avviene così lentamente da sembrare ai nostri occhi come statico ed immutabile.
Tutto ciò che, in un modo o in un altro, viene trasportato o si forma all'interno di una grotta, può essere preservato inalterato anche per centinaia di migliaia di anni. Possiamo trovare testimonianze di paesaggi esistiti in epoche geologiche passate, tracce di animali marini anche in grotte distanti dal mare, depositi glaciali dove i ghiacciai sono scomparsi da migliaia di anni. Evidenze di cambiamenti climatici con l'alternanza di periodi freddi o caldi, aridi o umidi sono registrate nelle concrezioni così come le tracce di grandi alluvioni. Le grotte sono state il primo rifugio dell'uomo, che le ha modificate, scolpite, dipinte lasciandoci testimonianze di antiche popolazioni scomparse da tempo che in questo ambiente così particolare si sono preservate fino ai giorni nostri (Figura 7).
Le grotte sono come un grande libro sulla storia della Terra e dell'uomo. Non ci resta che sfogliarne le pagine e cominciare a leggere.



Figura 7 Cueva de los Manos, Patagonia Argentina. (Foto di I. Isola)
Figure 7 *Cueva de los Manos, Patagonia Argentina. (Photo by I. Isola)*

Quando la vita comparve sulla Terra

Antonio Cascella

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Pisa

Studi geologici e della formazione dei pianeti suggeriscono che la Terra potesse essere abitabile tra 4,5 e 4,3 miliardi di anni fa. Le tracce più antiche della presenza di vita fino ad ora trovate risalgono a 3,7 miliardi di anni fa. Ma l'età del progenitore di tutte le cellule moderne è stata stimata a 4,29 miliardi di anni fa. E quindi?

La maggior parte delle vicende che riguardano la comparsa della vita sulla Terra si svolsero in un intervallo di tempo che va circa da 4,6 a 4,0 Ma, un eone della Scala dei Tempi Geologici, che i geologi hanno chiamato informalmente **Adeano** (dal greco Ade, "Inferi"). Gli studiosi ritengono che a quel tempo, a causa di un continuo bombardamento di asteroidi, la giovane Terra fosse più simile all'inferno: un oceano di magma e fuoco avvolto da una spessa atmosfera ricca di vapore.



Figura 1 Illustrazione dell'emissione di gas dalla superficie di un esopianeta terrestre. (Illustrazione di Dan Durda/Southwest Research Institute)

Figura 1 *The early atmospheres of rocky planets with gases released from the surface of the planet as a result of the intense heating during the accretion of planetary building blocks and later volcanic activity early in the planet's development. (Illustration By Dan Durda/Southwest Research Institute)*

Tuttavia, secondo scoperte e ricerche recenti questo primo periodo della storia della Terra viene sempre più considerato come "clemente e abitabile", rafforzando l'eventualità che il Pianeta potesse essere stato abitabile già subito dopo la sua formazione.

Studi sulla formazione dei pianeti, di geologia, paleontologia e biologia consentono di circoscrivere la comparsa della vita tra il momento in cui la Terra potesse essere già abitabile (a circa 4,5 o a 3,9 miliardi di anni) e l'età delle prime tracce che la vita lasciò nelle rocce sedimentarie (più di 3,7 miliardi di anni fa).

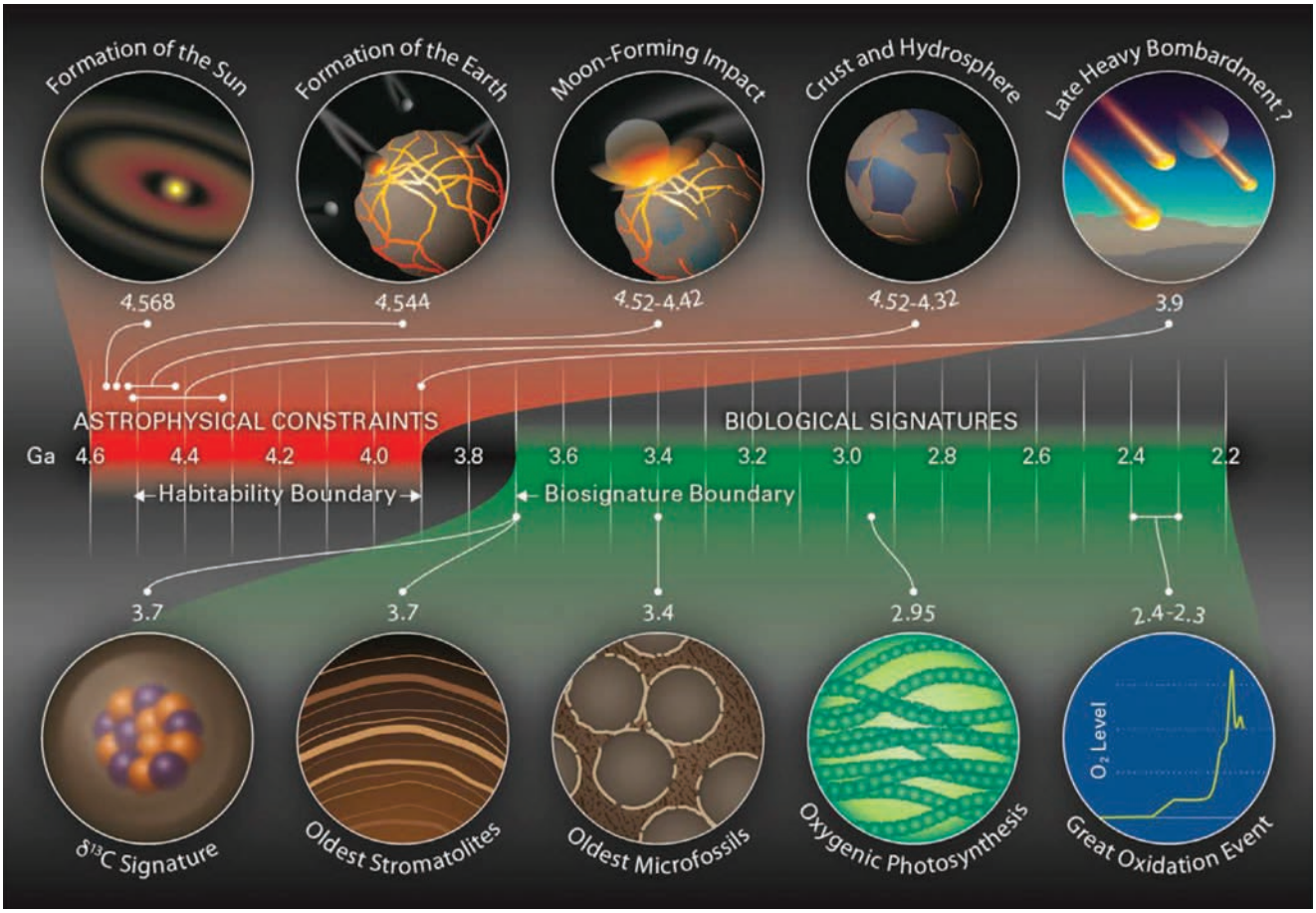


Figura 2 Cronologia degli eventi che vincolano il limite di abitabilità e delle tracce organiche che vincolano il limite biologico. (Pearce et al. [2018])
Figure 2 *Timeline which illustrates the astrophysical constraints constraining the time of the habitability boundary and the biological signatures constraining the time of the biosignature boundary. (Pearce et al. [2018])*

Come e quando il pianeta diventò abitabile

Per quanto si conosce fino ad ora, la vita può essere comparsa al più presto subito dopo la **formazione del pianeta,** stimata a circa 4,6 miliardi di anni fa, subito dopo la formazione del Sistema solare e del Sole.
Pochi milioni di anni dopo si verificò un evento tutt'altro che raro a quei tempi, quando proto-pianeti e frammenti di materia condensata si muovevano alla ricerca del proprio posto intorno al neonato Sole.
All'incirca tra 4,4 e 4,5 miliardi di anni fa, un asteroide grande come un pianeta (Theia) colpì la Terra strappandole via un brandello, che andò a formare il nostro satellite, la **Luna**.
L'energia liberata dall'impatto fuse e rimodellò il mantello del proto-pianeta, trasformando la superficie della Terra in **un oceano di magma**. Il successivo raffreddamento fece condensare il vapore acqueo presente in atmosfera, facendolo cadere come pioggia che andò a formare gli oceani in poche migliaia di anni.

È stato calcolato che il raffreddamento dell'oceano di magma sia potuto avvenire nel giro di 20.000 anni o 100 milioni di anni; la differenza di tempo dipende dai modelli utilizzati per il calcolo del trasferimento di calore del mantello.
Così più o meno a 4,3, o 4,5 miliardi di anni, verosimilmente la Terra può aver avuto una **crosta** più o meno stabile e soprattutto **acqua allo stato liquido**, cosa che avrebbe permesso di ospitare e far sviluppare la vita come la conosciamo.
Che la situazione potesse essere proprio così ce lo dice quel poco che di luccicante resta della **Terra Adeana**. Infatti, la composizione chimica di una manciata di microscopici **zirconi** di più di 4 miliardi di anni fa rinvenuti in rocce sedimentarie più giovani (3,7 Ma) affioranti in Australia Occidentale, confermerebbe la presenza di un **Oceano** Adeano e di massicci di **crosta continentale**, già 4,3 miliardi di anni fa.
Quindi sembra che i tempi per la comparsa della vita fossero maturi. Ma a complicare la faccenda, c'è un evento che è parte integrante della storia del nostro pianeta, noto come l'**ultimo intenso bombardamento** o, come dicono gli autori anglosassoni, il *Late Heavy Bombardment* (LHB). Una pioggia continua di meteoriti che a più riprese avrebbe fuso e rimodellato la superficie della giovane Terra, o parte di essa.

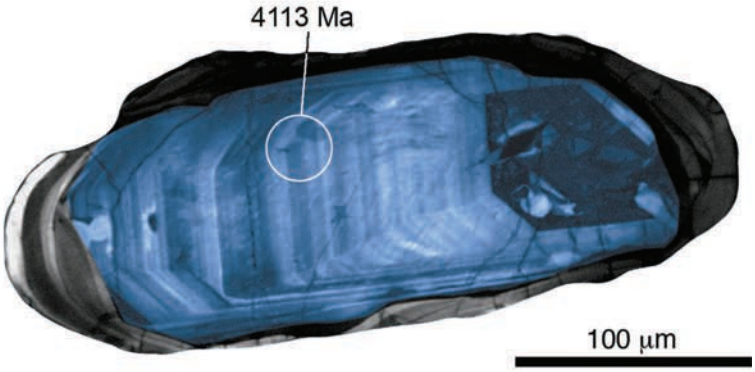


Figura 3 Fotografia al microscopio dello zircone ritrovato nelle rocce delle Jack Hills nell'Australia occidentale. (Crediti: Mary Diman and John Valley, UW-Madison)
Figure 3 *Pictured is a false-color microscope image of a 4-billion-year-old zircon, a tiny mineral used to study the ancient rocks in which it formed. (Credits: Mary Diman and John Valley, UW-Madison)*

Non è chiaro se si trattò di un unico evento avvenuto intorno a 3,9 miliardi di anni, che face evaporare quasi tutta l'acqua presente e sterilizzò la Terra da ogni tipo di vita precedente. Dopo questo evento il pianeta divenne abbastanza sicuro per permettere alla vita di mettere radici. Attualmente molti ricercatori sono propensi a credere che si trattò di una pioggia di meteoriti che andò esaurendosi "velocemente", in poche centinaia di milioni di anni dopo la formazione della Luna. Alcuni modelli suggeriscono che gli effetti distruttivi degli impatti sarebbero stati localizzati, permettendo la conservazione di ampie aree dove l'acqua poteva essere presente tra 4,3 e 4,5 miliardi di anni fa. Come del resto confermerebbero gli zirconi australiani. Pertanto, è concepibile che le prime forme di vita (quali?) potrebbero essere sopravvissute in nicchie stabili durante l'Adeano.

Tracce di vita

Una volta comparsa, la vita ha lasciato solide tracce della sua presenza nelle rocce sedimentarie. Le più antiche fino ad ora conosciute sono di 3,7 miliardi di anni fa. Queste sono state ritrovate in rocce di origine sedimentaria della Groenlandia occidentale.
In un caso si tratta di strutture di accrezione simili alle **Stromatoliti**, create da tappeti microalgali di microorganismi come i cianobatteri. In altri casi sono globuli di grafite e granuli di pirite la cui composizione chimica, in particolare i rapporti degli isotopi del carbonio e dello zolfo in essi

misurati, ha fatto ipotizzare l'esistenza di diversi microorganismi in grado di svolgere attività organica, probabilmente metanogenesi e fotosintesi, 3,7 miliardi di anni fa. Queste scoperte restano oggetto di un acceso dibattito circa la loro origine biologica. In parte perché coinvolgono alcune delle rocce della Terra geologicamente più stressate che hanno subito metamorfismo di alto grado che ha reso il contesto geologico difficile da interpretare. In parte perché ci sono processi inorganici capaci di produrre strutture simili a quelle create dall'attività di organismi viventi.

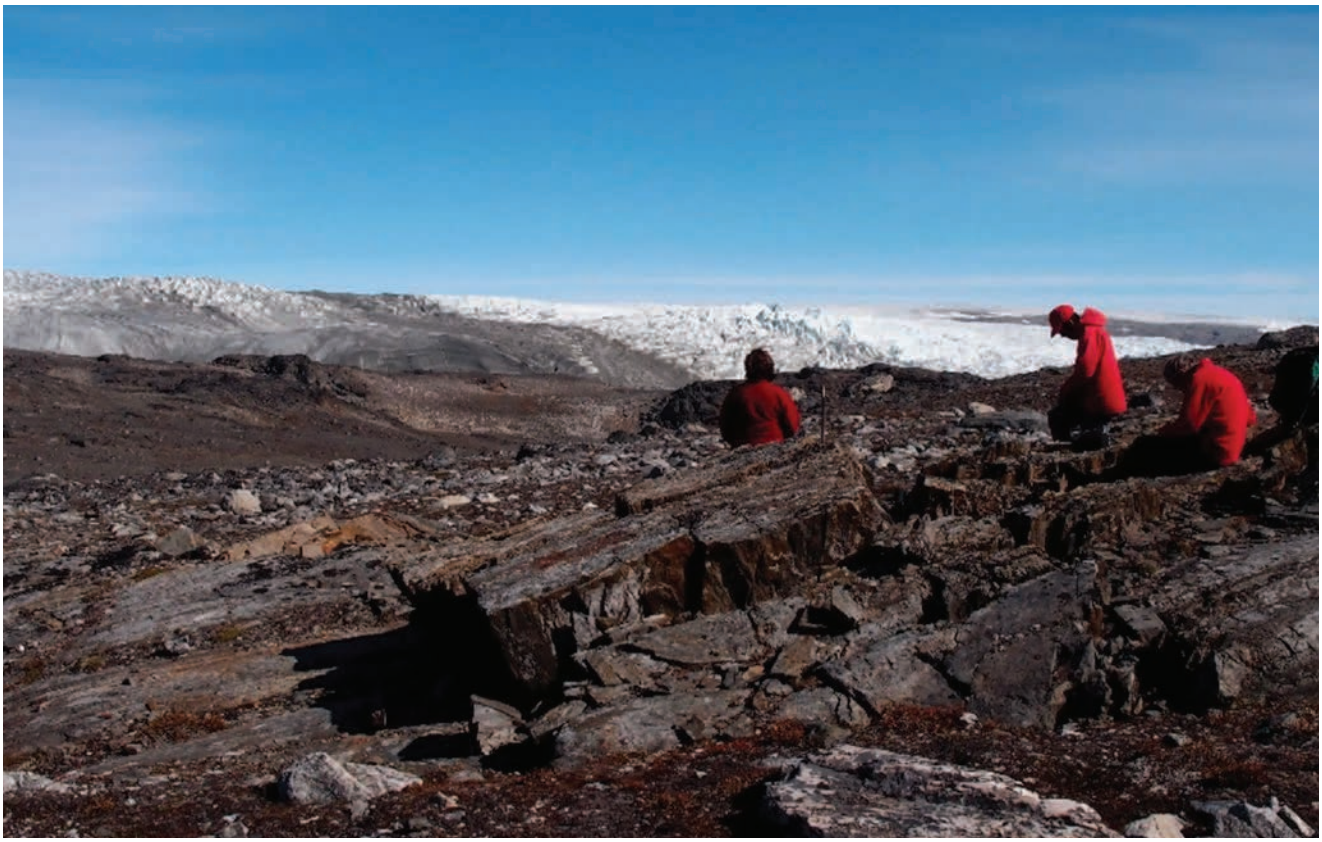


Figura 4 Esperti esaminano gli affioramenti delle rocce in Groenlandia dove sono state trovate le tracce di vita più antiche. (Foto di Laure Gauthiez/The Australian National University)
Figure 4 *Scientist examining ancient rocky outcrops in Greenland where they claim to have found fossil proof of the oldest life ever discovered. (Photo by Laure Gauthiez/The Australian National University)*

Altre prove che forniscono informazioni sui i primi passi dell'evoluzione della vita sul Pianeta, provengono da studi di filogenetica. Questi studi, ripercorrendo a ritroso la storia genetica degli organismi viventi, presuppongono un'età di quasi 4,3 miliardi di anni per la comparsa dell'ultimo antenato comune universale (**last universal common ancestor: LUCA**) – la cellula o il gruppo di cellule da cui discendono tutte le cellule moderne.
Questa età, anche se non basata su un vero e proprio metodo di datazione, sarebbe consistente con la stima di **una Terra abitabile dopo la formazione della Luna**, come suggerito dai modelli di formazione dei pianeti e dalla composizione chimica di quello che resta delle rocce di quel periodo.
La domanda fondamentale di quando la vita comparve sulla Terra continua a rimanere irrisolta. Forse il progresso delle tecnologie permetterà di scoprire tracce più antiche di 3,7 miliardi di anni fa. Ma allo stesso tempo, potrebbe accertare che quelle attualmente ritenute buone siano effettivamente l'opera di processi inorganici. È così che funziona la scienza.



Figura 5 Strutture di accrezione considerate le Stromatoliti fossili più antiche. (Da Nutman et al. [2016])
Figure 5 *Structures Preserved in Ancient Sedimentary Rocks Indicate the Presence of Colonial Bacteria, the oldest known fossils. (By Nutman et al. [2016])*

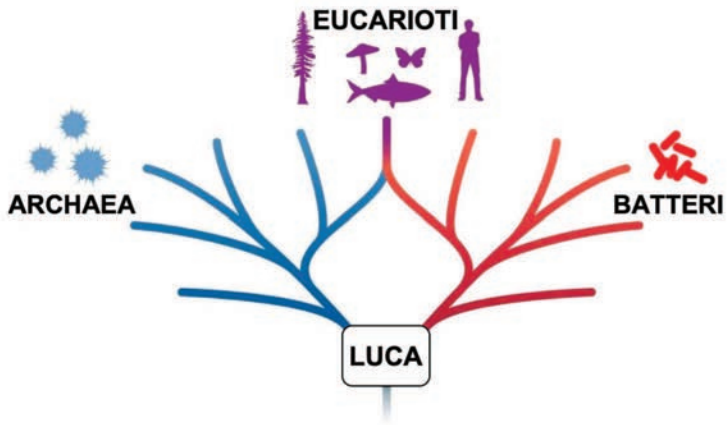


Figura 6 Rappresentazione dell'albero evolutivo a due domini con la posizione degli ultimi antenati comuni (https://www.newscientist.com/article/2098564-universal-ancestor-of-all-life-on-earth-was-only-half-alive/)
Figure 6 *Representation of two-domain tree of life with common ancestors (https://www.newscientist.com/article/2098564-universal-ancestor-of-all-life-on-earth-was-only-half-alive/)*

Bibliografia

Nutman A., Bennett V., Friend C.R.L., Van Kranendonk M.J., Chivas A.R., (2016). *Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures.* Nature, 537, 535–538. https://doi.org/10.1038/nature19355

Pearce B.K.D., Tupper A.S., Pudritz R.E., Higgs P.G., (2018). *Constraining the Time Interval for the Origin of Life on Earth.* Astrobiology, 18(3), 343-364. https://doi.org/10.1089/ast.2017.1674

Weiss M.C., Sousa F.L., Mrnjavac N., Neukirchen S., Roettger M., Nelson-Sathi S., Martin W.F., (2016). *The physiology and habitat of the last universal common ancestor.* Nat Microbiol, 1, 16116. https://doi.org/10.1038/nmicrobiol.2016.116

Strabone, Plinio e il mistero delle isole scomparse

Michele Caputo[1] e Adriano Nardi[2]

[1]Università La Sapienza | Dipartimento di Fisica (docente di Sismologia in pensione)
[2]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

Quando Strabone visitò la nostra penisola, negli ultimi anni dell'era a.C., descrisse due isole che oggi non conosciamo. Quanto è affidabile il suo racconto? In effetti, sia dal punto di vista storico che scientifico, sembra davvero possibile che possa aver visto delle isole oggi scomparse.

Un geografo di 2.000 anni fa

Strabone era un erudito greco vissuto in età *augustea*, a cavallo dell'anno 0. Fu un grande studioso di storia, filosofia e geografia e la sua opera più nota oggi, anche perché è l'unica che ci è pervenuta quasi interamente, è intitolata proprio *Geografia*. Questo trattato di 17 libri in lingua greca è considerato oggi una risorsa fondamentale per lo studio della storiografia greca e romana, grazie ai suoi numerosissimi riferimenti storici e alla precisione dei riferimenti *toponomastici* (riguardanti cioè l'esatta denominazione dei luoghi geografici). Malgrado il suo zelo, quando Strabone descrive la penisola italiana (libri V e VI) troviamo una testimonianza sconcertante: delle isole che noi oggi non conosciamo.

Due isole di fronte a Capo Palinuro

Nel libro VI della Geografia (1-3: La Lucania) Strabone ci descrive la costa campana procedendo verso sud. Citiamo testualmente:
«Dopo Elea c'è il promontorio di Palinuro. Di fronte al territorio di Elea ci sono le due isole Enotridi, che hanno ciascuna un ormeggio».
Palinuro è un promontorio noto ancora oggi con questo nome. Sappiamo che la città di **Elea** esistette davvero. Fu una famosa *polis* della Magna Grecia che venne chiamata **Velia** in epoca romana, poco lontano dall'attuale Ascea, in provincia di Salerno. Di quelle isole però non c'è traccia ai nostri giorni.
In epoca poco successiva a quella di Strabone (comunque dopo Cristo), di queste isole parla anche **Plinio il Vecchio** nella sua *Storia Naturale*. Il libro III (Geografia del Mediterraneo occidentale, 85) le colloca proprio *«contra Veliam»*, in latino, ovvero di fronte alla città di Velia (la Elea di Strabone). Ci fornisce anche i rispettivi nomi di *Isacia* e *Pontia*.
Ma allora, perché oggi queste isole non ci sono?

Tre ipotesi per un mistero

Quello costiero è un ambiente estremamente mutevole. Molti commentatori moderni di questi testi storici ipotizzano che la scomparsa delle isole sia stata causata da un **avanzamento della costa** prodotto dal materiale sedimentato dai fiumi Alento, Palistro e Fiumarella. Sono certamente già accaduti fenomeni geologici simili in importanti siti archeologici. Basti pensare al porto di Ostia Antica, che oggi è nell'entroterra laziale a causa dell'avanzamento della foce del Tevere.

Anche se la linea di costa è probabilmente avanzata per diverse centinaia di metri, osservando la morfologia dell'area costiera antistante la zona archeologica di Velia non troviamo oggi rilievi che potessero un tempo affiorare come isole rispetto all'attuale livello del mare. L'unico è quello dell'acropoli stessa di Velia, che un tempo era appunto un promontorio sul mare. Inoltre, sia a nord che a sud di Velia, ci sono coste alte che non sono compatibili con questa spiegazione. Si potrebbe allora ipotizzare un fenomeno di **regressione marina** indipendentemente dalla sedimentazione fluviale, dovuta cioè a cause tettoniche. Tuttavia, questi altri fenomeni geologici avvengono in archi di tempo molto lunghi che li rendono difficilmente osservabili in tempi storici. Non possiamo però non accorgerci di una coincidenza straordinaria. Palinuro non è soltanto lo storico nome del promontorio lucano ma oggi è anche il nome di uno dei **tre grandi vulcani attivi** sottomarini del mar Tirreno, quello recentemente [Cocchi et al., 2017] oggetto di una ricerca internazionale di cui è partecipe anche l'INGV. Gli altri vulcani già noti erano il **Marsili** [1] e il **Vavilov**. Il Palinuro [2] è un complesso vulcanico composto da otto edifici distribuiti in direzione est-ovest proprio di fronte a Capo Palinuro e all'antica città di Velia (Figura 1).

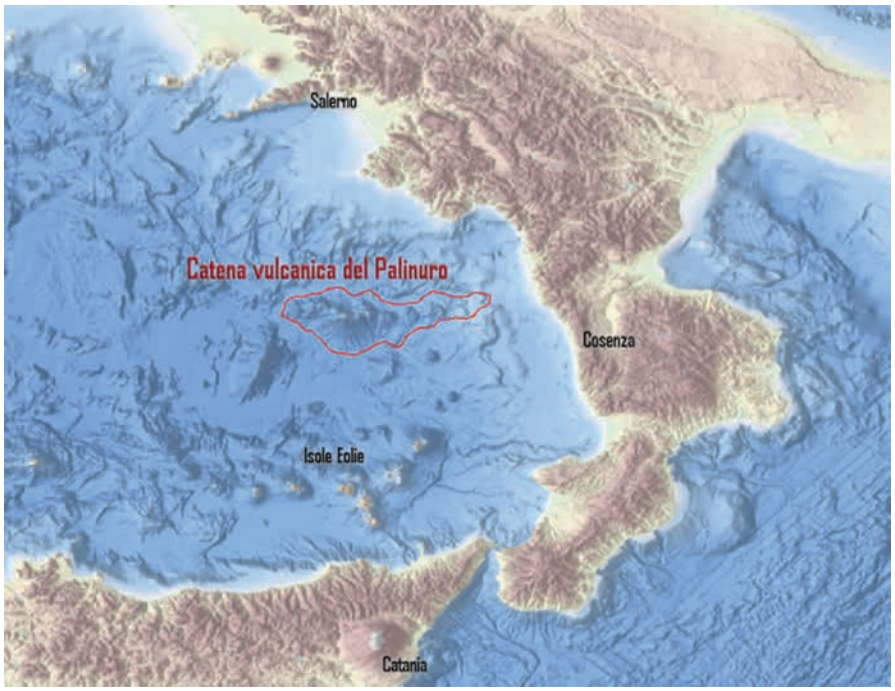


Figura 1 Ubicazione della catena vulcanica del Palinuro. Le frecce indicano in rosso le cime maggiori del vulcano Palinuro, in blu Capo Palinuro e in verde la posizione dell'antica città di Velia (Elea, per i greci). (Crediti INGV)
Figure 1 *Location of Palinuro volcanic chain. Arrows indicate in red the highest peaks of the Palinuro volcano, in blue Cape Palinuro and in green the position of the ancient city of Velia (Elea city, for the Greeks). (Credits INGV)*

Le cime principali del Palinuro sono proprio due e raggiungono oggi i 70 m sotto il livello del mare (Figura 2). Potrebbero quasi essere avvistate da un sub. **È possibile che in tempi storici le due cime fossero state emerse?** Questo non possiamo provarlo, ma possiamo almeno sostenere che ciò non sia impossibile. La nostra penisola è talmente attiva dal punto di vista vulcanico che la storia d'Italia riporta già due casi documentati attinenti alla nostra ipotesi: l'Isola Ferdinandea [3] e il Monte Nuovo [4] (anche se quest'ultimo non è un'isola).

Quando la realtà supera la leggenda

Nel 1538, a Pozzuoli, il suolo si sollevò repentinamente di molti metri e il mare si ritirò creando nuove terre. Il sollevamento del suolo, accompagnato da intensa sismicità, precedeva l'inizio di una nuova eruzione che formò, nell'arco di una sola settimana, un monte alto 133 m s.l.m. Non per niente prese il nome di Monte Nuovo. Fu in realtà l'ultima eruzione avvenuta all'interno della *caldera Flegrea* [7]. L'unica in epoca storica.

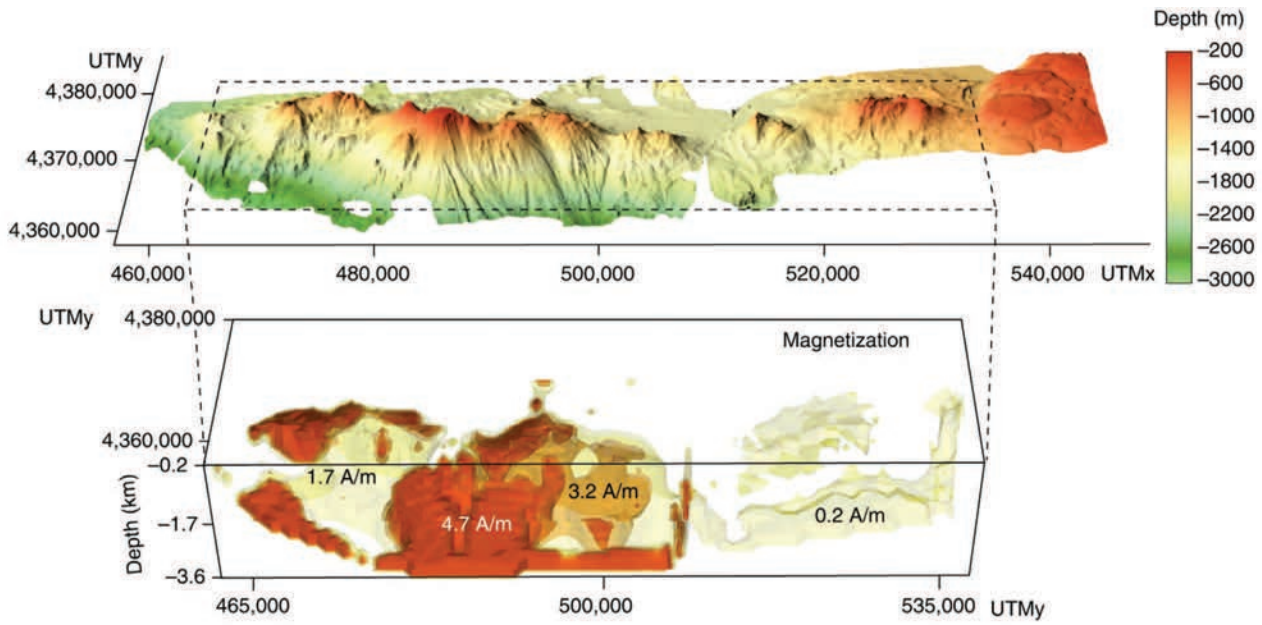


Figura 2 Ricostruzione 3D della catena vulcanica di Palinuro (3D reconstruction of the Palinuro submarine volcano [5]). I due edifici più alti (quelli con la cima rossa) potevano essere stati le isole di Strabone? Nel comunicato "Una famiglia di vulcani nel Mar Tirreno [6]", gli autori stessi affermano: "Questi vulcani sono stati attivi sicuramente tra 300.000 e 800.000 anni fa, ma non è da escludere che siano stati attivi in tempi più recenti".
Figure 2 *3D reconstruction of the Palinuro volcanic mountain range (3D reconstruction of the Palinuro submarine volcano [5]). Could the two highest mountains (red peaks) have been Strabo's islands? In the press release "A family of volcanoes in the Tyrrhenian Sea [6]", the authors state: "These volcanoes were certainly active between 300.000 and 800.000 years ago, but it cannot be excluded that they were also active in more recent times".*

L'isola Ferdinandea [3] invece venne alla luce nel Canale di Sicilia come uno scoglio fumante. Era in realtà un vulcano sottomarino che nell'arco di 6 settimane divenne un'isola con un perimetro di quasi 1 km e un'altezza di 65 m s.l.m. Era il 1831 e l'evento fece quasi scoppiare una guerra tra l'Inghilterra, la Francia e il Regno delle due Sicilie, che subito si contesero la sovranità su questa nuova terra. Il problema politico si risolse da sé, perché così come era apparsa, tra botti e scintille, l'isola scomparve di nuovo nell'arco di altri 4 mesi. Oggi ne resta una *secca* a 7 m di profondità che sulle carte nautiche è riportata col nome di "Banco di Graham" [8]. Si tratta del più alto dei 9 edifici del complesso sottomarino noto come vulcano Empedocle, che ha avuto diversi episodi di emersione a partire almeno dal 10 a.C. Dall'ultima emersione ad oggi, il dislivello massimo ha superato i 70 m. Infine si potrebbe citare il caso recente del vulcano sottomarino giapponese Fukutoku-Okanoba. Situato presso Iwo Jima, la sua attività ha fatto nascere una nuova isola riportando alla luce i relitti di 24 navi nipponiche affondate durante la Seconda Guerra Mondiale, nel corso della famosa omonima battaglia (Figura 3).
In prima analisi, dunque, non è impossibile che le isole scomparse di Plinio e Strabone potessero essere due cime temporaneamente emerse di un vulcano sottomarino, vista la provvidenziale scoperta del Palinuro. Tuttavia, questa è al momento soltanto una suggestiva ipotesi che va verificata. Della città di Velia oggi resta un'area archeologica situata nel comune di Ascea, in provincia di Salerno, nel Parco Nazionale del Cilento. In attesa di scoprire di più su questo mistero, sarà comunque affascinante, andando in visita al parco e al promontorio di Palinuro, guardare il mare immaginando quelle due isole che un erudito greco descrisse per noi più di 2.000 anni fa. Non sarebbe nemmeno una cattiva idea per il turismo italiano, che è solidamente fondato su storia e paesaggi, il consiglio di portare sempre in tasca una copia della *Geografia* di Strabone, per poterci confrontare, strada facendo, con lo scenario del mondo come era stato intorno all'anno 0.



Figura 3 Le navi giapponesi emerse sulla spiaggia di una nuova isola vulcanica presso Iwo Jima. (Crediti Mainichi/Kentaro Ikushima)

Figure 3 *Japanese ships surfaced on the beach of a new volcanic island near Iwo Jima. (Credits Mainichi/Kentaro Ikushima)*

Bibliografia

Gaio Plinio Secondo, *Storia Naturale Vol. I*, (1982). Cosmologia e geografia (libri I-VI), con testo latino a fronte. A cura di Gian Biagio Conte con la collaborazione di Alessandro Barchiesi e Giuliano Ranucci. Einaudi, pp. 847.

Cocchi L., Passaro S., Tontini F.C. & Ventura G. (2017). *Volcanism in slab tear faults is larger than in island-arcs and back-arcs*, Nat Commun, 8, 1451. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01626-w

Strabone, (1988). *Geografia (l'Italia, libri V e VI)*, con testo greco a fronte. A cura di A.M. Biraschi. Rizzoli BUR, pp. 352.

Sitografia

[1] https://ingvvulcani.com/marsili/

[2] https://ingvambiente.com/2020/06/24/i-preziosi-vulcani-del-mar-tirreno-il-marsili-e-il-palinuro/

[3] https://ingvvulcani.com/2020/01/27/cera-una-volta-lisola-ferdinandea/

[4] https://ingvvulcani.com/2019/11/15/storia-del-monte-nuovo-lultima-eruzione-dei-campi-flegrei/

[5] https://youtu.be/ZUvxG5rgUTY

[6] https://www.ingv.it/it/stampa-e-urp/stampa/comunicati-stampa/2831-una-famiglia-di-vulcani-nel-mar-tirreno

[7] https://ingvvulcani.com/campi-flegrei/

[8] https://www.marina.difesa.it/noi-siamo-la-marina/pilastro-logistico/scientifici/idrografico/cosafacciamo/Pagine/BancodiGraham.aspx

Non siamo tutti uguali davanti ai cambiamenti climatici

Giuliana Rubbia[1] e Anita Grezio[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Milano
[2]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Bologna

Gli effetti dei cambiamenti climatici non sono uguali per tutti, e le donne possono essere tra i soggetti più colpiti. Allo stesso tempo possono però contribuire a superare le crisi e ad aumentare la resilienza delle comunità.

Di fronte a una inondazione o a un incendio è ormai assodato che non reagiamo tutti allo stesso modo. Nell'analizzare l'**impatto sociale dei fenomeni naturali**, gli studi più recenti considerano anche le caratteristiche biologiche e i comportamenti dettati dalla società e dal contesto culturale, che variano nel corso del tempo e da paese a paese.
È importante poter riflettere su queste diversità, collegate al **sesso per gli aspetti biologici** e al **genere degli individui per i comportamenti.** Fattori importanti questi quando si analizzano ad esempio gli effetti dei fenomeni sulla salute, l'accesso all'informazione o la percezione di rischi di varia natura.
Sono riflessioni che molto spesso nascono nell'ambito di **progetti multidisciplinari.** In questo ambito il team è generalmente costituito da persone specializzate in diverse discipline, tra le quali la sociologia. Mediante **interviste e questionari** mirati si indaga la risposta della società, per trarre spunto da quanto è successo e sviluppare azioni future di mitigazione.

Qualche esempio

A seguito della grande alluvione che sconvolse la **Serbia nel 2014**, sono state realizzate migliaia di interviste per mettere in luce eventuali **differenze**. Gli **uomini** avevano la percezione di essere più preparati e più attivi o più disposti a essere coinvolti o guidati da attività a livello di comunità. Le **donne**, generalmente, riferivano di essere meno sicure di sé, avendo forse opinioni più realistiche circa l'essere preparate. Riportavano inoltre una maggiore cura e preoccupazione sui comportamenti da tenere a livello domestico e familiare.
Interviste e questionari hanno messo in luce i **comportamenti diversificati** della popolazione anche in occasione degli **incendi boschivi** che colpirono gravemente la regione **Victoria in Australia** nel febbraio **2009**. Le differenze nelle preoccupazioni e soprattutto nelle decisioni, se andare, oppure rimanere a difendere casa e proprietà, si delinearono in modo diverso. Gli uomini hanno testimoniato di voler restare, le donne di andare. Non è però il caso di generalizzare e identificare "restare" come risposta maschile e "andarsene" come risposta femminile. Infatti, come ci sono state donne che esprimevano un forte desiderio di partire, ce ne sono state altre decise a restare, e viceversa per gli uomini. Inoltre, sono stati identificati casi di disaccordo, il più delle volte derivanti dalla riluttanza degli uomini ad andarsene e casi più evidenti nelle famiglie che non avevano adeguatamente pianificato o discusso i comportamenti previsti in queste situazioni.
Uno studio sull'incendio del villaggio turistico di **Mati in Grecia** nel luglio **2018** riporta che "*l'accesso alla spiaggia era difficile a causa dei ripidi pendii della costa nella parte orientale della zona. Di conseguenza, le persone hanno avuto difficoltà ad avvicinarsi alla costa, per raggiungere un ambiente più sicuro. Alcune donne più anziane conoscevano la strada. Sfortunatamente, nel panico, nessuno le ascoltava e le persone rimanevano in attesa di essere guidate dagli uomini. Questo ha comportato una fine più tragica, con conseguente perdita di più vite.*"

Il Programma Ambiente delle Nazioni Unite (UNEP, 2022 [1]) suggerisce esplicitamente di **raccogliere dati e informazioni sulla dimensione di genere**:
"*le ricerche indicano che donne e uomini hanno approcci diversi agli incendi, sia per quanto riguarda la percezione del rischio che per i processi decisionali*".

Le reazioni al cambiamento climatico

Gli effetti del caldo estremo, in gran parte causato dal cambiamento climatico, possono incidere fortemente sulla salute umana perché riducono la concentrazione e rallentano il pensiero, indeboliscono la coordinazione occhio-mano e inducono mal di testa e affaticamento, contribuendo anche alla perdita di produttività. A tutto ciò bisogna aggiungere cure extra associate alle malattie legate al caldo. Ricerche recenti dimostrano che **le donne vivono l'impatto del caldo estremo in modo diverso rispetto agli uomini** a causa delle differenze nella termoregolazione corporea, soffrendo di maggiore mortalità, infortuni e, per la loro specificità, aumento della probabilità di aborti. Inoltre, la partecipazione delle donne nei ruoli decisionali, come la gestione per la mitigazione degli **effetti del cambiamento climatico**, **continua ad essere ancora significativamente più bassa di quella degli uomini.** In particolare in Asia e nelle regioni del Pacifico i collegamenti tra la disuguaglianza di genere, il cambiamento climatico e l'impatto dei disastri naturali sono sempre più riconosciuti, così come gli effetti sproporzionati del COVID-19 che hanno colpito le donne con l'aumento di lavoro non pagato e la perdita di posti di lavoro insieme all'impennata di violenza di genere.
Anche la memoria storica ha un ruolo cruciale. Da una ricerca che mette a confronto due paesi, Italia e Svezia, riguardo la percezione di rischi di varia natura quali epidemie, inondazioni, siccità, incendi, terremoti, attentati terroristici, violenza domestica, crisi economiche e cambiamento climatico, emerge una percezione del rischio che è maggiore se i fenomeni sono nella memoria recente. Riguardo al genere e all'età, l'**essere uomo e più anziano** è stato generalmente associato a probabilità e impatto percepiti in misura minore.
Nell'**area campana** che è densamente popolata ed esposta a molteplici fenomeni idrogeologici, quali alluvioni e frane, sismi ed eruzioni vulcaniche, sono state analizzate le risposte di un campione di popolazione sulla percezione dei diversi rischi. Ne risulta che la conoscenza di questi fenomeni da parte di uomini e donne si presenta simile nelle varie località, con gli uomini che tendono ad avere valori più alti di sicurezza.

Ulteriori studi sono necessari

Fare più ricerca sui ruoli di genere dovrebbe essere una priorità anche per i ricercatori e i professionisti della gestione delle emergenze. Risulta importante evidenziare le differenze di genere [2] in relazione a percezione, preparazione e risposta ai disastri naturali anche in contesti socio-culturali ed economici diversi. È necessario mettere in luce che la percezione del rischio è influenzata dal genere. Questa influenza può variare a seconda del contesto, dello studio, del paese, del tipo di rischio e può produrre risultati anche contraddittori.
L'importanza di azioni che riducono la **disuguaglianza di genere riguardo agli impatti dei cambiamenti climatici e alla gestione dei loro effetti** è stata riconosciuta in contesti globali e regionali. Ci sono ancora poche leggi nazionali e politiche direttamente collegate agli impegni sul clima, i rischi naturali e la costruzione di resilienza.
In definitiva, la comprensione in ottica di genere della percezione del rischio, e più in generale di tutte le fasi legate all'impatto di un fenomeno [3], potrà aiutare i decisori politici a sviluppare approcci più efficaci per ottimizzare la sicurezza per tutte le componenti della società.



Figura 1 E' importante riconoscere tutte le diverse componenti della popolazione nella comunicazione sui rischi naturali. (Grafica Isabella Mila Emiliani)
Figure 1 *It is important to recognize all the different components of a population when communicating about natural hazards. (Graphics by Isabella Mila Emiliani)*

L'ambito delle Scienze della Terra

Nell'ambito delle **Scienze della Terra** molti studi sui rischi naturali e il loro impatto potranno essere approfonditi in modo da includere una prospettiva di genere e valorizzare le interazioni tra scienza e società.
Su questi temi l'**INGV** ha finanziato il progetto di ricerca libera **DiGeST – Dimensioni di Genere nelle Scienze delle Terra**, per comprendere le questioni di genere in un quadro più ampio. La parità di genere è lungi dall'essere raggiunta nei settori cosiddetti STEM – Scienza, Tecnologia, Ingegneria e Matematica. **Le donne nelle Scienze della Terra rimangono ancora sottorappresentate** [4], anche se negli ultimi decenni si riconoscono tendenze positive. Affrontare le **disuguaglianze di genere nel mondo accademico**, tuttavia, **è solo una parte del problema.**



Figura 2 Gli effetti dei rischi naturali possono risultare differenti sulla popolazione in relazione al sesso e al genere. (Grafica: Isabella Mila Emiliani)
Figure 2 *Natural hazards' impacts can be different on the population according to the sex and gender. (Graphics by Isabella Mila Emiliani)*

Le Scienze della Terra hanno bisogno di più donne nelle posizioni di leadership e nei comitati decisionali e più ragazze istruite in questo campo. Allo stesso modo ci sono ragioni fondate per gli scienziati per prestare attenzione al genere in un senso più ampio. Secondo le Nazioni Unite è

stata prestata un'attenzione ancora inadeguata ai modi in cui le disuguaglianze di genere nella società determinano i rischi e gli impatti degli eventi naturali. Anche in questo settore è necessario ampliare la prospettiva di genere. Lo sforzo è quello di migliorare la sotto-rappresentazione sul posto di lavoro tenendo conto dell'abbattimento delle barriere nelle carriere di ricerca e dell'inclusione del genere nei contenuti della ricerca e dell'educazione in senso più ampio.

Comprendere come le relazioni di genere modellino la vita delle donne e degli uomini è fondamentale per la riduzione del rischio. Le recenti tendenze suggeriscono di andare oltre la polarizzazione maschile/femminile, tenendo conto del sesso e del genere delle minoranze e di *decolonizzare* la conoscenza. Questo significa legittimare e integrare tutte le fonti di conoscenza, sostenendo sempre una condivisione più inclusiva tra i diversi attori e studiosi/e indipendentemente dalla loro etnia, genere, e condizioni socioeconomiche.

Bibliografia

Asian Development Bank (2023). *Women's Resilience: How Laws and Policies Promote Gender Equality in Climate Change and Disaster Risk Management in Asia and the Pacific*. ADB BRIEFS 252 BRF230278-2. http://dx.doi.org/10.22617/BRF230278-2.

Avveduto S., Avellis G., Rubbia G. (2022). *La presidenza italiana del G20, attività, iniziative e proposte di Women20*. In: Sveva Avveduto (a cura di). Eppur si muove. Nuovi e rinnovati impegni per la parità di genere. Roma: CNR Edizioni 2022. https://doi.org/10.14600/978-88-8080-276-1.11-43

Rubbia G. (2022). *Natural hazards and earthquake science: Gender matters*. Front. Earth Sci., 10, 1033321. https://doi.org/10.3389/feart.2022.1033321

Rubbia G. (2022). *Did you know? Genere e rischi naturali*. In: Sveva Avveduto (a cura di). Eppur si muove. Nuovi e rinnovati impegni per la parità di genere. Roma: CNR Edizioni 2022. https://doi.org/10.14600/978-88-8080-276-1. pp.93-103.

Rubbia G. (2024). Divari di genere nelle scienze della terra: il cammino è ancora lungo. https://economiacircolare.com/scienze-della-terra-divari-di-genere-donne/

United Nations Environment Programme (2022). *Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi.* https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires.

UNDRR (2023). *The Report of the Midterm Review of the Implementation of the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. UNDRR: Geneva, Switzerland, 118. https://www.undrr.org/publication/report-midterm-review-implementation-sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

Sitografia

[1] https://www.unep.org/resources/report/spreading-wildfire-rising-threat-extraordinary-landscape-fires

[2] https://wrd.unwomen.org/sites/default/files/2022-03/Gender-Guidance-for-MTR%20%281%29.pdf

[3]https://sendaiframework-mtr.undrr.org/reports-midterm-review-implementation-sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

[4] https://economiacircolare.com/scienze-della-terra-divari-di-genere-donne/

FUOCO

Attività solare: quanto influenza il clima terrestre?

Fabio Giannattasio

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sezione Roma 2

Quanto sarà "caldo" quest'anno? E il prossimo? E quello dopo ancora? Sarà mediamente più caldo o più freddo del precedente? E se è vero che gran parte dell'energia che la Terra riceve trae origine dal Sole, possiamo prevedere l'andamento medio della temperatura terrestre una volta fatta una previsione dell'intensità dell'attività solare?

Con un flusso di energia di circa 1.360 W/m^2, il Sole è la principale fonte energetica del nostro pianeta; influenza le proprietà fisiche della nostra atmosfera, ne varia la sua stessa composizione. Per capire questi numeri pensiamo che, in meno di un'ora, la Terra riceve dal sole una quantità di energia pari all'intero consumo umano mondiale di un anno. Tale energia non è esattamente costante, ma varia leggermente in funzione dell'attività solare (dell'1 per mille su scala undecennale). È dunque lecito aspettarsi che più intensa è l'attività del Sole maggiore è l'energia ricevuta dalla Terra e, di conseguenza, maggiore anche la sua temperatura media?
In realtà, **ridurre ad un rapporto 1:1 la relazione tra attività solare e clima terrestre è un pericoloso errore,** che potrebbe comportare conseguenze catastrofiche. Vediamo perché.

L'attività solare

Uno dei parametri storicamente più utilizzati per monitorare l'attività solare è la variazione nel tempo del numero di macchie solari, già osservate con il telescopio dai tempi di Galileo (primi del XVII secolo). Maggiore è tale numero, maggiore è l'attività solare.

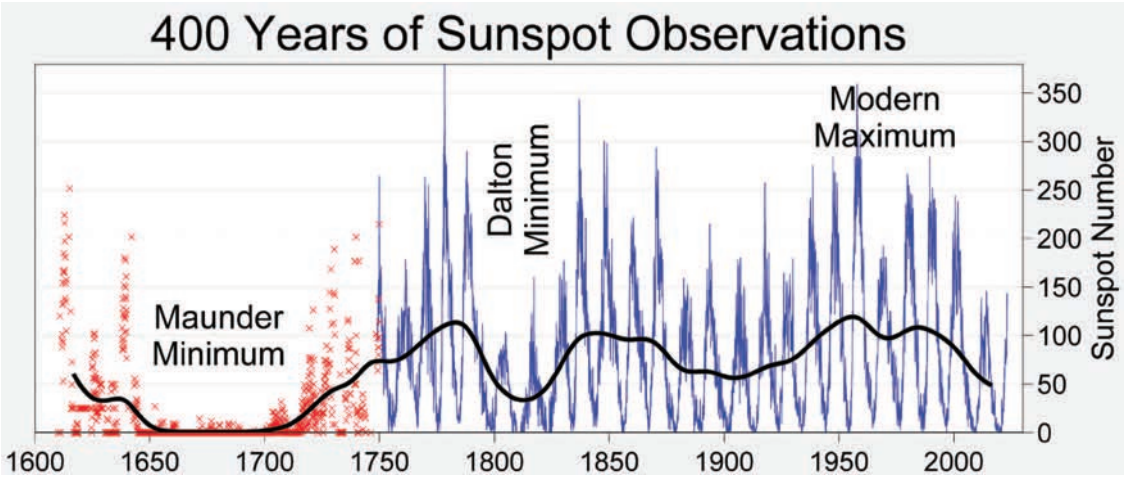


Figura 1 Medie mensili del numero di macchie sul disco solare. (Fonte: Wikimedia Commons/Global Warming Art)
***Figure 1** Monthly averages of the sunspots number on the solar disk. (From: Wikimedia Commons/Global Warming Art)*

L'andamento del numero delle macchie dai tempi di Galileo ad oggi mostra una alternanza di picchi (massimi) e avvallamenti (minimi) con periodicità di circa 11 anni, testimoniando la grande variabilità dell'attività solare nel tempo. Tra i periodi più rilevanti è da annoverare il grande

Minimo di Maunder, un periodo di minimo prolungato tra il 1645 e il 1715 in cui il numero di macchie solari osservate fu insolitamente basso; il *Minimo di Dalton* tra il 1790 e il 1830 circa; il cosiddetto *Modern Maximum*, un periodo di attività solare relativamente alta tra il 1914 e il 2000. L'ultimo ciclo solare, il ciclo solare 24, è terminato nel 2019 (è in corso il ciclo 25) ed è risultato essere nettamente più basso dei precedenti, il più basso dal Minimo di Dalton.

La temperatura sulla Terra in questi periodi di minimo di attività solare è diminuita?

Il minimo di Maunder e il clima

Durante il *Minimo di Maunder*, il più "estremo" mai osservato, le temperature in quasi tutto l'emisfero Nord in effetti diminuirono sensibilmente. Secondo alcuni modelli climatologici la temperatura in quel periodo fu fino a circa un grado più bassa di quella relativa ad un periodo di normale attività solare. Può sembrare una piccola variazione, ma si registrarono, ad esempio, l'espansione dei ghiacciai alpini fino a valle, la presenza di ghiaccio marino a Sud dell'Artico, la copertura di ghiaccio dei canali dei Paesi Bassi, e così via. Quel prolungato irrigidimento delle temperature provocò ingenti danni ai raccolti, provocando carestie e malattie. Molti quadri dell'epoca riportano immagini per noi oggi del tutto inusuali. Inoltre, per sottolineare ulteriormente le basse temperature che lo caratterizzarono, diciamo che tale periodo è stato uno dei più freddi di un intervallo di tempo più ampio (convenzionalmente indicato dai climatologi tra il sedicesimo e il diciannovesimo secolo) noto come **Little Ice Age**.
Alla luce di ciò si potrebbe concludere, in maniera un po' grossolana, che le variazioni associate all'attività solare possano da sole pilotare le variazioni del clima terrestre.
Quest'ultimo ventennio è stato caratterizzato da una scarsa attività solare, tanto che il ciclo solare 24 risulta essere il più basso da circa 200 anni. Per il ciclo in corsoci sono alcune previsioni secondo cui esso non sarà particolarmente intenso. Andremo quindi incontro ad un periodo di irrigidimento del clima? Ma spesso sentiamo parlare di riscaldamento globale e di aumento delle temperature. Quindi?



Figura 2 Anonimo Veneto. La laguna ghiacciata alle Fondamenta Nuove nel 1708. (Querini Stampalia)
Figure 2 *Anonymous artist from Veneto. The frozen lagoon at Fondamenta Nuove in 1708. (Querini Stampalia)*

I fattori che determinano la temperatura del nostro pianeta

Il nodo della questione sta sui parametri su cui le valutazioni sull'andamento della temperatura del nostro pianeta vengono fatte. Sarebbe un grave errore basarsi esclusivamente su modelli di previsione dell'attività solare, poiché sono molteplici i fattori che contribuiscono alla variazione di temperatura del nostro pianeta. E di questi, l'attività solare è solo uno dei contributi.
I principali fattori che determinano la variazione di temperatura del pianeta sono sia di origine **naturale** che **antropica**. Tra quelli naturali i più importanti sono:

- le **variazioni orbitali del nostro pianeta:** la Terra oscilla intorno al proprio asse a subisce modifiche orbitali nell'arco di millenni. Tale oscillazione può far diminuire ed aumentare periodicamente la temperatura terrestre;
- l'**attività vulcanica:** le eruzioni vulcaniche rilasciano nell'atmosfera anidride carbonica (CO_2) e altri gas in grado di intercettare i raggi solari contribuendo così all'abbassamento della temperatura nell'arco di un paio di anni.
- le **variazioni dell'input energetico solare** che, nelle modalità a cui abbiamo accennato, determina variazioni di temperatura nell'arco di diversi anni.
- componenti interne del sistema clima, tra le quali ad esempio la circolazione termoalina: le acque oceaniche sono caratterizzate da vasti movimenti su grande scala, le *correnti termoaline*, innescate da variazioni di densità a loro volta create dal calore e dalla salinità. Questi giganteschi nastri trasportatori degli oceani portano con sé energia, sotto forma di calore, e materia, sotto forma di sostanze e gas.

Il contributo antropico

Ben diverso è il contributo fornito dai fattori di **natura antropica**. Tra di essi i principali sono:

- la **deforestazione**: le fronde "scure" delle foreste hanno lasciato sempre più il posto a spazi aperti "chiari" che riflettono maggiormente la luce solare riducendo la quantità di energia intrappolata al suolo. L'effetto netto è dunque un leggero raffreddamento;
- alcuni **aereosol** immessi nell'atmosfera: quelli costituiti da particolato carbonioso (*black carbon*) sono inquinanti che producono un leggero riscaldamento; altri, come quelli composti da zolfo, oltre a provocare piogge acide, sono in grado di intercettare i raggi solari producendo un raffreddamento del pianeta.
- I **gas serra:** Senza dubbio questo è il contributo più rilevante alla variazione globale di temperatura. Questi gas sono trasparenti alla radiazione diretta del Sole, ma riescono a trattenere la radiazione riemessa dalla Terra causandone un sensibile aumento di temperatura. Si tratta principalmente di CO_2, vapore acqueo, protossido di azoto (N_2O), metano (CH_4), esafluoruro di zolfo (SF_6), clorofluorocarburi (CFC), ed altri.

Il peso dei diversi fattori

Considerando il contributo di ciascuno di questi fattori, scopriamo che quelli naturali hanno un'incidenza molto piccola sulle variazioni di temperatura del nostro pianeta rispetto a quelli antropici.
Consultando l'ultimo rapporto IPCC 2023 (https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/) è possibile visualizzare il peso dei vari contributi di cui abbiamo parlato nel computo totale delle variazioni di temperatura media terrestre.
Per riassumere possiamo affermare che le maggiori organizzazioni mondiali che si occupano di cambiamenti climatici evidenziano due fatti fondamentali:

1 il **contributo dell'attività solare è assolutamente minoritario rispetto ad altri fattori** di origine naturale e soprattutto antropica.
2 **la temperatura del nostro pianeta sta aumentando**, ed in modo sempre più rapido, portando con sé una serie di conseguenze preoccupanti (già in atto) come lo scioglimento dei ghiacciai, l'innalzamento del livello dei mari e conseguente riduzione delle terre emerse, l'incidenza di eventi meteorologici estremi sempre più violenti e frequenti, la modifica delle proprietà chimiche e fisiche dell'atmosfera e della circolazione delle correnti, la riduzione della salinità degli oceani e ovviamente ingenti danni all'agricoltura.

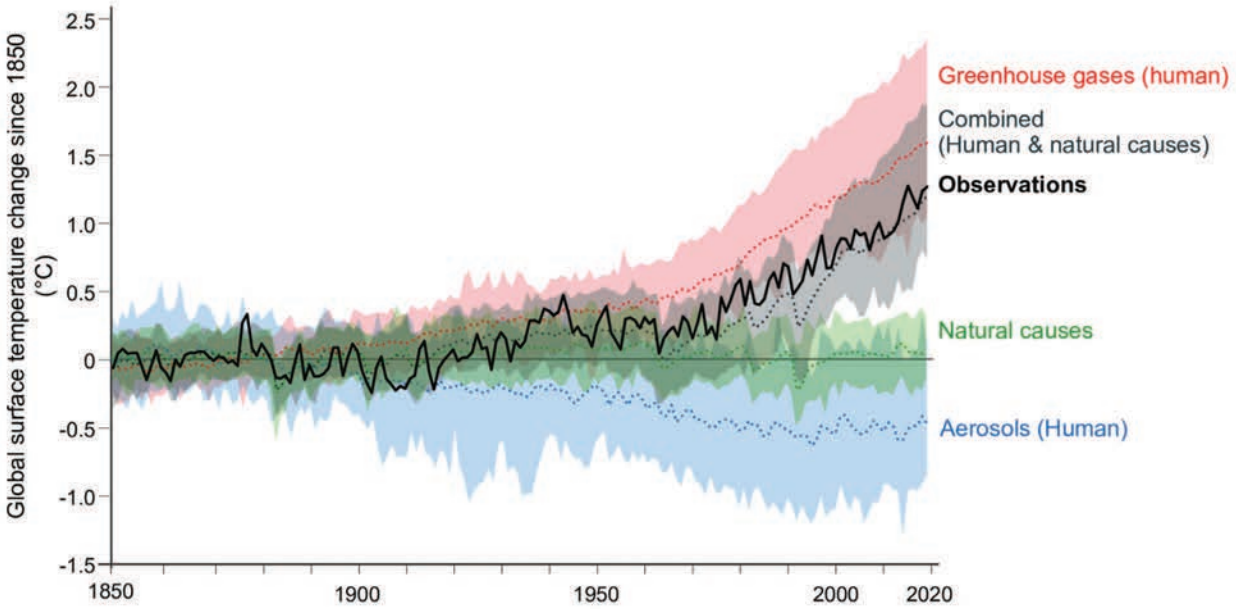


Figura 3 Confronto tra la variazione di temperatura media della Terra osservata (tratto nero) e i diversi contributi dei fattori naturali e antropici dal 1850 ad oggi. Adattamento della Figura 1, Capitolo 3, del rapporto IPCC 2023 (https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/), working group AR6.

Figure 3 *Comparison between the observed Earth's average temperature variation (black line) and the different contributions of natural and anthropogenic factors from 1850 to today. Adapted from Figure 1, Chapter 3, from the IPCC 2023 (https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/) report, working group AR6.*

Va infine ricordato che i cambiamenti climatici agiscono su tempi scala molto lunghi dai decenni, ai secoli e oltre. *Localmente*, e a *breve termine*, possono esserci fluttuazioni che generano un raffreddamento o un riscaldamento locale in un anno rispetto al precedente. Ma l'andamento medio a medio-lungo termine non lascia adito a dubbi: la temperatura terrestre sta aumentando. E cosa ancor più preoccupante, il ritmo di variazione sembra aver accelerato e potrebbe accelerare ancora se non si prendono immediati provvedimenti per arginare i fattori antropici che maggiormente la determinano. E quel medio-lungo termine rischia di essere molto, troppo breve.

Monitoraggio da satellite degli incendi boschivi

Stefania Amici

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Nazionale Terremoti

L'Italia è uno dei paesi del Mediterraneo a maggior rischio incendi. Da metà giugno sino al 27 luglio 2017 sono andati in fumo 74.965 ettari di superfici boschive, pari a 107.000 campi di calcio. Globalmente la frequenza, intensità e severità degli incendi è in aumento in molte regioni del mondo. Il monitoraggio da satellite degli incendi boschivi offre uno strumento di prevenzione molto efficace ed utile per individuare le aree percorse e valutare l'impatto sull'ecosistema.

Nel quadro dello studio e della **prevenzione** degli incendi in questi ultimi anni è salito molto l'interesse per le immagini da satellite. Il monitoraggio da satellite degli incendi boschivi permette, in tempi relativamente brevi, di produrre mappe che consentono di di**stinguere le caratteristiche della superficie in esame, evidenziando per esempio quelle sensibili o colpite.**
In realtà non esiste un satellite ideale per l'osservazione degli incendi. Alcuni ci danno immagini della zona in tempi molto ravvicinati, con basso dettaglio, ideali per l'individuazione dell'evento in corso. Altri forniscono un dettaglio migliore, ma con una ripetizione temporale di qualche giorno, ideali per ricavare le caratteristiche delle aree bruciate. La soluzione consiste nell'utilizzo di immagini provenienti da differenti satelliti per ottenere tutte le informazioni necessarie per l'analisi della zona creando quella che viene chiamata una *costellazione virtuale*.

Il programma Europeo per l'osservazione degli incendi

L'**Unione Europea** ha istituito, a partire **dal 1998**, un programma di supporto ai servizi di protezione delle foreste contro gli incendi, successivamente integrato nel programma per la gestione delle emergenze (Copernicus, [1]). Il sistema è in continua evoluzione e prevede di incorporare anche i dati delle nuove missioni Sentinel dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA). Da questo programma deriva il ***Global Wildfire Information System*** (GWIS, [2]), un **sistema di informazione globale relativo alla identificazione e allo studio degli incendi**. Il GWIS fornisce in tempo "quasi reale" la rilevazione degli incendi (boschivi e non boschivi) derivate dall'analisi dei dati forniti dai satelliti MODIS e VIIRS, ed è in grado di fornire anche altre informazioni complementari, come la mappa di pericolo degli incendi (Figura 1). I satelliti utilizzati sono quelli **sensibili al segnale termico emesso dagli incendi attivi,** utili soprattutto per la localizzazione e lo studio dell'evoluzione del fronte attivo.

Il coinvolgimento dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

L'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) svolge dal 2006 attività di ricerca utilizzando dati satellitari per lo studio di disastri naturali.
Un primo esempio è quello in cui i ricercatori INGV hanno utilizzando per la prima volta i dati della missione Sentinel 2 in relazione all'incendio di Castel Fusano, avvenuto nel comune di Roma nel 2017. Il 17 **luglio 2017 un grande incendio è divampato nella riserva naturale di Castel Fusano,** sul litorale romano, distruggendo una vasta area di pineta. Il **21 luglio 2017 ed il 18 agosto 2017 un secondo ed un terzo evento hanno nuovamente colpito la riserva** portando

ulteriori danni alla vegetazione. Le immagini satellitari di Sentinel2 e Landsat sono state utilizzate per identificare le aree bruciate, per definire la severità del danno apportato dall 'incendio e lo stato di degradazione dell'area [3]. Questo lavoro è risultato propedeutico allo studio dello stato di ricrescita della vegetazione e per localizzare le zone più a rischio.

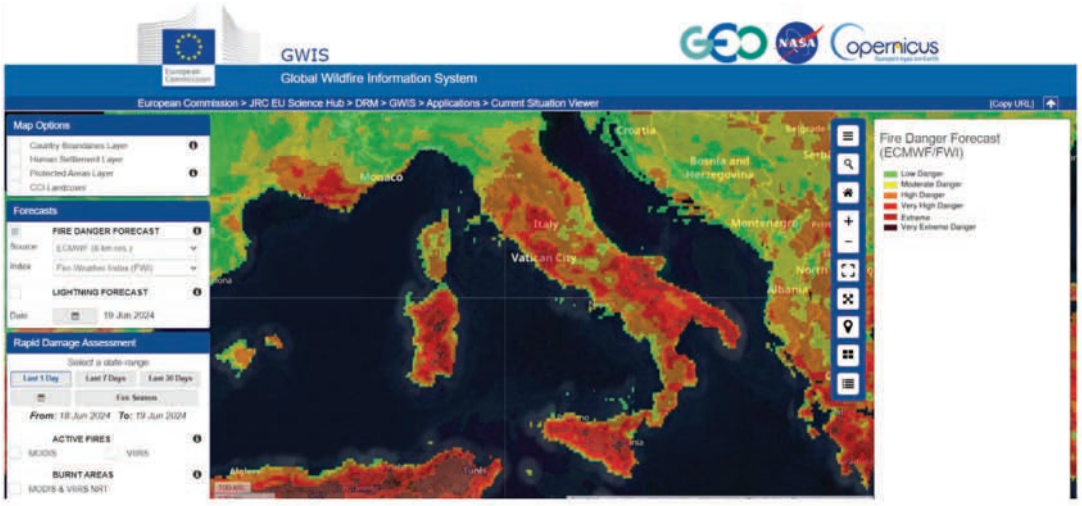


Figura 1 Interfaccia grafica di GWIS che mostra le zone più a rischio di incendio per una parte del bacino Mediterraneo (indici di pericolo), per il giorno 19 giugno 2024.

***Figure 1** GWIS graphic interface showing the areas most at risk of fire for a part of the Mediterranean basin for 19 June 2024.*

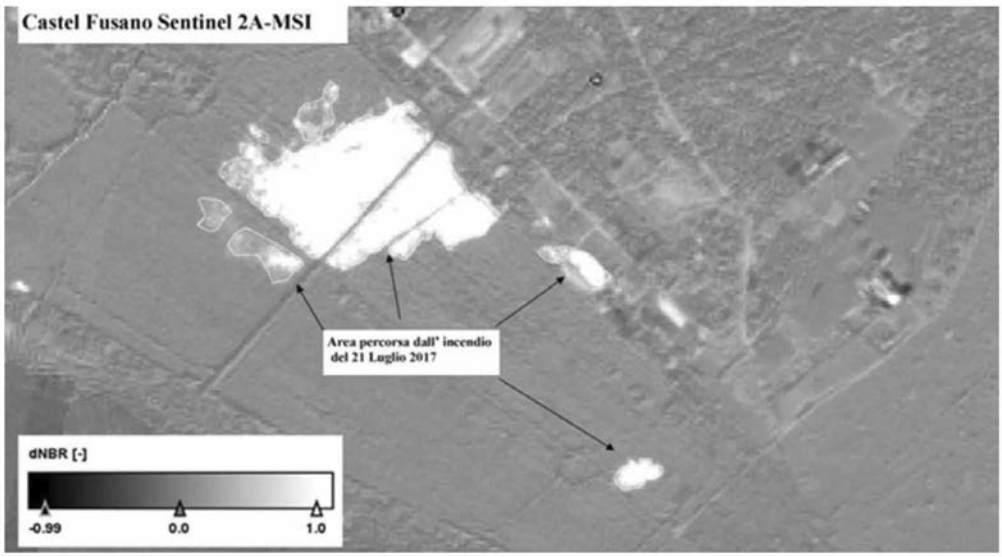


Figura 2 Mappa del cambiamento del territorio in seguito all'incendio del 17 Luglio 2017 evidenziata dall' Indice di dNBR (differenza di indice di area bruciata, *difference Normalized Burn Index*). Le zone in nero-grigio sono quelle dove non si è verificato alcun cambiamento; le zone in tonalità di **grigio chiaro-bianco indicano cambiamento**. Contains modified Copernicus Sentinel data [2017]. Software *utilizzato* SNAP-ESA, processamento ed analisi di S. Amici.

***Figure 2** Map of land change following the fire of 17 July 2017 identified through the dNBR index (Difference Normalized Burn Index). The areas in black-grey are those where no change has occurred; the areas in **light grey-white** shades indicate change Contains modified Copernicus Sentinel data [2017]. Software used SNAP-ESA, processing and analysis by S. Amici.*

All'**INGV lo studio del rischio e dell'impatto ambientale degli incendi boschivi è in continua evoluzione**. In questi ultimi anni gli studi si sono focalizzati sullo sviluppo dell'indice **HFDI (Hyperspectral Fire Index)** per identificazione del fronte incendio [Amici e Piscini, 2021] per il sensore iperspettrale PRISMA [4] sviluppato dall'Agenzia Spaziale Italiana. Recentemente le potenzialità di PRISMA per la stima di temperature del fronte attivo sono state esplorate utilizzando tecniche di machine learning ed intelligenza artificiale [Amici et al., 2022]. Attualmente INGV è impegnato **nello sviluppo algoritmico per PRISMA Seconda Generazione (PRISMA-SG)** e **collabora strettamente** con NASA -JPL per lo sviluppo del **Fire Radiative Power** per la missione **SBG.**

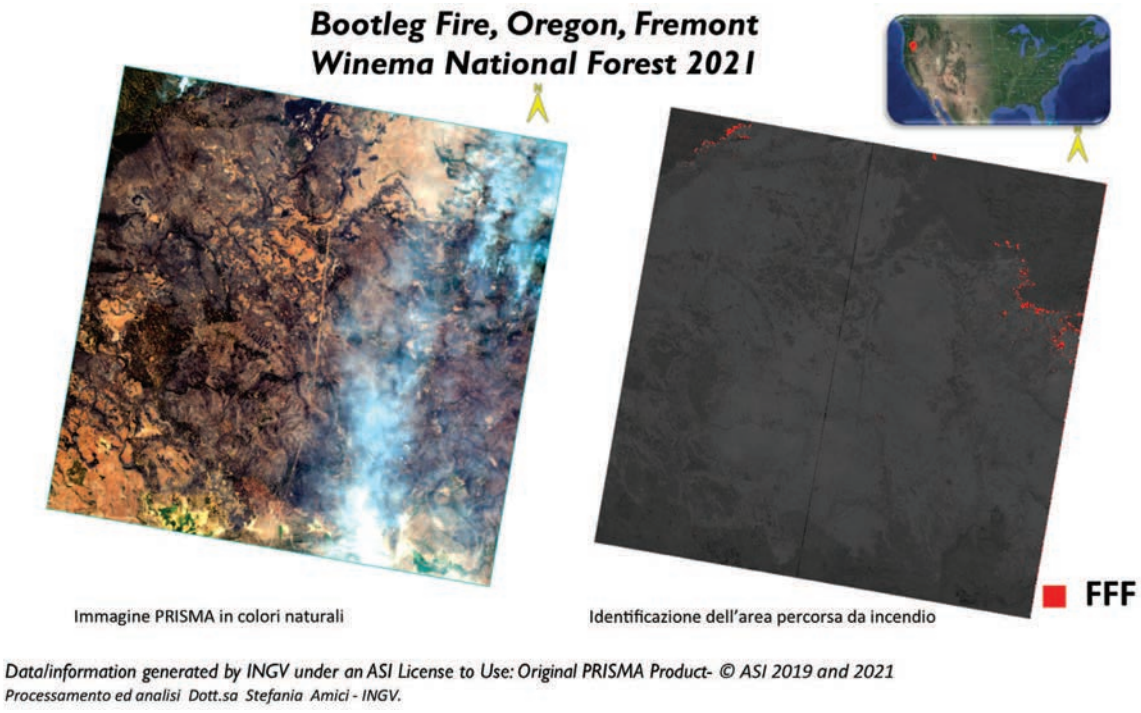


Figura 3 Esempio di sviluppo algoritmico per l'identificazione del fronte di incendio attivo utilizzando il dato iperspettrale della missione italiana PRISMA. A sinistra l'immagine dallo spazio ripresa da PRISMA dell'incendio in Oregon del 2021 in colori naturali a destra il risultato dello sviluppo dell'algoritmo che utilizza le bande termiche (SWIR) di PRISMA per identificare il fronte attivo (FFF) in rosso [Amici e Piscini, 2021].
Figure 3 *Example of algorithmic development for the identification of the active fire front using the hyperspectral data of the Italian PRISMA mission. On the left, the image from space taken by PRISMA of the Oregon fire of 2021 in natural colors; on the right, the result of the development of the algorithm that uses the thermal bands (SWIR) of PRISMA to identify the active front (FFF) in red [Amici and Piscini, 2021].*

Perché studiare gli incendi è importante?

Gli incendi boschivi giocano un ruolo rilevante nel cambiamento climatico con impatto sia su **scala globale** che su **scala locale**.
Su **scala locale** gli incendi **trasformano profondamente le zone che investono** determinandone, per esempio, il cambiamento dell'uso del suolo. Gli incendi spesso provocano la perdita di proprietà, di vite umane, possono causare dissesto idrogeologico del territorio colpito ed hanno un impatto sull'ecosistema e la biodiversità. I gas ed i fumi rilasciati influenzano la qualità dell'aria, destando preoccupazione per la salute pubblica. La vegetazione in combustione è quindi rilevante non solo per gli scienziati e le autorità coinvolte nelle operazioni di soppressione, ma

coinvolge direttamente le comunità locali, la popolazione e l'ambiente. Su **scala globale** gli incendi contribuiscono all'**emissione in atmosfera di gas serra**, come l'anidride carbonica (CO_2), il monossido di carbonio (CO), il metano (CH_4) e di micro-particelle (aerosol). Le particelle di aerosol possono raggiungere la parte bassa dell'atmosfera (troposfera), possono rimanervi per alcuni giorni e possono essere trasportate per lunghe distanze. Gli incendi influenzano il cambiamento climatico che a sua volta favorisce i fenomeni estremi di biomassa in combustione.

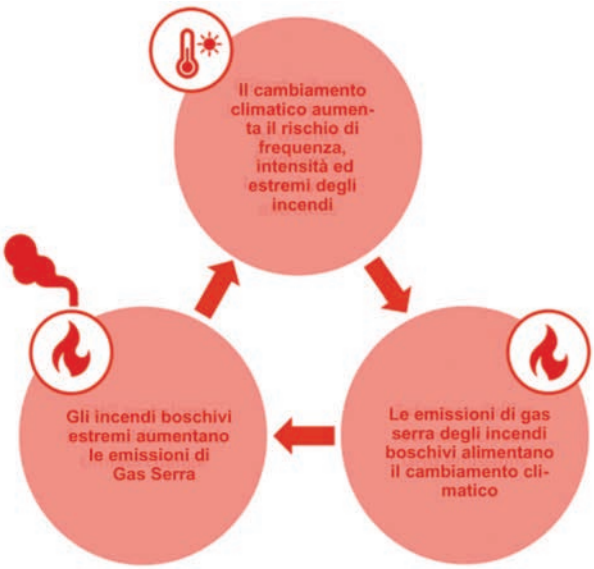


Figura 4 Il ciclo dei cambiamenti climatici e degli incendi estremi. Grafico adattato da OECD Taming the extreme fire "policy highlights [5], che analizza i punti salienti della politica di riduzione del rischio suggerendo metodologie di prevenzione e mitigazione.

Figure 4 *The cycle of climate change and extreme fires. Adapted from OECD Taming the extreme fire "policy highlights, [5], which analyzes the main points of risk reduction policy suggesting prevention and mitigation methodologies.*

L'Osservatorio della Terra della NASA riporta una **stima dell'impatto delle emissioni degli incendi** verificatisi nel mondo negli ultimi 100 anni. Il loro contributo in termini di **aumento della temperatura superficiale terrestre e di circa 0.5°C**.
È chiaro quindi che lo studio e il controllo di questi eventi sempre più estremi ed impattanti sia di fondamentale importanza sia per la salute dell'uomo che per la tutela dell'ecosistema.

Bibliografia

Amici S., Piscini A., (2021). *Exploring PRISMA Scene for Fire Detection: Case Study of 2019 Bushfires in Ben Halls Gap National Park, NSW, Australia*. Remote Sens. 13, 1410. https://doi.org/10.3390/rs13081410

Amici S., Spiller D., Ansalone L., Miller L., (2022). *Wildfires Temperature Estimation by Complementary Use of Hyperspectral PRISMA and Thermal (ECOSTRESS & L8)*, Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 127(12). https://doi.org/10.1029/2022JG007055

Sitografia

[1] Copernicus: http://www.copernicus.eu/
[2] GWIS: http://gwis.jrc.ec.europa.eu/
[3] https://sites.google.com/ingv.it/rl-project-fires/research?authuser=0
[4] https://www.asi.it/en/earth-science/prisma/
[5] https://www.oecd-ilibrary.org/sites/dd00c367-en/index.html?itemId=/content/publication/dd00c367-en

Dimmi che CO_2 sei e ti dirò da dove vieni

Giorgio Capasso e Roberto Di Martino

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia – Sezione di Palermo

Attraverso misure di concentrazione e di composizione isotopica della CO_2 in atmosfera è possibile determinarne l'origine: un test sull'isola di Vulcano.



Figura 1 Il team INGV al lavoro. (Foto di G. Capasso)
***Figure 1** INGV team at work. (Photo by G. Capasso)*

L'anidride carbonica è probabilmente il più noto fra i gas serra, responsabile dell'aumento e della temperatura atmosferica media e del riscaldamento globale, ormai evidente in gran parte del pianeta [1].
Anche se l'aumento di concentrazione di CO_2 in atmosfera è principalmente dipendente dalle attività antropiche, esistono anche fonti naturali che contribuiscono al budget globale di questo gas. Tra queste, i vulcani sono di gran lunga i più importanti emettitori di CO_2. Inoltre, la quantità di anidride carbonica emessa dai vulcani [2] cambia in funzione del loro stato di attività (questa evidenza viene utilizzata da anni come strumento per il monitoraggio dello stato di attività di molti vulcani del mondo). Il miglioramento delle stime delle emissioni vulcaniche è molto importante, poiché una più accurata valutazione delle emissioni di CO_2 prodotta dall'attività vulcanica è un elemento fondamentale per lo sviluppo dei modelli di evoluzione del riscaldamento climatico globale. Ma è necessario trovare un modo per distinguere da quali fonti proviene la CO_2 rilevata dalla strumentazione, per valutare la percentuale di quella di origine vulcanica.
Si è scelto di eseguire un esperimento sull'Isola di Vulcano, nello straordinario arcipelago delle Isole Eolie, poiché le sorgenti antropiche di anidride carbonica hanno basso impatto

sull'ambiente, comparabile a quello prodotto dall'omonimo vulcano. In particolare, si sono posizionate le strumentazioni analitiche alla spiaggia di Levante per analizzare gli effetti delle emissioni di gas in riva al mare nei pressi della vasca dei fanghi idrotermali.

Figura 2 Misure in atmosfera nell'area di Grotta dei Palizzi (Vulcano) caratterizzata da elevati tassi di emissione di CO_2 dai suoli. Anche se in concentrazioni molto basse è stato possibile individuare la presenza in atmosfera della componente di origine vulcanica. (Foto di R. Di Martino)
Figure 2 *Measurements at the Grotta dei Palizzi (Vulcano) characterized by high rates of soil CO_2 emission. (Photo by R. Di Martino)*





Figura 3 Misure in atmosfera nell'area della spiaggia di Levante (Vulcano). Quest'area è caratterizzata dalla presenza di fumarole di bassa temperatura e di acque termali. Attraverso le misure in atmosfera è stato possibile determinare la composizione isotopica della CO_2 di origine vulcanica. (Foto di G. Capasso)
Figure 3 *Measurements at the Levante beach area (Vulcano). This area is characterized by the presence of low temperature fumaroles and thermal waters. (Photo by G. Capasso)*

Le analisi dell'aria sono state eseguite in continuo con un elevato livello di dettaglio, raggiunto utilizzando sofisticate strumentazioni, simili a quelle installate nelle sonde spaziali per le analisi dei gas atmosferici dei pianeti del sistema solare.
Questi strumenti permettono sia la misura della concentrazione della CO_2, sia la composizione degli isotopi del carbonio ($^{13}C/^{12}C$) e dell'ossigeno ($^{18}O/^{16}O$), i più comuni isotopi stabili del carbonio e dell'ossigeno rispettivamente. Combinandosi tra loro, gli isotopi delle due specie, formano molecole di CO_2 che hanno le stesse proprietà chimiche, ma masse differenti. È proprio la quantità di molecole di anidride carbonica con diverse abbondanze degli isotopi di carbonio ed ossigeno che ci indicano le diverse provenienze dei gas misurati (vulcanica, respirazione delle piante, combustibili fossili etc.). La composizione isotopica rappresenta una firma identificativa dell'origine della CO_2. Quindi non tutte le molecole di CO_2 sono uguali!
Le misure della nostra campagna sono state eseguite per 48 ore consecutive, all'inizio della stagione primaverile, per tener conto anche dell'inizio dei cicli vegetativi che contribuiscono anch'essi al ciclo del carbonio.



Figura 4 Campionamento dei gas dal suolo nell'area del Faraglione (Spiaggia di Levante) durante le misure notturne. (Foto di V. Prano)
Figure 4 *Sampling of gases from the ground in the Faraglione area (Spiaggia di Levante). (Photo by V. Prano)*

I risultati del test effettuato a Vulcano ci hanno dato molta soddisfazione: ci hanno infatti permesso di identificare la CO_2 di origine vulcanica distinguendola chiaramente da quella normalmente presente in atmosfera. L'accuratezza delle misure effettuate con questa strumentazione ci ha anche riservato una sorpresa: è stato infatti possibile rilevare anche il contributo occasionale della CO_2 prodotta da combustibili fossili rilasciata dal traffico marittimo! Con questo lavoro, i ricercatori dell'INGV di Palermo elaborano nuove metodologie per l'identificazione delle diverse sorgenti che contribuiscono ai cambiamenti climatici [3] utilizzando innovative e robuste tecniche analitiche applicandole direttamente sul campo. I primi risultati

di questa elaborazione sono stati presentati a Vienna nel corso della Assemblea Generale della European Geoscience Union 2019.
Questa metodologia è stata applicata con successo sia al monitoraggio dell'attività vulcanica [Capasso et al., 2020, Di Martino et al., 2016, 2022] che in campo ambientale per identificare le varie sorgenti di contaminazione e quantificarne gli specifici contributi [Di Martino and Capasso, 2021].

Bibliografia

Capasso G., Di Martino R.M.R., Camarda M., De Gregorio S., Prano V., (2020). *Deep CO_2 release revealed by stable isotope and diffuse degassing surveys at Vulcano (Aeolian Islands) in 2015-2018*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 401, 106972. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.106972

Di Martino R.M.R., Capasso G., Camarda M., (2016). *Spatial domain analysis of carbon dioxide from soils on Vulcano Island: implications for CO_2 output evaluation*. Chemical Geology 444 (2016) 59-70. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.09.037

Di Martino R.M.R., Capasso G., (2021). *On the complexity of anthropogenic and geological sources of carbon dioxide: Onsite differentiation using isotope surveying*. Atmospheric Environment, 256, 118446, Pergamon. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118446

Di Martino R.M.R., Gurrieri S., Camarda M., Capasso G., and Prano V., (2022). *Hazardous changes in soil CO_2 emissions at Vulcano, Italy, in 2021*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 127, e2022JB024516. https://doi.org/10.1029/2022JB024516

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2019/04/09/cambiamenti-climatici-e-riscaldamento-globale/

[2] https://ingvvulcani.com/2018/07/30/i-gas-vulcanici/

[3] https://ingvambiente.com/2018/06/14/lantartide-si-scioglie-i-mari-salgono-di-8-mm-in-25-anni/

Emissione di gas da pozzo alle pendici dei Colli Albani: il blowout di Ciampino del giugno 2020

Maria Luisa Carapezza, Massimo Ranaldi, Luca Tarchini

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

Il 9 giugno 2020, intorno alle ore 13:00, è avvenuto un ***blowout***, cioè **una emissione incontrollata di gas e acqua nebulizzata ad alcuni metri di altezza**, da un pozzo perforato in un terreno privato nel Comune di Ciampino, al confine con il Comune di Roma (Figura 1). Questa zona si trova alle pendici nord-occidentali dei Colli Albani, vulcano quiescente monitorato dall'INGV [Tarchini et al., 2022].
Tra il 2003 e il 2016, nel raggio di 500 metri da questo punto, in alcune località del Comune di Roma (Figura 1) sono avvenuti altri 3 blowout di gas da pozzi, che hanno creato analoghe situazioni di emergenza seguite, per gli aspetti scientifici, da uno specifico gruppo di ricerca dell'INGV di Roma coordinato dalla scrivente [Carapezza and Tarchini, 2007; Carapezza et al., 2020]. Anche in questa occasione, i **ricercatori INGV hanno eseguito rilievi, osservazioni** e hanno campionato i gas emessi, poi analizzati nel laboratori dell'INGV di Palermo.

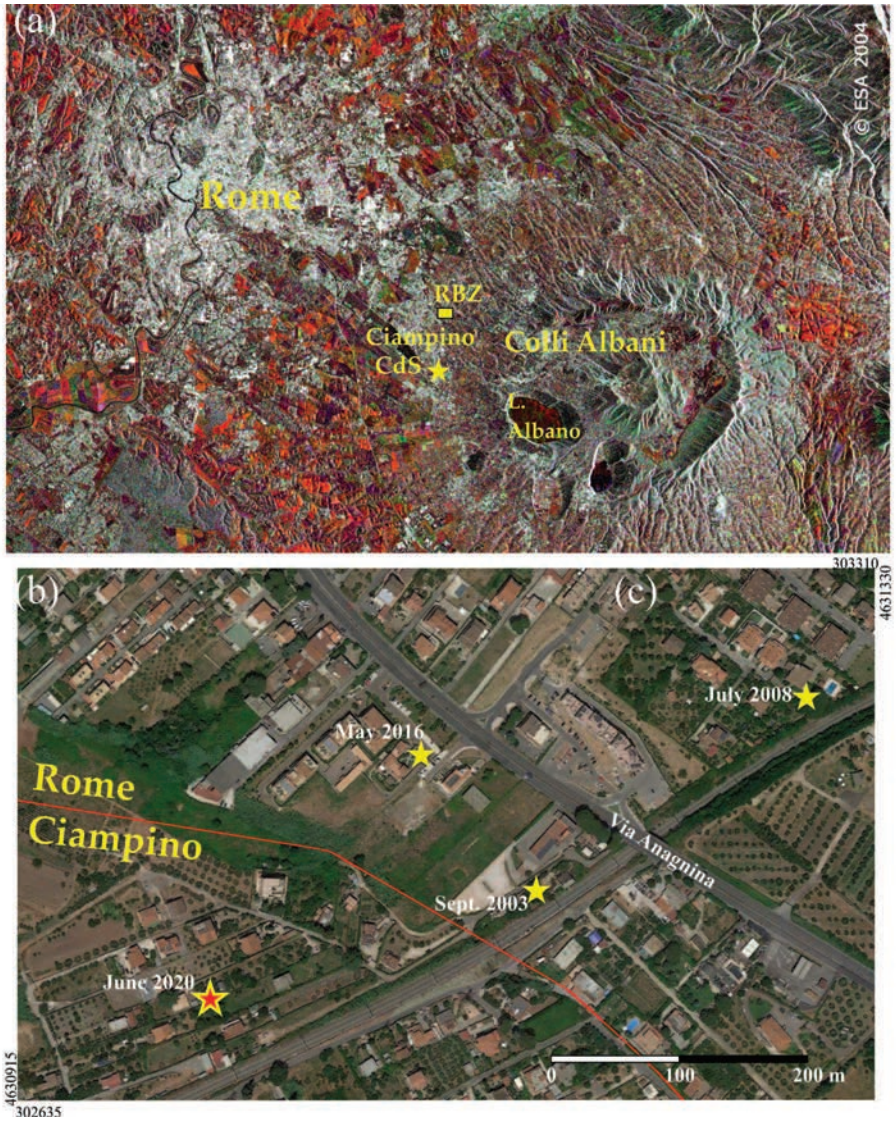


Figura 1 a) Mappa satellitare dei Colli Albani e della città di Roma con ubicazione della zona a rischio di blowout (RBZ) e della manifestazione di gas di Cava dei Selci (CDS); b) Sito del blowout di gas da pozzo del 9 giugno 2020 a Ciampino (stella rossa); le stelle gialle indicano i precedenti blowout di gas avvenuti nella stessa zona (nel Comune di Roma). (Carapezza e Tarchini [2007])
***Figure 1** a) Satellite map of Colli Albani and the city of Rome with the location of the risk blowout zone (RBZ) and the Cava dei Selci (CDS) gas manifestation; b) Site of the June 9, 2020 gas well blowout in Ciampino (red star); yellow stars indicate previous gas blowouts in the same area (in the Municipality of Rome). (Carapezza and Tarchini [2007])*

In questo settore dei Colli Albani, che va dal lago Albano a Ciampino e Cava dei Selci, il gas è di origine vulcanica come indica il rapporto isotopico dell'elio (3He/4He= 1,59-1,90) [Carapezza and Tarchini, 2007] simile a quello delle inclusioni fluide dei fenocristalli delle rocce vulcaniche albane [Martelli et al., 2004]. Il gas emesso è composto prevalentemente da **anidride carbonica** (CO_2) con una piccola quantità di **idrogeno solforato** (H_2S). Entrambi i gas sono asfissianti e tossici e ciò ha indotto i Vigili del Fuoco (VVF) a suggerire al Comune di Ciampino l'evacuazione della zona circostante, per un totale di 12 abitazioni. Allo stesso tempo i VVF hanno tentato di ridurre il getto di gas in atmosfera ostruendo il foro con un palloncino gonfiabile (*packer*) e ricoprendolo con materiale da cantiere (vedi Figura 2).



Figura 2 Sin: il blowout di gas dal pozzo del 9 giugno 2020. Ds in alto: ricercatori INGV impegnati nelle misure del flusso di CO_2 dal suolo. Si noti la presenza sul terreno di due cornacchie uccise dal gas (cerchi gialli). Ds in basso: variazione della concentrazione in aria di CO_2 (in blu), H_2S (in rosso) e O_2 (in verde), misurata in continuo la sera del 9 giugno e la mattina dopo, a 5 m (S1) e 6 m (S2) dal pozzo. (Foto: M.L. Carapezza)

Figure 2 *Sin: the gas blowout from the well on June 9, 2020. Top right: INGV researchers engaged in measuring the CO_2 flux from the ground. Note the presence on the ground of two crows killed by the gas (yellow circles). Bottom right: variation in the concentration of CO_2 (in blue), H_2S (in red) and O_2 (in green) in the air, measured continuously on the evening of June 9 and the following morning, at 5 m (S1) and 6 m (S2) from the well. (Photo: M.L. Carapezza)*

L'intervento INGV è iniziato la sera del 9 giugno 2020 allo scopo di **valutare la pericolosità dell'emissione gassosa e fornire assistenza scientifica** alle operazioni di cementazione del pozzo. Oltre al campionamento del gas, è stata **monitorata la concentrazione del gas** in aria ed è stata eseguita una campagna di **misure del flusso di CO_2** dal suolo.

Pericolosità dell'emissione gassosa in atmosfera nell'area attorno al pozzo

Le misure del 9 e 10 giugno 2020 hanno mostrato **concentrazioni pericolose di CO_2 e H_2S in un'area di circa 20 m dal pozzo**, immediatamente letali in prossimità del pozzo. Si riporta, a titolo di esempio, il grafico con il monitoraggio della concentrazione dei gas in aria, misurata a 5 metri di distanza dal pozzo e a 20 cm dal suolo (Figura 2). Le concentrazioni misurate erano immediatamente letali. Si ricorda che i livelli IDLH (*Immediately Dangerous to Life and Health*, cioè immediatamente pericolosi per la vita e la salute) sono di 8,3 vol.% per la CO_2 e di 100 ppm per l'H_2S. In effetti, la mattina del 10 giugno sono state rinvenute tre cornacchie e due passeri morti a circa 20 m dal pozzo in una zona investita dal getto laterale di gas dal pozzo (Figura 2).

Pericolosità dell'emissione gassosa nell'area evacuata

Misure della concentrazione del gas in aria sono state eseguite, insieme con i VVF, in tutta l'area evacuata e all'interno di alcune abitazioni. I risultati hanno mostrato che **il gas era stato disperso in atmosfera fino ad alcune centinaia di metri di distanza**, dove si misuravano tracce di H_2S e si avvertiva lo sgradevole odore di uova marce di questo gas.

Valutazione della dispersione del gas nel suolo

Una parte del gas emesso dal pozzo parzialmente ostruito, si diffondeva negli strati permeabili superficiali del terreno circostante. Lo studio di fenomeni analoghi ha mostrato che questa diffusione del gas può interessare anche le abitazioni vicine e creare condizioni pericolose al loro interno (in particolare negli scantinati e seminterrati) [Barberi et al., 2007; Carapezza et al., 2020a]. Per questo motivo sono state eseguite misure del flusso di CO_2 dal suolo. La **mappa del flusso di CO_2 dal suolo**, ottenuta dall'elaborazione geostatistica delle misure (Figura 3) conferma che il gas emesso dal pozzo si diffondeva negli strati superficiali permeabili del terreno creando intorno al pozzo una zona anomala (colori dal giallo al viola).

Collasso del pozzo e variazioni geochimiche connesse

Intorno alle ore 15:45 del 10 giugno è improvvisamente cessata l'erogazione di gas dal pozzo a causa di un collasso delle pareti non intubate del pozzo stesso. Le concentrazioni del gas in aria sono immediatamente tornate a valori normali (CO_2= ~0.04 vol.%; H_2S= 0). Sono state subito ripetute **misure del flusso di CO_2 dal suolo su alcuni punti significativi trovando una diminuzione fino a più di due ordini di grandezza** nei punti più anomali [Carapezza et al., 2020b].

Cementazione del pozzo

Al fine di consentire la cementazione del pozzo, l'11 giugno i VVF hanno rimosso il materiale di copertura e il packer. È emersa la presenza di un ampio scavernamento nella parte più superficiale del pozzo, causato da erosione ad opera del forte getto di acqua e gas. Vi era, quindi, un forte pericolo di collasso del terreno intorno al pozzo.
Il 13 giugno è stata eseguita la **cementazione del pozzo** versandovi alcuni metri cubi di cemento a presa rapida, fino al riempimento della voragine superficiale.

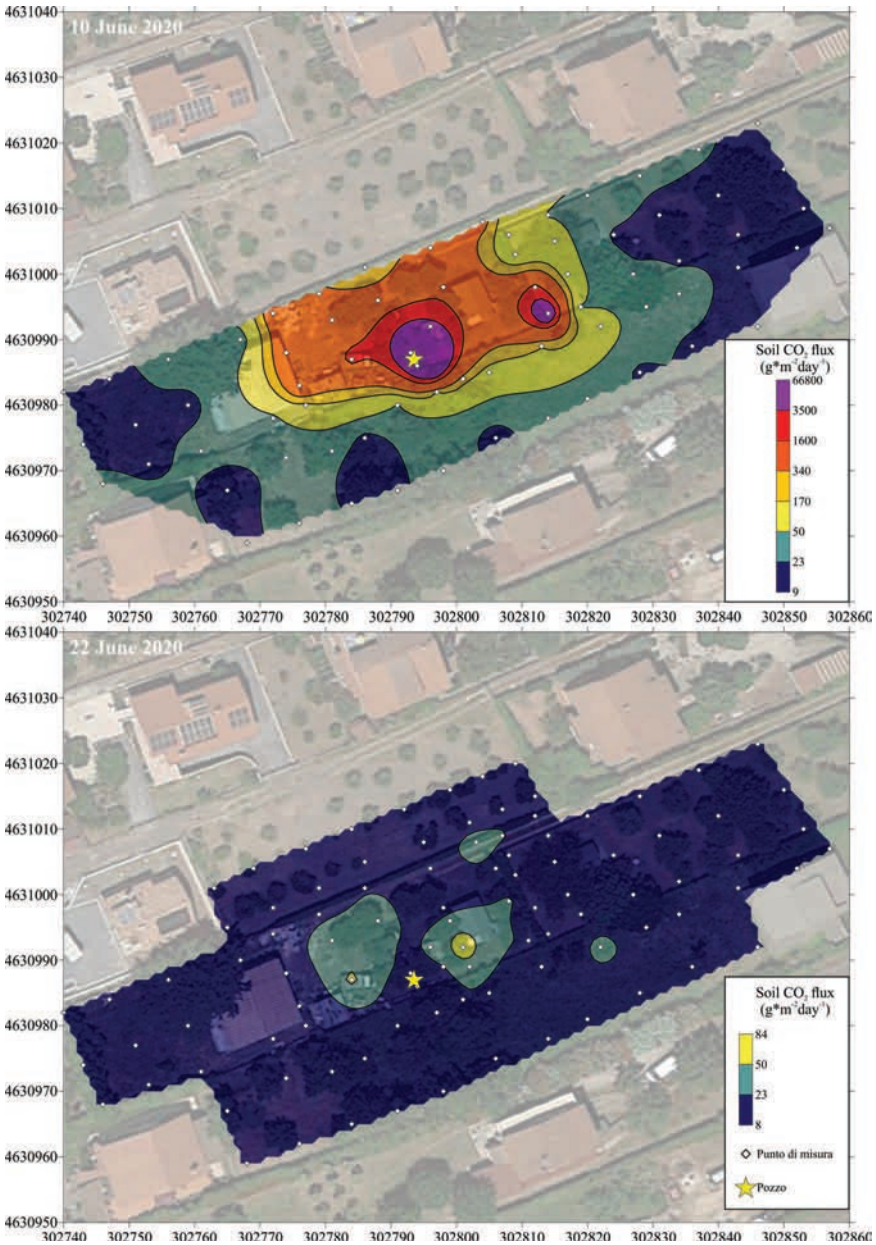


Figura 3 Mappa del flusso di CO_2 dal suolo della zona intorno al pozzo che ha generato il blowout di gas (stella gialla) ottenuta dai rilievi eseguiti la mattina del 10 giugno, durante il blowout, e il 22 giugno 2020, dopo la cementazione del pozzo.

Figure 3 *Map of the CO_2 flux from the ground in the area around the well that generated the gas blowout (yellow star) obtained from surveys carried out on the morning of June 10, during the blowout, and on June 22, 2020, after the well was cemented.*

I rilievi eseguiti il 15 giugno hanno indicato una forte diminuzione del flusso di gas dal suolo e sulla base di questi risultati e di quelli ottenuti dai Vigili del Fuoco, il Comune di Ciampino ha revocato l'evacuazione e le famiglie sono rientrate nelle proprie abitazioni.
Nel rilievo eseguito il 22 giugno, il flusso di CO_2 dal suolo è tornato quasi totalmente a valori normali, con la persistenza solo di una piccolissima anomalia ad est del pozzo (vedi Figura 5).

Conclusioni

L'incidente del giugno 2020 conferma che la zona di confine tra Roma e Ciampino, alla periferia dei Colli Albani ha un'elevata pericolosità per blowout. In quest'area è presente una falda acquifera superficiale confinata, pressurizzata da gas di origine magmatica, che può produrre emissioni incontrollate di gas se perforata da un pozzo [Carapezza et al., 2021]. I blowout hanno un forte impatto sul territorio (evacuazioni di case, coltivazioni rovinate, animali morti, inquinamento atmosferico, ecc.) e richiedono complesse e costose operazioni di cementazione per essere risolti oltre che interventi mirati di geochimica ambientale atti a valutare la pericolosità da gas.

Bibliografia

Barberi F., Carapezza M. L., Ranaldi M. and Tarchini L., (2007). *Gas blowout from shallow boreholes at Fiumicino (Rome): induced hazard and evidence of deep CO_2 degassing on the Tyrrhenian margin of central Italy*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 165 (1-2). https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.009

Carapezza M.L. and Tarchini L., (2007). *Magmatic degassing of the Alban Hills volcano (Rome, Italy): geochemical evidence from accidental gas emission from shallow pressurized aquifers*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 165(1-2), 5-16. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.04.008

Carapezza M.L., Ranaldi M., Tarchini L., Gattuso A., Pagliuca N.M., Vinci M. and Barberi F., (2020a). *Dangerous emissions of endogenous CO_2 and H_2S from gas blowouts of shallow wells in the Rome Municipality (Italy)*. Applied Geochemistry, 123. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104769

Carapezza M.L., Ranaldi M., Tarchini L. and Barberi F., (2020b). *Data set on soil CO_2 flux and air concentration of CO_2 and H_2S measured in the zone of 9 June 2020 Ciampino blowout (Rome)*. http://hdl.handle.net/2122/13652

Carapezza M. L., Barberi F., Tarchini L. and Ranaldi M., (2021). Hazard from endogenous gas emissions and phreatic explosions in Rome City. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL089797. https://doi.org/10.1029/2020GL089797

Hansell A. and Oppenheimer C., (2005). *Health hazards from volcanic gases: a systematic literature review*. Archives of Environmental Health, 59(12), 628-639. https//doi.org/10.1080/00039890409602947

Nuccio P.M., Stuart F.M., Burgess R., Ellam R.M. and Italiano F., (2004). *Helium-strontium isotope constraints on mantle evolution beneath the Roman comagmatic province, Italy*. Earth Planetary and Science Letters, 224, 295-308. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.05.025

Tarchini L., Carapezza M.L., Granieri D., Frepoli A., Nicola Mauro P. and Ranaldi M., (2022). Twenty years monitoring of soil CO_2 flux and seismicity at Cava dei Selci gas discharge (Colli Albani volcano, Italy). Earth and Space Science, 9, e2021EA001936. https://doi.org/10.1029/2021EA001936

Nuove mappe di dettaglio sulla pericolosità da Radon nella regione Lazio

Alessandra Sciarra[1] e Livio Ruggiero[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma1
[2]CNR - UIR - Ufficio infrastrutture di Ricerca

Un recente studio ha indagato le relazioni esistenti tra il potenziale geogenico di radon e i valori di radon indoor in tre comuni del Lazio ubicati nei diversi distretti vulcanici della regione, al fine di creare mappe di dettaglio sulla pericolosità da Radon e di stimare la pericolosità e il rischio associato per la popolazione.

Cos'è il Radon

Il **radon è un gas radioattivo** naturale prodotto dal decadimento dell'uranio presente nelle rocce e nel suolo. È un **gas nobile, incolore, inodore e insapore** e quindi i sensi umani non lo rilevano anche quando è presente in alte concentrazioni.

In natura il suolo e alcune rocce (lave, tufi, pozzolane, alcuni tipi di granito, etc.) liberano il radon costantemente. Il radon è radioattivo e rappresenta uno dei contributori principali alla radioattività naturale di fondo dell'intero pianeta. A differenza dei suoi precursori nella catena radioattiva (Radio-226 e Uranio-238) che permangono nella crosta terrestre, **il gas radon è volatile e ha la possibilità di muoversi, trasportato dall'aria o dall'acqua** (nella quale è solubile). È in grado quindi di diffondersi attraverso pori e fratture del suolo nell'atmosfera o all'interno di edifici.
Nel caso in cui il gas si diffonda **nell'atmosfera,** la sua concentrazione rimane talmente bassa da non costituire un rischio per la salute. Infatti, essendo un gas nobile, non è molto reattivo e generalmente il nostro organismo lo elimina in tempi brevi. Diversamente, quando il gas penetra in ambienti confinati, tende ad accumularsi con il rischio di raggiungere livelli tali da poter rappresentare un rischio. Il vero pericolo per la salute sono i prodotti del suo decadimento, ossia il piombo (Pb), il polonio (Po), il bismuto (Bi), anch'essi radioattivi. Infatti, una parte del radon inalato decade in questi elementi, che si legano alle particelle di polvere irradiando i tessuti polmonari e bronchiali.
L'Organizzazione Mondiale della Sanità già dal 2009 sostiene che l'esposizione al radon è una delle principali cause di tumori polmonari (tra il 3% e il 14%), seconda soltanto al fumo.

Le fonti del Radon

Il radon viene considerato un inquinante tipicamente **indoor.** Le fonti del radon indoor sono essenzialmente legate alla composizione del suolo e delle rocce circostanti o alla sua possibile risalita lungo sistemi di faglie e fratture (il cosiddetto **radon geogenico**), al materiale da costruzione utilizzato negli edifici, al degassamento dall'acqua del rubinetto.
Il gas radon migra dal suolo (o dai materiali con cui è costruito l'edificio) e penetra all'interno dei luoghi chiusi (case, uffici, scuole, ecc.) attraverso le fessure (anche microscopiche), le giunzioni delle pareti al pavimento, i passaggi dei vari impianti (elettrico, termico, idraulico). Raggiungere concentrazioni particolarmente elevate nelle cantine e nei piani terra, soprattutto se scarsamente ventilati, può costituire un rischio rilevante per la salute dell'uomo.

La velocità con cui il radon migra in superficie, sia lungo le faglie o direttamente emanato dal terreno, rappresenta il potenziale geogenico di radon (GRP) di un'area.

Il monitoraggio del Radon e il progetto LIFE-RESPIRE

L'INGV svolge attività di monitoraggio ambientale del radon in ambiti diversi:

- in parallelo al monitoraggio vulcanico e sismico (a scala regionale e nazionale),
- nel monitoraggio ambientale per il rischio da radon indoor, nell'ambito di progetti scientifici come LIFE-RESPIRE (Radon rEal time monitoring System and Proactive Indoor Remediation, http://www.liferespire.it) in cui l'**INGV** è partner.

In particolare, nell'ambito del progetto LIFE-Respire, i ricercatori coinvolti hanno analizzato e monitorati **tre comuni** situati in diversi **distretti vulcanici della regione Lazio**. Questi comuni "campione" sono stati selezionati sulla base della mappa di potenziale geogenico di radon della regione Lazio (pubblicata nel 2017). Sono stati scelti in quanto caratterizzati da un **potenziale basso (Ciampino), medio (Celleno) ed alto (Caprarola)** con lo scopo di realizzare delle mappe di dettaglio. L'obiettivo finale di questa analisi è stato quello di realizzare una mappa del potenziale geogenico di estremo dettaglio per i Comuni selezionati e di trovare una procedura efficace per la determinazione delle aree maggiormente soggette al rischio da radon da applicare poi su tutto il territorio nazionale, così come richiesto dalla Direttiva Europea. Prima di cominciare le misure e il monitoraggio del radon indoor a lungo termine negli edifici, i ricercatori hanno condotto delle indagini preliminari. Lo scopo è stato quello di caratterizzare, dal punto di vista geologico e geochimico, il territorio dei tre comuni e poter così confermare il Potenziale Geogenico di Radon (Figura 2a) pubblicato nel 2017. Le misure preliminari hanno riguardato le concentrazioni di gas radon e di radiazione gamma terrestre nel suolo, in acqua e in aria, del contenuto in radionuclidi (Uranio, Torio e Radio) dei suoli e delle rocce, e della permeabilità delle rocce.
Il team ha effettuato il successivo monitoraggio del radon indoor su base annuale su oltre 250 siti scelti tra edifici pubblici e case private.

Le mappe di dettaglio sulla pericolosità da Radon nei tre comuni laziali

Le nuove mappe di estremo dettaglio risultanti dallo studio descritto hanno confermato i dati estrapolati dalla mappa regionale mettendo in evidenza:

- le zone con basso potenziale geogenico di radon nell'area vulcanica dei Colli Albani a sud di Roma;
- le zone a medio ed elevato potenziale geogenico nella parte settentrionale del Lazio, rispettivamente nell'area dei Monti Vulsini e dei Monti Cimini.

Anche i valori medi annuali di radon indoor hanno confermato molto chiaramente le differenze tra i tre comuni. In particolare sono risultati valori massimi a Caprarola, intermedi a Celleno e più bassi a Ciampino (Figura 1).
I risultati di questo studio hanno evidenziato che, nelle aree con potenziale geogenico medio ed alto, è presente una buona corrispondenza tra il contenuto di radionuclidi nelle rocce affioranti, le concentrazioni di radon nel suolo e la presenza di elevati valori di radon indoor. Dalla sovrapposizione dei dati indoor con la mappa del potenziale geogenico del Lazio del 2017 (Figura 2a), è risultato evidente che nelle **zone caratterizzate da un potenziale di radon medio-alto**, (essenzialmente connesse a componenti geologiche) **esiste un'elevata probabilità di**

riscontrare concentrazioni di radon indoor superiori alla soglia di 300 Bq/m^3 consigliata dalla direttiva europea. In questi casi, la dose di esposizione alla radiazione negli edifici a causa del radon indoor è superiore al livello raccomandato. Sono quindi necessarie e/o raccomandate in questi casi alcune azioni di mitigazione.

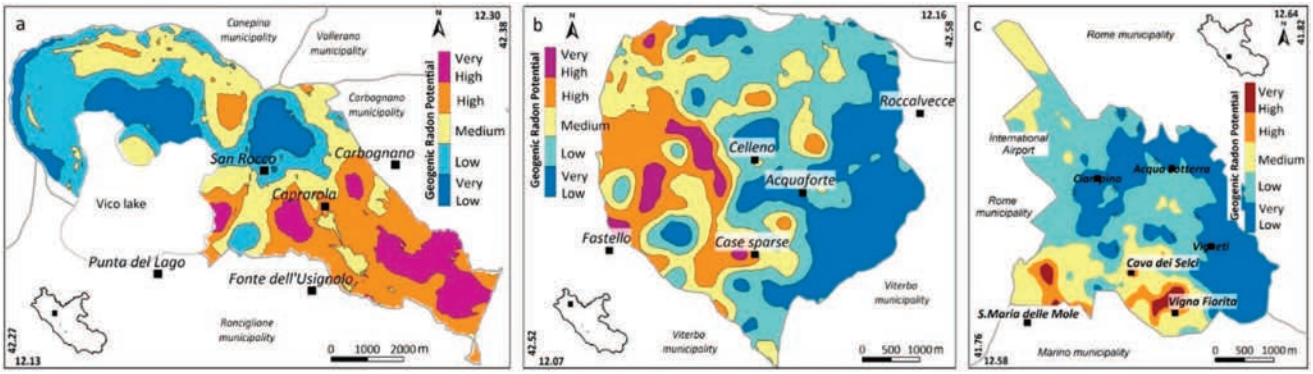


Figura 1 Mappe del Potenziale Geogenico del Radon (GRP) a scala comunale di (a) Caprarola, (b) Celleno e (c) Ciampino elaborate nell'ambito del Progetto LIFE-RESPIRE.

***Figure 1** Maps of the Geogenic Radon Potential (GRP) at the municipal scale of (a) Caprarola, (b) Celleno and (c) Ciampino developed within the LIFE-RESPIRE Project.*

I rischi per la salute

In questo quadro i ricercatori afferenti al progetto hanno condotto una analisi per una prima valutazione del **rischio radiologico connesso all'emissione di radon nelle aree analizzate**. Per prima cosa il team ha effettuato una correlazione tra la mappa del potenziale geogenico di radon del Lazio e la distribuzione dei casi riscontrati di tumore al polmone nella regione (mappe 2a e 2b). Come è evidente nella mappa 2b, il tasso di incidenza dei tumori nelle tre aree analizzate di Celleno, Caprarola e Ciampino ha una buona correlazione con i risultati ottenuti nelle mappe di dettaglio. Zone a medio ed elevato potenziale geogenico corrispondono a zone dove il tasso di incidenza dei tumori è più alto. Ovviamente in zone ad elevata urbanizzazione, come ad esempio il comune di Ciampino, oltre alla componente naturale data dal potenziale geogenico, c'è anche una componente antropica che aumenta il tasso di incidenza ed il rischio per la salute e che va tenuta in considerazione.

Le aree prioritarie di Radon

Le aree individuate in questo studio possono essere considerate come **Aree Prioritarie di Radon** (così come definite nella Direttiva Europea) indicando un metodo efficace per la determinazione delle aree maggiormente soggette al rischio da radon. La procedura andrebbe applicata poi su tutto il territorio nazionale, così come richiesto dalla Direttiva Europea. Le mappe realizzate nell'ambito di progetti di questo tipo hanno un'importante ricaduta nel sociale. Possono infatti fornire indicazioni alle amministrazioni comunali e/o locali utili alla pianificazione territoriale, allo svolgimento delle attività di monitoraggio negli edifici pubblici e nelle scuole. Ma sono utili anche per l'individuazione di sistemi di bonifica ad hoc per la mitigazione del rischio da radon indoor. I risultati ottenuti hanno dimostrato l'importanza di effettuare il monitoraggio di radon a scala comunale al fine di tutelare la salute delle persone nei luoghi di lavoro e nelle proprie abitazioni.

La mappa del potenziale geogenico deve essere utilizzata come punto di partenza per l'identificazione dei siti maggiormente a rischio. Questo approccio metodologico dovrebbe essere applicato su tutto il territorio nazionale, anche per allinearsi alla direttiva europea. Questa prevede infatti che venga effettuato questo tipo di monitoraggio e sarebbe dovuta essere recepita dagli stati membri già dal febbraio 2018.

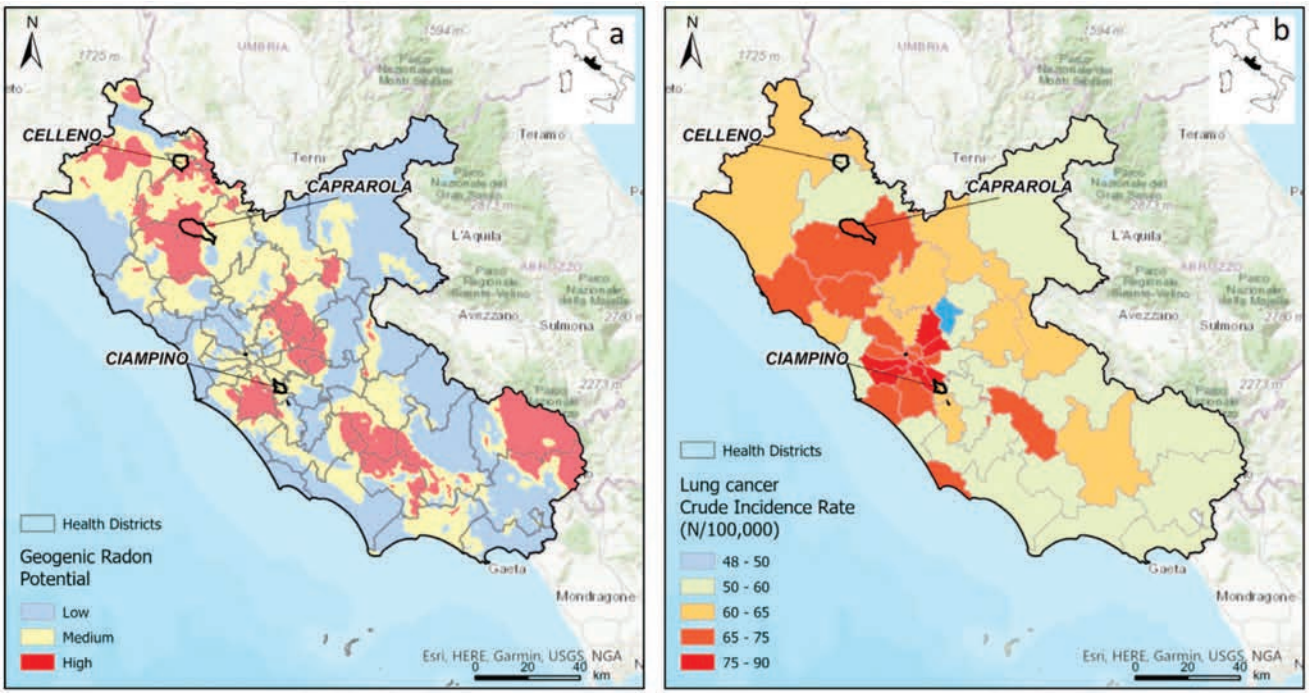


Figura 2 a) Mappa del potenziale geogenico del radon (GRP) della regione Lazio [da Ciotoli et al., 2017] su cui sono riportati i distretti sanitari; b) mappa del tasso di incidenza grezza (CIR) del tumore alla trachea, ai bronchi e al polmone.

***Figure 2** a) Map of the geogenic radon potential (GRP) of the Lazio region [from Ciotoli et al., 2017] showing the health districts; b) map of the crude incidence rate (CIR) of tracheal, bronchial and lung cancer.*

Bibliografia

Ciotoli G., Voltaggio M., Tuccimei P., Soligo M., Pasculli A., Beaubien S.E., Bigi S., (2017). *Geographically weighted regression and geostatistical techniques to construct the geogenic radon potential map of the Lazio region: A methodological proposal for the European Atlas of Natural Radiation*. Journal of Environmental Radioactivity, 166 (2), 355-375, ISSN 0265-931X. https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.010

Giustini F., Ruggiero L., Sciarra A., Beaubien S.E., Graziani S., Galli G., Pizzino L., Tartarello M.C., Lucchetti C., Sirianni P., Tuccimei P., Voltaggio M., Bigi S., Ciotoli G., (2022). *Radon Hazard in Central Italy: Comparison among Areas with Different Geogenic Radon Potential*. Int. J. Environ. Res. Public Health, 19, 666. https://doi.org/10.3390/ijerph19020666

I “preziosi” vulcani del Mar Tirreno: il Marsili e il Palinuro

Luca Cocchi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2

Quando si parla di vulcani sottomarini, il primo pensiero è legato a scene catastrofiche con grandi eruzioni e maremoti distruttivi. Non tutti sanno invece che queste grandi strutture possono essere delle vere e proprie “casseforti”, forzieri ricchi di metalli preziosi. Nel Tirreno meridionale, il Marsili e il Palinuro sono dei veri e propri “tesoretti”, grazie alla presenza di depositi idrotermali di estrema ricchezza.

Nel 2003 il Prof. Peter Rona, considerato il padre dell’oceanografia e geofisica marina, scrisse un breve saggio per la rivista Science dal titolo “*Resources of the Seafloor*” [Rona, 2003]. Due sole pagine, ma estremamente ricche di tutte le conoscenze e scoperte ottenute nei precedenti 40 anni dalla comunità scientifica internazionale riguardo lo straordinario mondo dei fondali oceanici e delle loro risorse minerarie.

Un po’ di storia

I primi studi pionieristici effettuati sui fondali marini hanno inizio negli **anni Sessanta**, grazie al contributo di scienziati provenienti da grandi università americane come il *WHOI*, *Scripps Institution* e la *Columbia University*, tanto per citarne alcune.
L’avvento delle nuove tecnologie di investigazione geofisiche ha permesso di ottenere una cartografia del fondale marino e soprattutto conoscere **le relazioni che intercorrono tra i meccanismi di formazione degli oceani** (tettonica attiva e vulcanismo) **e l’insorgere di strutture di risalita di fluidi mineralizzati**, conosciute con il nome di **camini idrotermali**. Questi ultimi rappresentano fratture della crosta dove risalgono i fluidi mineralizzati alcalini che favoriscono, oltre che la deposizione di materiale polimetallico, anche la formazione di composti organici complessi.
Il ventennio **1960-80** rappresenta un periodo d’oro per la ricerca scientifica marina, con il susseguirsi di nuove scoperte come, ad esempio, la presenza del deposito idrotermale **Atlantis II** [Zierenberg and Shanks, 1983], posto a 2000 metri di profondità nel Mar Rosso e il **TAG** (*TransAtlantic Geotraverse*), un sistema di risalita di fluidi e depositi minerali attivo lungo la dorsale medio atlantica.
Lo studio di queste aree, considerato avveniristico per l’epoca, ha permesso di **ricostruire il meccanismo di formazione dei sistemi idrotermali** e soprattutto il legame di questi con i margini tettonici attivi. Per la prima volta si ha la chiara visione secondo cui i fondali oceanici non rappresentano solo delle zone passive dove vengono raccolti materiali erosi dalle zone continentali, **ma sono delle vere e proprie sorgenti attive dove si formano nuove risorse minerarie.**

I meccanismi di funzionamento

Con questi studi finalmente si ha la possibilità di delineare un **modello evolutivo** della formazione dei depositi idrotermali. L’acqua dei fondali oceanici, fredda e densa, penetra per chilometri all’interno di rocce vulcaniche fratturate, ricche di metalli. In profondità il flusso di acqua viene riscaldato dalle sorgenti magmatiche e risale per differenza di densità trasportando e dissolvendo

alcuni metalli presenti nelle rocce e nei fluidi magmatici. Una volta che il fluido mineralizzato è nuovamente in superficie, i metalli si legano con il solfato presente nell'acqua di mare innescando la precipitazione di solfuri massivi, ovvero depositi di minerali ricchi di metalli quali Zinco (Zn), Rame (Cu), Argento (Ag) e anche Oro (Au).
Se, oltre alla presenza dei depositi ricchi in metalli preziosi, si considerano anche le aree diamantifere dell'offshore Sudafricano e la disseminata presenza di noduli di manganese nei fondali abissali (concrezioni ricche in Manganese, Cobalto, Nichel e Rame, presenti a profondità molto elevate, maggiori di 3.000 metri) si può ben capire quale sia la reale **potenzialità estrattiva ed economica associata ai fondali marini**.
Secondo il gruppo di ricerca internazionale guidato dal canadese M. Hannington, le risorse minerarie celate sotto gli oceani e associate alle zone neovulcaniche sono quantificabili in circa **3×10^7 tonnellate** (Rame e Zinco), valori comparabili a depositi terrestri (1,9 x 10^7 tonnellate). I risultati di questo studio sono stati pubblicati nel 2011 sulla rivista *Geology* [Hannington et al., 2011]. Se si pensa che solo il 30 % dei fondali oceanici è attualmente conosciuto, allora è legittimo pensare che l'**entità di risorse minerarie provenienti dagli oceani possa essere veramente elevata**.

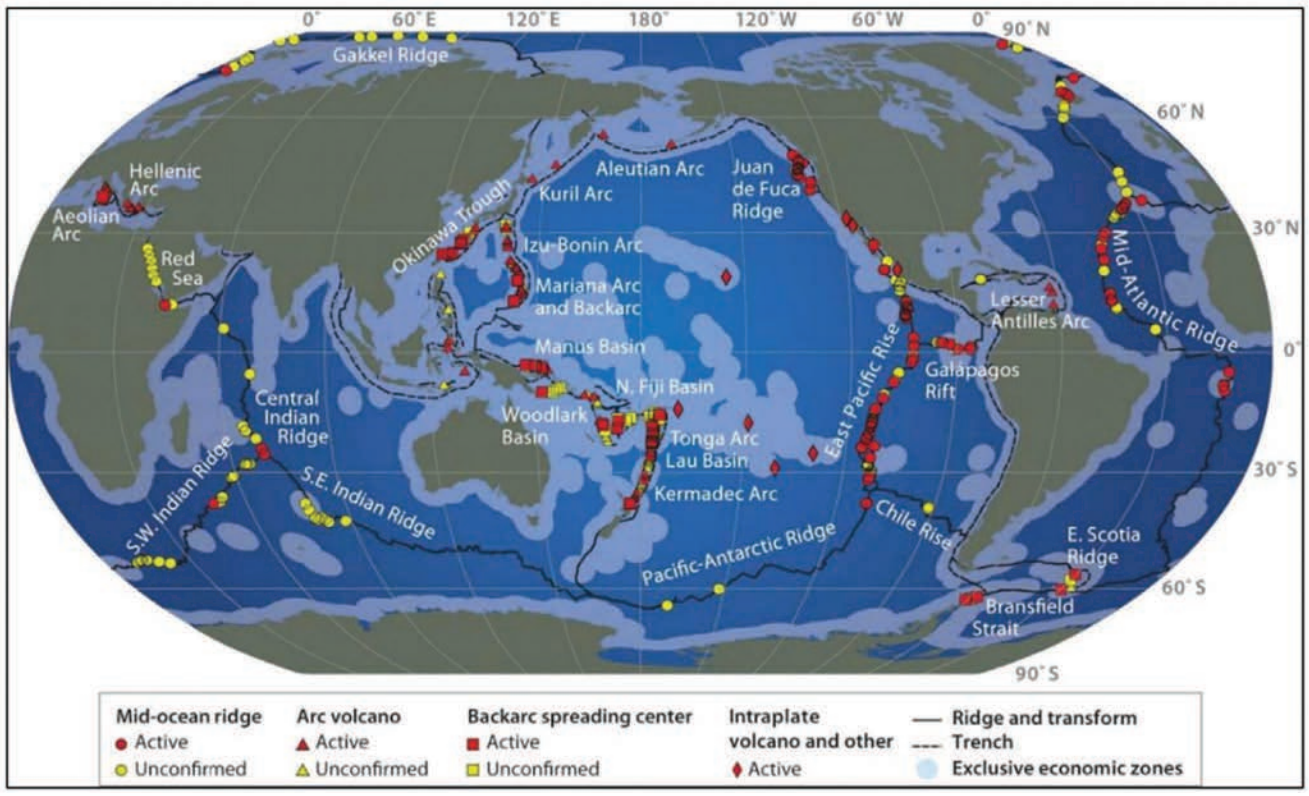


Figura 1 Distribuzione a scala globale di depositi polimetallici disseminati negli oceani.
***Figure 1** Global-scale distribution of polymetallic deposits scattered across the oceans.*

Il Mar Mediterraneo

Sappiamo bene che l'**Italia** è un paese di grandi vulcani attivi come l'**Etna**, il **Vesuvio**, lo **Stromboli** e i **Campi Flegrei.** Non dobbiamo dimenticare però le **grandi strutture vulcaniche presenti anche al di sotto del mare,** soprattutto nel settore Tirrenico meridionale.
In questa porzione di mare, a circa 3.000 metri di profondità, si ergono **due tra le più imponenti strutture vulcaniche del mondo**: il *seamount* **Marsili** e il complesso vulcanico del **Palinuro**.



Figura 2 Posizione del Marsili e del complesso vulcanico del Palinuro nel mar Tirreno (cerchio rosso). (Google Maps)
Figure 2 *Position of the Marsili and the Palinuro volcanic complex in the Tyrrhenian Sea (red circle). (Google Maps)*

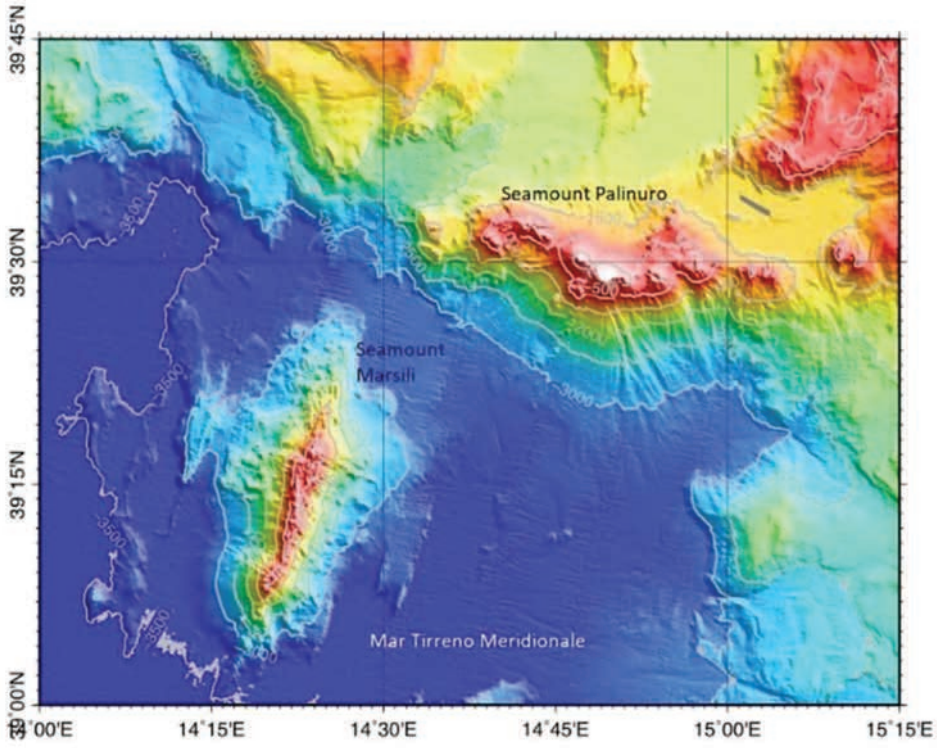


Figura 3 Mappa batimetrica del Marsili e del complesso vulcanico del Palinuro. (Immagine a cura di L. Cocchi. Dati batimetria catalogo EMODnet)
Figure 3 *Bathymetric map of Marsili and the Palinuro volcanic complex. (Image courtesy of L. Cocchi. Bathymetry data from the EMODnet catalog)*

L'edificio del **Marsili** è lungo 60 km (una lunghezza pari a quella che separa Modena da Parma) e largo 30 km [Cocchi et al., 2009].

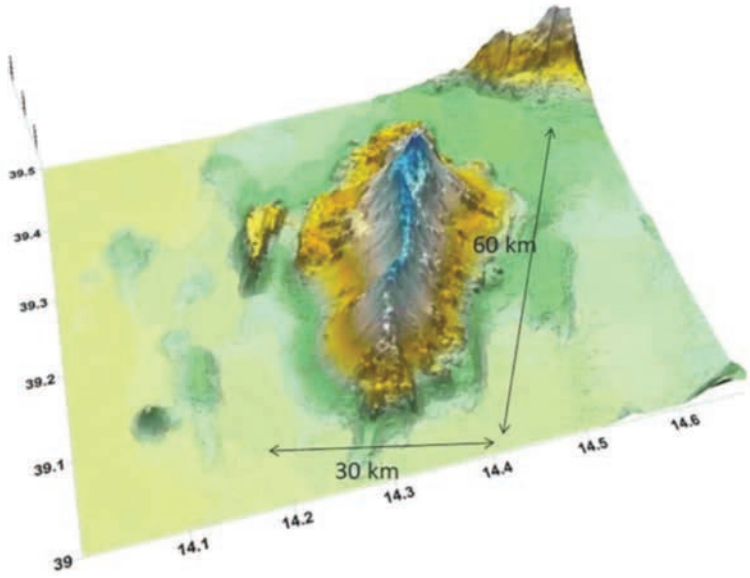


Figura 4 Batimetria 3D del Marsili.
Figure 4 *3D bathymetry of the Marsili seamount.*

Il **Palinuro** è costituito da più edifici vulcanici e coni secondari che creano una struttura complessa di quasi 90 km di lunghezza. Questi due giganti sottomarini hanno avuto in passato un'attività vulcanica imponente. Rivestono un grande interesse nell'opinione pubblica, forse grazie a quel velo di mistero tipico di tutti gli oggetti nascosti in fondo al mare.

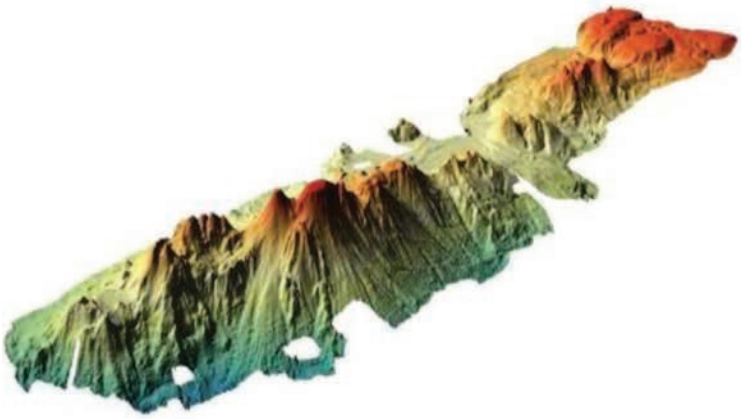


Figura 5 Modello 3D della batimetria del Palinuro e settore orientale. (Da Cocchi et al. [2017])
Figure 5 *3D model of the bathymetry of Palinuro and the eastern sector. (From Cocchi et al. [2017])*

L'idrotermalismo

Spesso si parla di questi due enormi vulcani come **possibili generatori di eruzioni** e catastrofici maremoti. Non tutti sanno però che questi due vulcani, **sono aree interessate da un idrotermalismo molto sviluppato.** Lo stesso si verifica in altre strutture più piccole disseminate lungo l'arco delle Isole Eolie. Ad esse è anche associata una realtà biologico-faunistica di straordinaria importanza. La cresta del Marsili è caratterizzata da una vasta prateria di camini idrotermali, per la maggior parte estinti. Alcuni studi di un team di ricercatori INGV sugli studi sul tremore del vulcano hanno evidenziato la presenza di sorgenti idrotermali ancora attive [D'Alessandro et al., 2009].
Il Palinuro è forse il vulcano più "ricco" del panorama italiano. A 600 metri di profondità è localizzato uno sviluppato deposito idrotermale a Barite e Pirite prevalente [Cocchi et al., 2021].

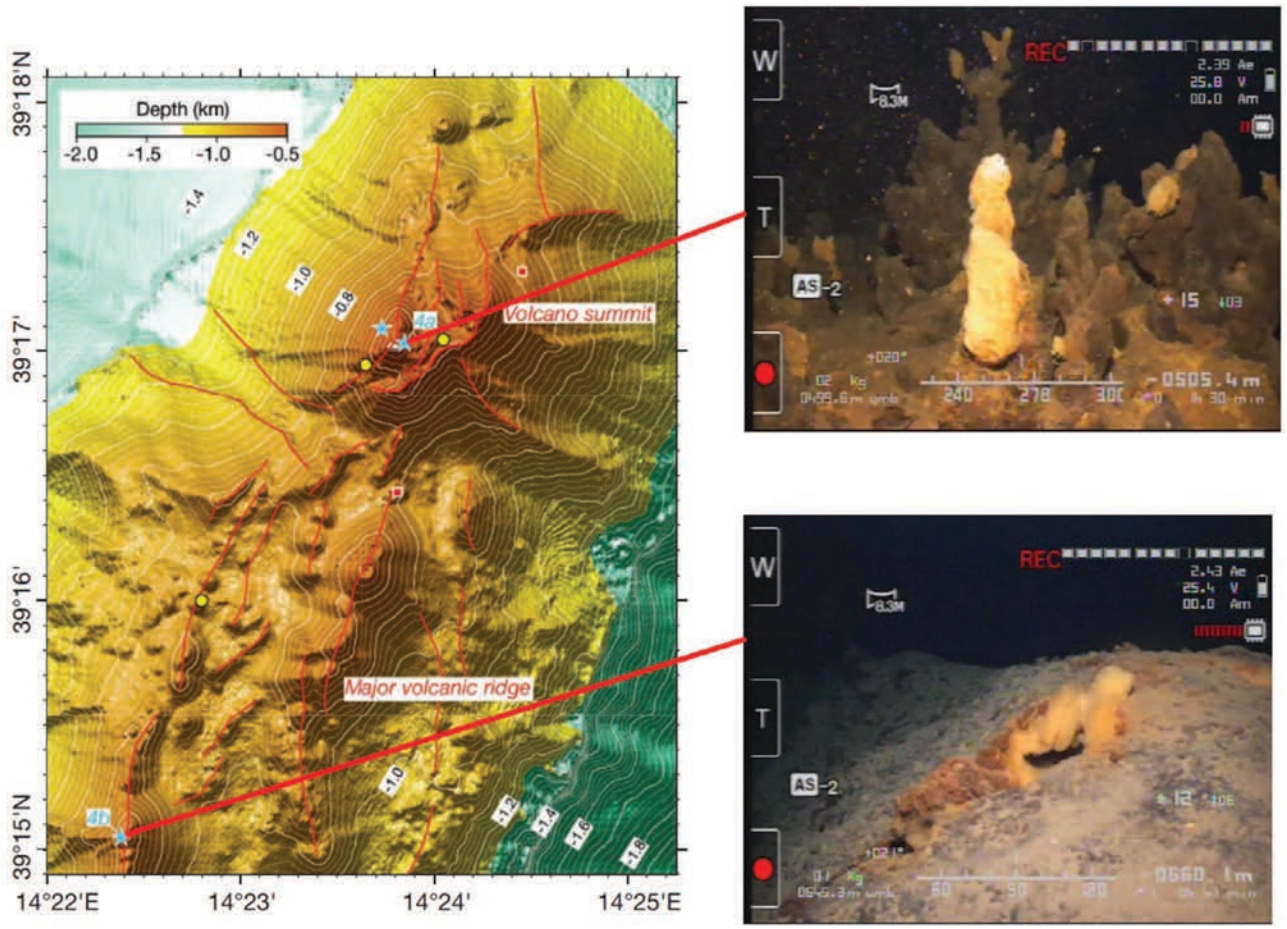


Figura 6 Particolare della cresta del Marsili e riprese ROV dei prodotti idrotermali. (Crediti INGV)
Figure 6 *Detail of the Marsili ridge and ROV footage of hydrothermal products. (Credits INGV)*

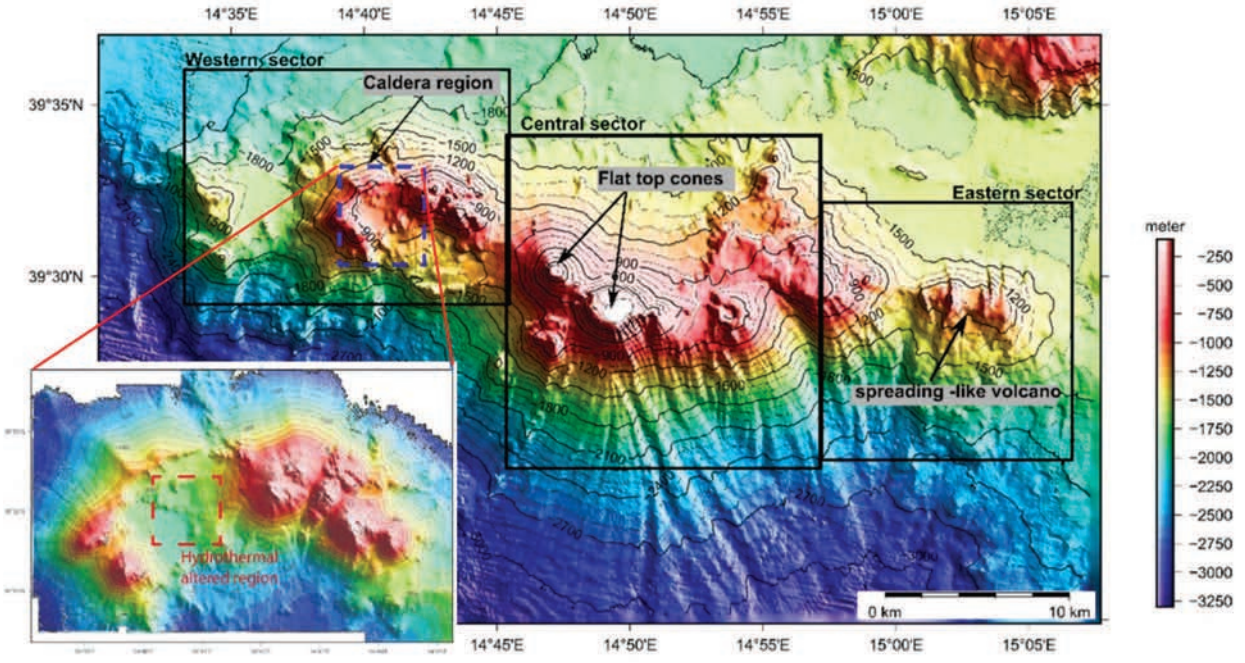


Figura 7 Modello digitale del terreno del complesso vulcanico del Palinuro e particolare della porzione centrale della caldera. Il riquadro in rosso identifica l'area caratterizzata da attività idrotermale. (Crediti INGV)
Figure 7 *Digital terrain model of the Palinuro volcanic complex and detail of the central portion of the caldera. The red box identifies the area characterized by hydrothermal activity. (Credits INGV)*

È situato all'interno di una caldera a forma di anfiteatro, quasi a ricordare una cinta muraria tipica delle città medievali.
Scoperto agli inizi degli anni Ottanta grazie alle prime investigazioni dei fondali marini finanziate dalla società petrolifera di bandiera, il deposito idrotermale del Palinuro è **caratterizzato dalla presenza di metalli preziosi come Rame, Bario, Argento, Piombo** (1,6% Cu, 2,8 % Zn, 1,9% Pb, 0,39 ppm Au, e 130 ppm Ag) in percentuali economicamente rilevanti.
A partire dagli anni 2000, il Palinuro è stato oggetto di un susseguirsi di investigazioni proprio per il suo peculiare arricchimento in metalli preziosi. **Fortunatamente ad oggi l'interesse di questi siti è solamente di tipo scientifico**, ma in futuro potrebbero essere oggetto di investimenti industriali. L'auspicio è quello di continuare ad esplorare e aumentare le conoscenze dei fondali marini e della loro ricchezza, senza creare danni per l'ambiente. Un po' come i grandi esploratori che di fronte a relitti adagiati sul fondale marino per centinaia di anni si sono limitati a raccontarne la storia, preservandone i siti a futura memoria. Ricordandosi che la conoscenza è la forma di ricchezza più importante.

Bibliografia

Cocchi L., Caratori Tontini F., Muccini F., Marani M.P., Bortoluzzi G., Carmisciano C., (2009). *Chronology of the transition from a spreading ridge to an accretional seamount in the Marsili backarc basin (Tyrrhenian Sea)*. Terra Nova 2009, 21, 369–374. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2009.00891.x

Cocchi L., Passaro S., Caratori Tontini F., Ventura G., (2017). *Volcanism in slab tear faults is larger than in island-arcs and back-arcs*. Nat. Commun., 8, 1451. https://doi.org/10.1038/s41467-017-01626-w

Cocchi L., Caratori Tontini F., Muccini F., de Ronde C.E.J., (2021). *Magnetic Expression of Hydrothermal Systems Hosted by Submarine Calderas in Subduction Settings: Examples from the Palinuro and Brothers Volcanoes*. Geosciences, 11, 504. https://doi.org/10.3390/geosciences11120504

D'Alessandro A., D'Anna G., Luzio D., & Mangano G., (2009). *The INGV's new OBS/H: analysis of the signals recorded at the Marsili submarine volcano*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 183(1-2), 17-29. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.02.008

Hannington M., Jamieson J., Monecke T., Petersen S., Beaulieu, S., (2011). *The abundance of seafloor massive sulfide deposits*. Geology, 39, 1155–1158. https://doi.org/10.1130/G32468.1

Rona P.A., (2003). *Resources of the sea floor*. Science, 299, 673–674. http://doi.org/10.1126/science.1080679

Zierenberg R.A., Shanks W.C., (1983). Mineralogy and geochemistry of epigenetic features in metalliferous sediment, Atlantis II Deep, Red Sea. Economic Geology, 78 (1): 57–72. doi: https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.1.57

Quando il vulcano ci nutre

Salvatore Giammanco

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Etneo

Le eruzioni vulcaniche violente possono causare gravi distruzioni e danni ingenti per la salute e la vita umana. Tuttavia, anche se può sembrare un paradosso, il vulcano ci nutre proprio attraverso le eruzioni fornendoci il nutrimento necessario per la nostra stessa esistenza.



Figura 1 Colonna eruttiva di ceneri dall'Etna durante il parossismo del 21 febbraio 2022. (Foto di S. Giammanco)
Figure 1 *Eruptive ash column from Mt. Etna during the 21 February, 2022 paroxysm. (Photo by S. Giammanco)*

I vulcani immettono nell'ambiente quasi quotidianamente elementi chimici utili, se non necessari, per la vita. Dire quindi che "il vulcano ci nutre" ha il suo senso e non è casuale se oggi centinaia di milioni di persone popolano aree vulcaniche attive esponendosi in alcuni casi a rischi elevati. A titolo di esempio, nella cosiddetta Area Rossa attorno al Vesuvio risiedono circa 700.000 abitanti. La domanda che spesso viene posta a noi vulcanologi è: "Perché la gente vuole vivere su un vulcano attivo e potenzialmente pericoloso?"
La risposta è molto semplice: il fattore principale che porta gli uomini a vivere su un vulcano attivo è l'eccezionale fertilità del suolo vulcanico. Sui vulcani il suolo è prodotto essenzialmente dall'alterazione chimico-fisica delle rocce laviche e dei materiali piroclastici depositati dall'attività esplosiva da parte dell'acqua piovana. Il suolo così formatosi permette una maggiore produttività agricola unita ad una superiore qualità dei prodotti della terra; basti pensare agli ottimi vini prodotti da uve coltivate nelle aree del Vesuvio e dell'Etna

I nutrienti dal vulcano

La lava, e più in generale tutti quelli che vengono chiamati prodotti eruttivi, è infatti ricca di tanti minerali diversi che a loro volta contengono grandi quantità e varietà di elementi chimici fondamentali per l'ecosistema e più in particolare per la biosfera terrestre.

C'è però anche un apporto più diretto di "nutrienti" che avviene sia attraverso la pioggia arricchita di elementi catturati nel pennacchio gassoso del vulcano sia attraverso la ricaduta di cenere vulcanica sulla superficie terrestre o marina. Nel primo caso, le goccioline di pioggia agiscono come dei veri e propri spazzini del cielo, poiché intrappolano particelle di aerosol presenti nel pennacchio vulcanico. Queste particelle si formano per condensazione di alogenuri e solfati prodotti dal degassamento magmatico, hanno dimensioni inferiori al micron e sono arricchite in elementi volatili, soprattutto metalli. Tra i più abbondanti vi sono: oro, boro, bismuto, cadmio, cloro, fluoro, mercurio, zolfo, antimonio, selenio e tallio.



Figura 2 Esempio dei tipici ed estesi terrazzamenti coltivati a vigna su terreno vulcanico dell'Etna. (Foto di S. Giammanco)
Figure 2 *Example of the typical and extensive terraces cultivated with vines on the volcanic soil of Etna. (Photo by S. Giammanco)*

Tuttavia, nel caso dell'Etna, il vulcano attivo più alto in Europa, la quantità di elementi catturati dalla pioggia locale rappresenta solo una minima parte, stimata tra lo 0,1 % e il 5 %, della quantità totale emessa dal vulcano. La maggior parte degli elementi presenti nelle emissioni crateriche del vulcano non ricade infatti sulle sue pendici, ma viene trasportata a grandi distanze dalle correnti d'aria in alta quota e dispersa a scala regionale, continentale o addirittura globale. La quantità di elementi apportati dalla pioggia è tale da modificare in modo significativo la composizione chimica dei suoli e delle acque di falda del vulcano, che in tal modo si arricchiscono di sostanze molto spesso utili e nutritive per la vita vegetale e animale.
All'apporto di nutrienti legato alle piogge si aggiunge quello legato alle ceneri vulcaniche, che agiscono in modo analogo intrappolando grandi quantità di aerosol all'interno dei vacuoli dei singoli granuli. L'Etna è un vulcano che emette grandi quantità di ceneri in atmosfera, soprattutto durante fasi eruttive parossistiche. Ogni volta che ciò avviene, la frazione più grossolana di questi materiali ricade sulla superficie stessa del vulcano, mentre la porzione più fine viene trasportata dai venti di alta quota ricadendo in aree anche molto distanti dai crateri.

Come per l'emissione di aerosol trasportati dalle correnti di alta quota, anche l'emissione di cenere vulcanica è un evento che ha un impatto a livello non solo locale ma anche regionale e talora continentale. Non è raro, inoltre, che la ricaduta di ceneri vulcaniche fini avvenga sulla superficie marina, in quanto i venti dominanti spirano soprattutto verso il quadrante sud- est del vulcano e quindi verso il mare Ionio.

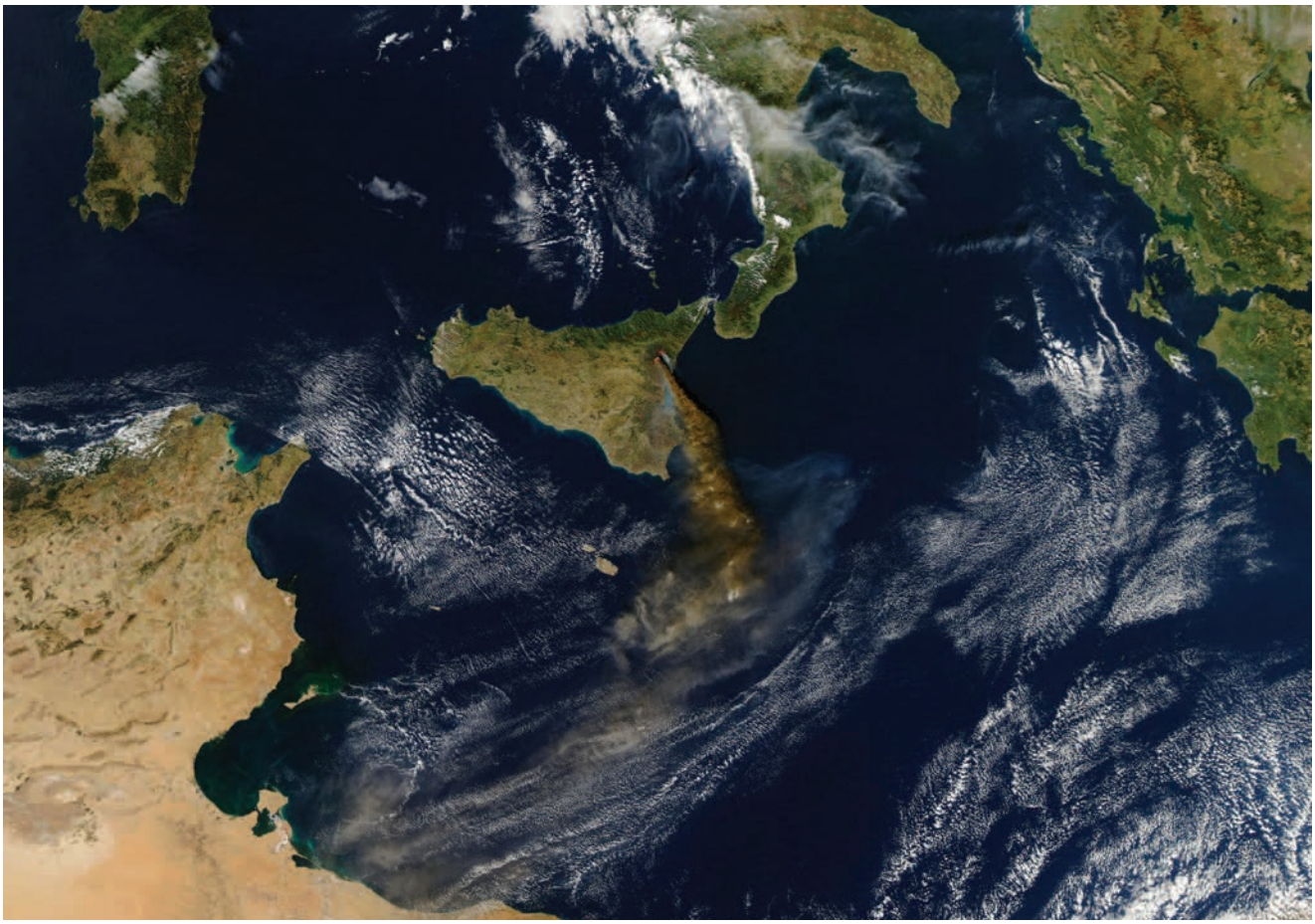


Figura 3 Immagine in veri colori del pennacchio eruttivo dell'Etna presa il 29 Ottobre 2002 dal satellite Aqua (NASA) mediante tecnica MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) che mostra la dispersione di ceneri vulcaniche sopra il mare Ionio e parte del Canale di Sicilia. (Crediti: Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team at NASA/GSFC)

***Figure 3** True color image of Etna's eruptive plume taken on 29 October 2002 by the Aqua satellite (NASA) using the MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) technique, which shows the dispersion of volcanic ash over the Ionian Sea and part of the Sicily Channel. (Credits: Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team at NASA/GSFC)*

Particelle e salute

La maggior parte delle particelle solide di origine vulcanica che ricadono è costituita dai cosiddetti PM10 e PM2.5; sigle ben note in quanto definiscono dimensioni di particolato aeriforme considerate dannose per la salute umana secondo il D. Lgs. 155/2010. Gli studiosi hanno analizzato queste particelle al microscopio a scansione elettronica e tramite spettroscopia a raggi X. I risultati hanno mostrato un'eccezionale varietà di aerosol micro-cristallini, riconducibili a ossidi di ferro e titanio, sali solubili (solfati, cloruri e fluoruri) e particelle poligeniche (per lo più frammenti di vetro vulcanico).

Ulteriori analisi di laboratorio sui campioni di cenere vulcanica, mediante lisciviazione dei loro componenti solubili a contatto di acqua di mare, hanno mostrato altri interessanti aspetti. Dopo anche un breve contatto con acqua di mare, le ceneri vulcaniche dell'Etna rilasciano macro-nutrienti e metalli in traccia che diventano bio-disponibili per il fitoplancton marino.
Il fitoplancton "risponde" all'apporto di nutrienti in un paio di giorni e fino a qualche settimana con una fioritura più intensa



Figura 4 Immagine dei crateri sommitali dell'Etna in fase di degassamento non-eruttivo. (Foto di S. Giammanco)
Figure 4 *Image of Etna's summit craters during a non-eruptive degassing phase. (Photo by S. Giammanco)*

Le stime sulla ricaduta di cenere vulcanica mostrano che la presenza di tali particelle può essere rilevata fino a 800 km dalla sorgente vulcanica. Questo produce un impatto sulla quantità di nutrienti forniti al mare che risulta importante fino a centinaia di chilometri dal vulcano. In particolare, nutrienti fondamentali per l'ecosistema marino mediterraneo (quali l'azoto, il fosforo, la silice, il ferro e lo zinco) possono incidere sulla produttività primaria del mare fino a distanze di 700 km dall'Etna. Occorre considerare che il Mediterraneo è in genere un mare povero in nutrienti, quindi il loro apporto da parte del vulcano risulta in questo senso provvidenziale.
Negli ultimi decenni l'attività dell'Etna è stata caratterizzata da sempre più frequenti eruzioni con rilascio di ceneri vulcaniche. Soltanto tra il 1995 ed il 2018 sono avvenuti più di cento episodi eruttivi di questo tipo. È dunque probabile che, almeno nel prossimo futuro, il loro impatto biogeochimico sull'ecosistema locale e regionale aumenterà.
Appare chiara l'importanza del ruolo svolto dall'INGV nello studio e nel monitoraggio delle emissioni gassose e solide dell'Etna, ma anche degli altri vulcani attivi d'Italia che presentano emissioni di questo tipo (si pensi a Stromboli, a Vulcano, ai Campi Flegrei). La migliore conoscenza di come i nostri vulcani interagiscono con l'ambiente e con l'uomo ci porterà a capire sempre di più quanto noi siamo dipendenti da essi e quanto a loro dovremmo essere grati per ciò che di positivo ci danno quotidianamente.

Vulcani di fango: il fango dalle viscere della terra

Alessandra Sciarra e Tullio Ricci

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

L'affascinante mondo dei vulcani di fango, dalle loro umili origini fino alle maestose formazioni che dominano la geografia terrestre, un viaggio attraverso le loro intricanti origini, le loro imponenti dimensioni e il mistero che li avvolge, svelando segreti nascosti della Terra.



Figura 1 Riserva Naturale delle Salse di Nirano. (Foto di A. Sciarra)
Figure 1 *Salse di Nirano Nature Riserve. (Photo by A. Sciarra)*

I **vulcani di fango** sono strutture geologiche caratterizzate dalla fuoriuscita di argilla mista ad una miscela di acqua e gas. In genere sono di dimensioni contenute, piccole collinette o laghetti (classico esempio le Salse di Nirano in provincia di Modena, https://www.visitmodena.it/it/informazioni-turistiche/scopri-il-territorio/ambiente-e-natura/ parchi-riserve-naturali/riserva-naturale-delle-salse-di-nirano), ma a volte possono raggiungere dimensioni ragguardevoli con larghezze alla base fino a 10 km ed altezze di centinaia di metri, come ad esempio Turaghai in Azerbaijan oppure Lusi, in Indonesia, https://scienze.fanpage.it/lusi-l-eruzione-di-fango-piu-grande-del-mondo-non-e-piu-un-mistero-e-causata-da-un-vulcano/.

Dove si trovano i vulcani di fango?

I vulcani di fango rappresentano un fenomeno ancora poco noto anche se estremamente diffuso sia sulla Terra che in mare, e si ritiene che questo genere di vulcani possano essere presenti addirittura su **Marte**. Questo fenomeno si riscontra soprattutto in prossimità di **zone di subduzione**, dove la crosta terrestre è soggetta a compressione. La maggiore concentrazione al mondo di vulcani di fango è in **Azerbaijan**, dove se ne contano oltre 400, circa un terzo dei vulcani di fango noti in tutto il mondo.

In Italia questo fenomeno, noto anche come vulcanismo sedimentario (per distinguerlo da quello più caldo di origine magmatica), è abbastanza frequente. I vulcani di fango sono infatti presenti da nord a sud lungo tutto l'**Appennino**, nelle aree soggette a compressione, e le manifestazioni più spettacolari si trovano in **Emilia Romagna e in Sicilia**. Recentemente, i vulcani di fango di Monteleone di Fermo e Santa Vittoria in Matenano, nelle Marche, hanno aumentato la loro attività in seguito al sisma (M 6.5) avvenuto a Norcia il 30 ottobre 2016 nel corso della sequenza sismica in Italia centrale (vedi anche un nostro contributo qui: https://ingvterremoti.com/2016/11/11/sequenza-sismica-in-italia-centrale-i-vulcanelli-di-fango-in-provincia-di-fermo/).



Figura 2 Distesa di vulcani di fango in Azerbaijan. (Foto di A. Sciarra)
Figure 2 *Mud volcanoes in Azerbaijan. (Photo by A. Sciarra)*

Da cosa dipende la forma dei vulcani di fango?

La morfologia dei vulcani di fango dipende essenzialmente dalle caratteristiche del fango che viene emesso, dalla viscosità, dalla pressione interstiziale, oltre che dalla topografia dell'area. Infatti, anche se la maggior parte dei vulcani di fango ha la tipica forma conica, essi possono avere una geometria variabile.
La loro evoluzione morfologica, invece, è connessa all'**azione erosiva** degli agenti esogeni e talvolta all'intervento dell'uomo. I vulcani di fango, infatti, essendo costituiti prevalentemente da argille, subiscono drenaggio, essiccamento e formazione di fratture facilitando i processi erosivi legati alle precipitazioni. Inoltre, le emissioni dai vulcani di fango non sono mai localizzate esclusivamente in corrispondenza del condotto principale, ma sono distribuite più o meno irregolarmente in aree anche distanti dalla sommità. Spesso sui fianchi dell'edificio principale sono presenti dei coni di dimensioni più contenute, denominati grifoni.

Ma da dove arriva tutto questo fango?

Uno dei requisiti fondamentali per la formazione dei vulcani di fango è la presenza in profondità di **abbondanti quantità di sedimenti** fini e poco consolidati, caratterizzati quindi da una densità minore rispetto alle rocce sovrastanti. Questa differenza di densità permette la risalita di argille, acqua e gas verso la superficie. Il peso delle rocce sovrastanti, la cosiddetta pressione litostatica (dal gr. litos "pietra", "roccia"), dovuta al peso delle rocce, produce un aumento della pressione in profondità che genera a sua volta la migrazione dei fluidi (liquidi e gas), presenti nei sedimenti. Questi fluidi devono la loro presenza in profondità a condizioni di rapida ed abbondante sedimentazione che non permette la totale espulsione dei fluidi interstiziali, ossia i fluidi presenti negli spazi vuoti tra le particelle.

Quale è il "motore" dei vulcani di fango?

In natura esistono vari meccanismi in grado di produrre un aumento della pressione interstiziale tale da generare la formazione di un vulcano di fango. Tra queste abbiamo già citato le spinte tettoniche che avvengono nelle zone soggette a compressione. Altri processi che portano ad un aumento della pressione nei pori sono la deidratazione delle argille e la formazione di idrocarburi. Gli idrocarburi gassosi, come il **metano**, migrando dalla zona di produzione verso la superficie vengono sottoposti ad una separazione in funzione delle caratteristiche molecolari. Il metano, essendo dotato di una massa molto minore rispetto agli altri idrocarburi, raggiunge la superficie più velocemente. Quando questo avviene, il materiale sepolto e non consolidato tende a risalire fino a raggiungere la superficie, dando origine a vere e proprie colate che possono essere accompagnate da fontane di fango e da violente esplosioni di gas.



Figura 3 Emissione di gas da un vulcano di fango nel Mar Tirreno. (Foto di A. Sciarra)
Figure 3 *Gas emission from a mud volcano in the Tyrrhenian Sea. (Photo by A. Sciarra)*

A causa delle emissioni di fango, gas e acque saline, il terreno circostante i vulcani di fango è generalmente poco fertile e spesso caratterizzato dalla presenza di specie vegetali *alofite*, piante adattate all'insediamento su terreni salini o salmastri, che crescono concentricamente al cono principale.

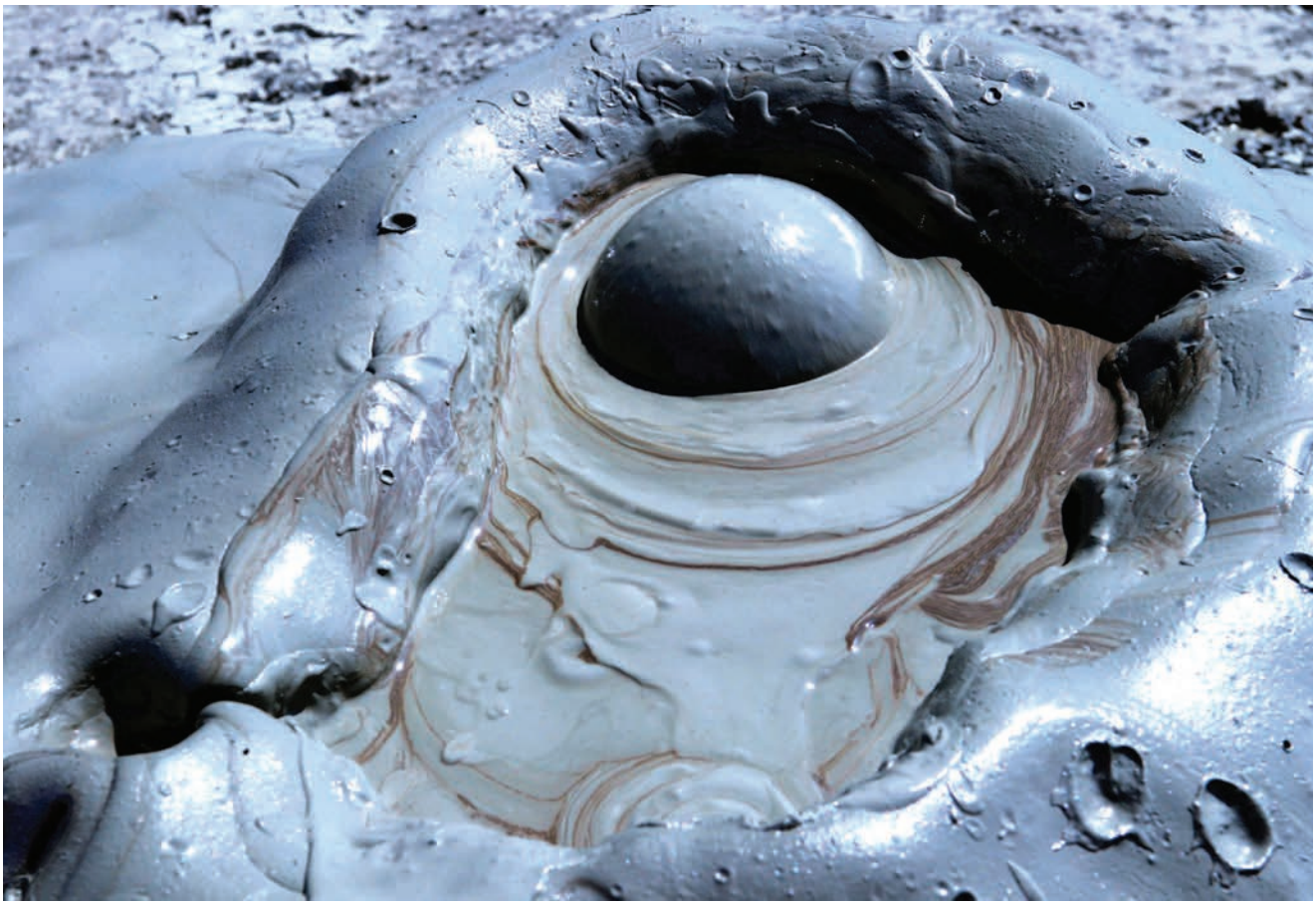


Figura 4 Dettaglio delle bolle di gas che fuoriescono da un vulcano di fango in Azerbaijan. (Foto di A. Sciarra)
Figure 4 *Detail of gas bubbles escaping from a mud volcano in Azerbaijan. (Photo by A. Sciarra)*

Bibliografia

Del Gaudio P., Misiti V., Cantucci B., Liotta M., Ventura G., Ricci T., Sciarra A., Di Naccio D., Amoroso S., Monaco P., (2023). *Multidisciplinary Study of Mud Emissions Following the 2016 Norcia Earthquake*. Applied Sciences, 13, 6968. https://doi.org/10.3390/ app13126968

Mazzini A., Akhmanov G., Manga M., Sciarra A., Huseynova A., Huseynov A., Guliyev I., (2021). *Explosive mud volcano eruptions and rafting of mud breccia blocks*. Earth and Planetary Science Letters, 555, 116699 https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.11669

Sciarra A., Cantucci B., Castaldini D., Procesi M., Conventi M., (2015). *Between history, work and passion: medieval castle, mud volcanoes and Ferrari*. Geological Field Trip, 7(1.1), 42. https://doi.org/10.3301/GFT.2015.01

Sciarra A., Cantucci B., Ricci T., Tomonaga Y., Mazzini A., (2019). *Geochemical characterization of the Nirano mud volcano, Italy*. Appl. Geochem., 102, 77-87. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.01.006

Impariamo a conoscere l'energia geotermica e l'uso che se ne può fare

Monia Procesi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

Il calore contenuto all'interno della Terra è un'importante risorsa. Lo intuirono già i nostri antenati nei primi anni del '900. Oggi questo tipo di fonte energetica, definita rinnovabile sulla scala dei tempi umani, è ancora più preziosa vista la necessità di impiegare sempre di più energie pulite e sostenibili.

Tra le colline della **Val di Cecina** e in particolare a Sasso Pisano, poco distante da **Larderello** in provincia di Pisa, si produce **birra** grazie all'energia geotermica. Il birrificio usa in tutte le fasi di produzione della birra acqua calda a 135°C circa proveniente dal vapore geotermico della vicina centrale Sasso 2. Questo tipo di utilizzo della risorsa geotermica rappresenta un uso diretto, dove il calore dell'acqua calda è infatti direttamente utilizzato in un processo produttivo ben specifico. Tra gli usi diretti dell'energia geotermica possiamo anche ricordare l'impiego di acqua calda nella **coltivazione di fiori e piante** da foglia come testimoniato dalle serre del Monte Amiata, nel riscaldamento delle abitazioni (teleriscaldamento) come nel caso di Ferrara e nella balneologia termale di cui anche i nostri avi furono grandi utilizzatori.

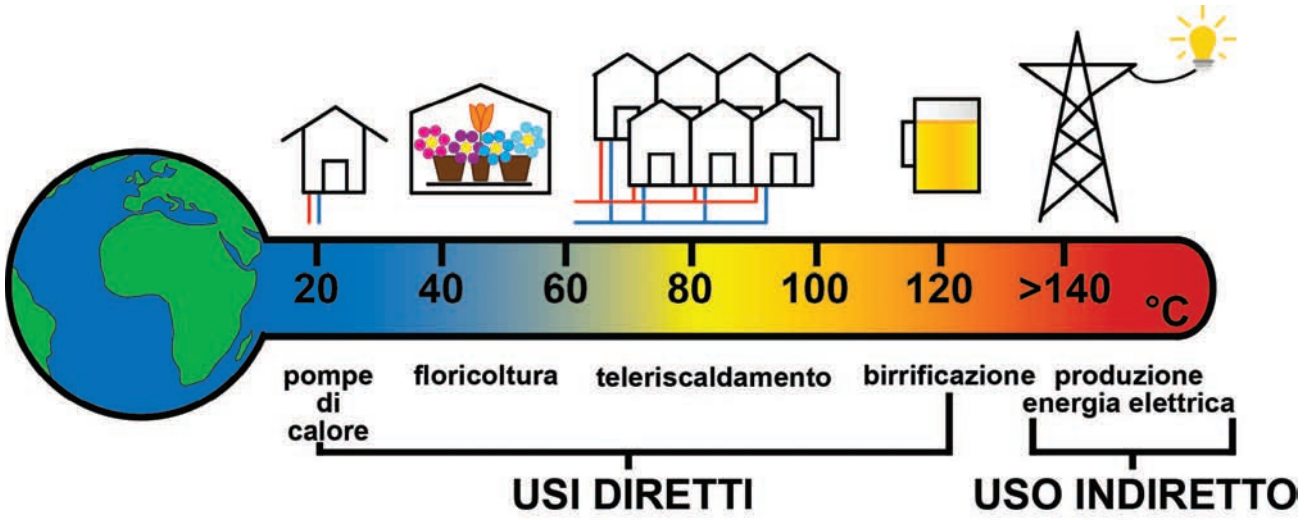


Figura 1 Alcuni possibili usi delle risorse geotermiche in funzione della loro temperatura. È utile sapere che, generalmente, le risorse vengono classificate in risorse di bassa, media e alta temperatura sottintendendo rispettivamente i seguenti ranges: inferiore a 100°C, tra 100 e 150°C e maggiore di 150°C. (Grafica di M. Procesi)

***Figure 1** Some possible uses of geothermal resources depending on their temperature. It is useful to know that, generally, resources are classified into low, medium and high temperature resources respectively implying the following ranges: less than 100°C, between 100 and 150°C and greater than 150°C. (Graphics by by M. Procesi)*

In alcuni casi, non si utilizza vapore o acqua, bensì il calore del terreno. È questo un impiego relativamente recente, riguarda il campo della climatizzazione e prevede l'uso di pompe di calore che permettono di prelevare calore dal terreno in inverno, per riscaldare l'abitazione e di

immetterlo in estate, per poterla raffrescare. Le pompe di calore sono quindi dispositivi che possono trasferire energia termica da un corpo a temperatura più bassa a un corpo a temperatura più alta.
La produzione di birra, quindi, è solo uno dei tanti ambiti in cui una risorsa geotermica può essere impiegata. Ricordate la centrale Sasso 2 da cui deriva il vapore geotermico che permette l'ammostatura dei malti? Questa centrale, nata nel 1959 e ristrutturata nel 2009, grazie all'uso del vapore geotermico riesce a produrre energia elettrica (uso indiretto della risorsa geotermica) soddisfacendo così il fabbisogno energetico di migliaia di famiglie toscane, risparmiando sull'uso dei combustibili fossili e riducendo le emissioni in atmosfera di gas serra.

Come è possibile produrre energia elettrica dal vapore?

Il vapore, attraverso dei pozzi risale in superficie da un serbatoio profondo (rocce ricche in fluidi) posto a migliaia di metri di profondità, arriva alle turbine generando energia meccanica che grazie ad alternatori viene poi trasformata in energia elettrica. L'acqua prodotta dalla condensazione viene quindi re-immessa nel sottosuolo seguendo protocolli ben specifici. In genere, questi serbatoi profondi hanno temperature superiori ai 200°C e sono estremamente ricchi in vapore (**sistemi geotermici a vapore dominante**).
A temperature inferiori (temperature comprese tra 100 e 200°C circa) possiamo invece trovare sistemi geotermici a liquido dominante dove il fluido nel serbatoio è quasi totalmente acqua calda e in minima parte vapore. In questo caso è l'acqua che risale dai pozzi, arriva in superficie e per depressurizzazione produce vapore (processo di flash) che seguendo il processo descritto in precedenza viene poi convertito in energia elettrica.

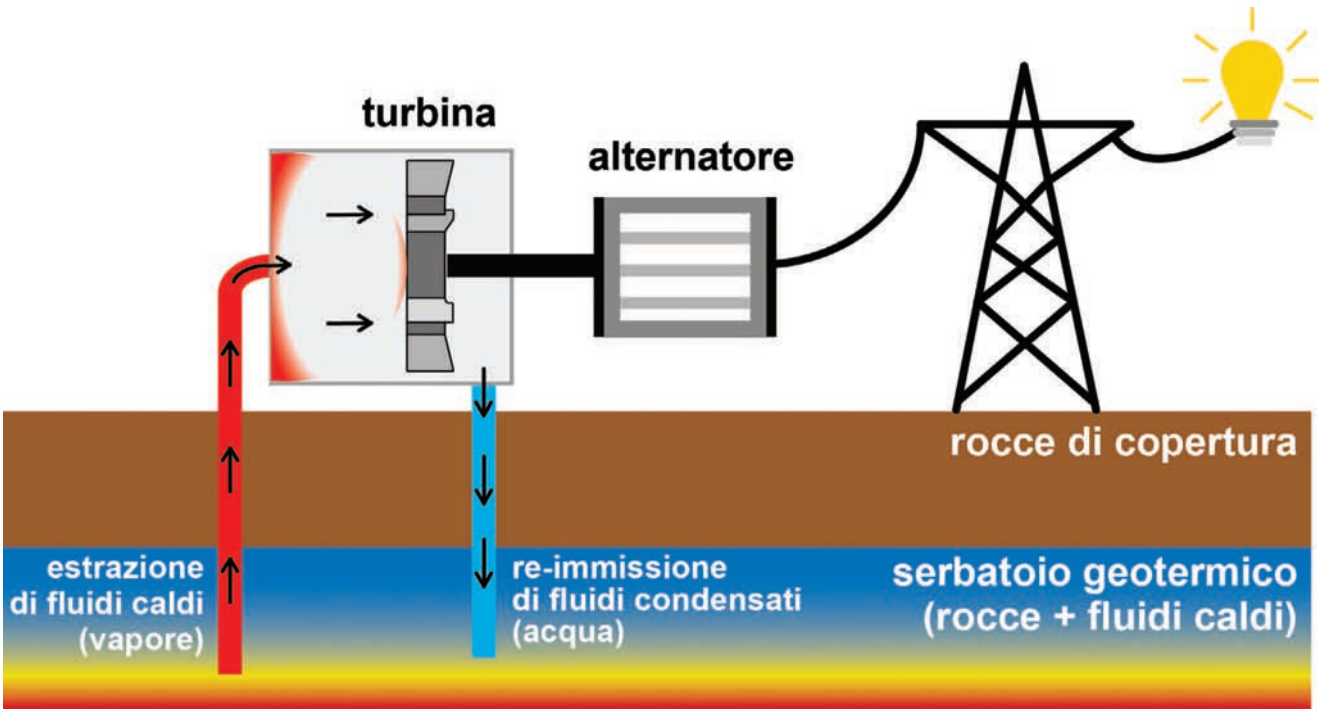


Figura 2 Schema semplificato di un impianto geotermico (tipo dry steam) che produce energia elettrica utilizzando il vapore. Immagine non in scala. (Grafica di M. Procesi)
Figure 2 *Simplified diagram of a geothermal plant (dry steam type) that produces electricity using steam. Image not to scale. (Graphics by M. Procesi)*

Da dove viene il calore che genera acqua calda e vapore?

Proviene da sotto i nostri piedi ossia dall'interno della Terra. Nella crosta terrestre, fino alle profondità raggiungibili con le moderne tecnologie (inferiori ai 10 km), la temperatura aumenta con la profondità generalmente di circa 30°C ogni 1.000 metri. Scendendo verso il nucleo le temperature possono superare anche i 5.000°C. Le principali sorgenti di calore sono il decadimento radioattivo degli elementi presenti al suo interno e secondariamente il calore primordiale residuale legato al processo di accrezione planetaria. Nella crosta terrestre, a volte, si possono registrare gradienti termici decisamente anomali dove la temperatura aumenta anche di 150°C ogni 1.000 metri. In questi casi è presente una sorgente di calore aggiuntiva rappresentata dai corpi magmatici. È questo il caso delle aree in cui troviamo i sistemi geotermici convenzionali (o idrotermali), di cui abbiamo parlato poco prima e dai cui si può ricavare energia elettrica.

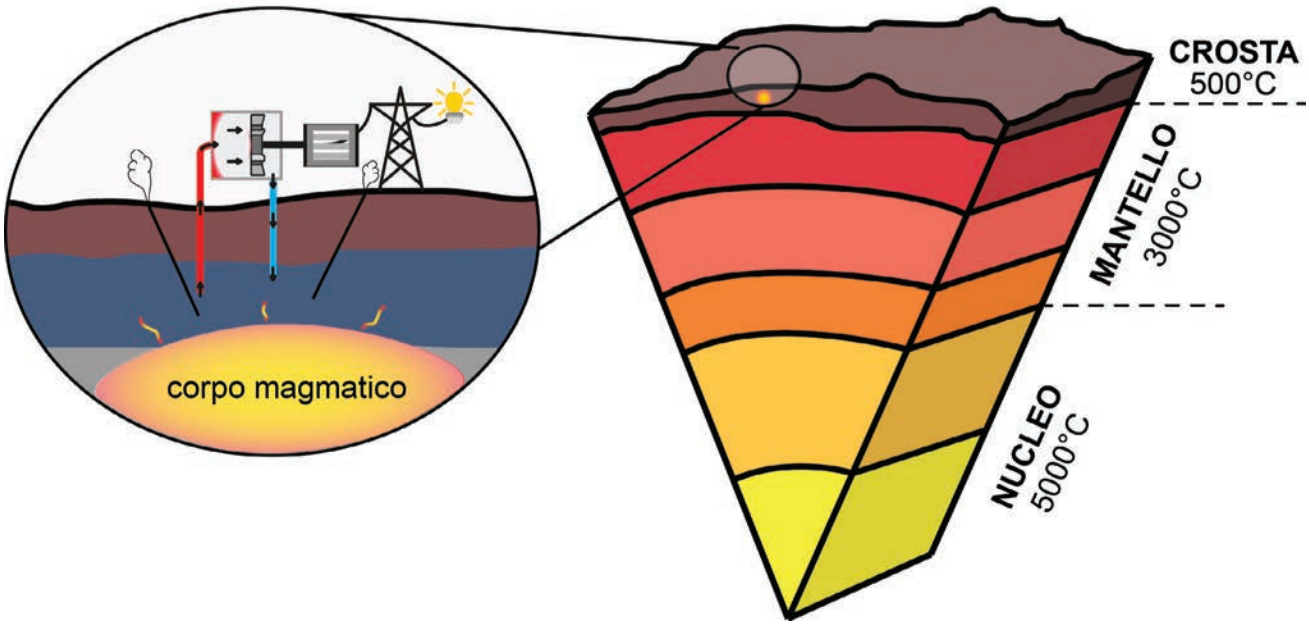


Figura 3 Struttura semplificata dell'interno della Terra e indicazione delle temperature dal nucleo fino alla crosta terrestre. Zoom sulla crosta e semplificazione di un sistema geotermico convenzionale. Immagine non in scala. (Grafica di M. Procesi)

Figure 3 *Simplified structure of the Earth's interior and indication of temperatures from the core to the Earth's crust. Zoom on the crust and simplification of a conventional geothermal system. Image not to scale. (Graphics by M. Procesi)*

L'intuizione che il calore della Terra e in particolare il vapore geotermico potesse essere una fonte di energia non è affatto recente. L'idea trova le sue radici ai primi anni del 1900 quando il Principe Ginori Conti azionò un motore tramite il vapore delle emissioni fumaroliche [1] di Larderello (Toscana) riuscendo ad accendere cinque lampadine. È proprio a quel momento che si deve la nascita della geotermia e solo qualche anno dopo entrò in esercizio, sempre a Larderello, la prima centrale geotermica al mondo.

Il nostro Paese ha quindi una lunga tradizione in questo settore maturando negli anni grandissima esperienza e conoscenza. Oggi si contano in Italia **37 centrali geotermiche**, sono tutte ubicate nella regione **Toscana** e con la loro produzione si soddisfa circa il **30%** del fabbisogno regionale. Gran parte del territorio italiano presenta **grandi potenzialità geotermiche** a oggi però poco

utilizzate. Nonostante questo, riusciamo comunque a coprire il primo posto in Europa per produzione di energia geotermoelettrica. Purtroppo, sugli usi diretti non possiamo dire di essere altrettanto virtuosi dimostrando di dover fare ancora molta strada [2].
L'**INGV** contribuisce, con le sue ricerche, nel caratterizzare **sistemi geotermici** potenzialmente idonei alla produzione di energia elettrica sia in Italia che all'estero e nel monitoraggio di sistemi già in produzione.
A livello mondiale, l'esplorazione geotermica oggi, si sta muovendo anche verso sistemi meno convenzionali rispetto a quelli toscani e definiti appunto non-convenzionali. Tra questi sono un esempio i sistemi **EGS** (Enhanced Geothermal Systems) molto esplorati in nord Europa o i sistemi a salamoia calda esplorati e utilizzati in Cina e nelle Filippine. L'apertura della geotermia verso nuovi orizzonti segue la necessità di raggiungere l'autonomia energetica delle comunità e aumentare la sostenibilità ambientale, economica e sociale.

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2018/10/23/le-emanazioni-gassose-in-italia-centrale/
[2] https://www.unionegeotermica.it/pdfiles/stime%20di%20crescita%202016.pdf

Scorie radioattive e Deposito Nazionale: facciamo chiarezza

Monia Procesi

INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 1

Probabilmente a molti di noi sarà capitato di dover fare una lastra radiografica; quella radiografia comporta un'esposizione limitata e localizzata del nostro corpo ai raggi X. In ambito sanitario vengono spesso utilizzate diverse tecniche per diagnostica e terapia legate alla chimica e fisica nucleare. Queste attività portano alla produzione di scorie radioattive. Ma dove vanno a finire questi rifiuti? Quale è il modo sicuro per trattarli e collocarli? Oggi il problema prende forma con la costituzione di un Deposito Nazionale che sta suscitando molti commenti. Vediamo di fare chiarezza sulla questione.

L'Album Radio-Activity dei Kraftwerk, famoso gruppo tedesco di musica elettronica nato negli anni '70, è stato probabilmente ascoltato da molti di noi. Il contatore Geiger che apre il pezzo Radioactivity [1] è per molti indimenticabile. L'album è stato prodotto nel '75. Nasceva come protesta contro il nucleare e in particolare contro le grandi centrali e il profondo impatto che potevano avere sull'ambiente anche con le scorie radioattive prodotte.



Figura 1 Copertina del primo disco dei Kraftwerk, Radio-Activity.
Figura 1 *Cover of Kraftwerk's first album, Radio-Activity.*

Ma nucleare non significa solo produzione di energia e grandi centrali. Significa anche tutta una serie di attività che comprendono l'ambito sanitario, quello della ricerca scientifica e industriale. Un simile malcontento si ripresenta oggi con la discussione circa la realizzazione del **Deposito Nazionale per le scorie radioattive**. È pericoloso? È necessario? Possiamo farne a meno?

Le scorie radioattive

Le scorie radioattive non sono tutte uguali. Vengono classificate in tre categorie in funzione del loro grado di pericolosità radiologica, si distinguono quindi rifiuti ad attività 1) molto bassa, 2) bassa e media e 3) alta.

Per i rifiuti ad **alta** e **media attività** (per il cui decadimento sono necessari migliaia di anni) è prevista, per alcuni Paesi europei, tra cui l'Italia (Direttiva EURATOM 2011/70), lo sviluppo di studi per la localizzazione in Europa di un unico e comune **Deposito Geologico Profondo** (situato a centinaia di metri di profondità) **non temporaneo**.
I rifiuti a **molto bassa** e **bassa attività** generati in ambito sanitario (diagnostica e terapia), industria, attività di ricerca e negli impianti nucleari disattivati, vanno invece opportunamente trattati e collocati in un Deposito dedicato ed idoneo, collocato sul territorio nazionale. Attualmente, in Italia, tutti questi rifiuti trovano posto in depositi temporanei presenti nei siti degli impianti nucleari disattivati **ma che non risultano idonei per una sistemazione definitiva**. Per lo smaltimento definitivo, infatti, **è necessario un deposito dotato di barriere ingegneristiche** che congiuntamente alle caratteristiche naturali del sito potenzialmente idoneo, possa garantire l'isolamento dei rifiuti radioattivi dall'ambiente fino al decadimento della radioattività a livelli tali da risultare trascurabili per la salute dell'uomo e per gli ecosistemi (circa 300 anni) (si veda www.depositonazionale.it [2])

I criteri per la definizione del sito

È quindi arrivato il momento per l'Italia, come hanno già fatto o stanno facendo altri paesi europei, di sviluppare il Deposito Nazionale in cui sistemare in modo definitivo i rifiuti radioattivi italiani a molto bassa e bassa attività che risponda pienamente a tutti criteri di sicurezza richiesti. L'Unione Europea (articolo 4 della Direttiva 2011/70) prevede che tale sistemazione definitiva **risieda nello Stato membro in cui i rifiuti sono stati generati**. Inoltre, in attesa della realizzazione del Deposito Geologico Europeo, è previsto che anche i rifiuti a media e alta attività siano stoccati in sicurezza nello stesso sito del Deposito Nazionale, all'interno di una struttura **temporanea** realizzata ad hoc, denominata **Complesso Stoccaggio Alta attività** (CSA).
In questo quadro, la **Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee** a ospitare il **Deposito Nazionale e Parco Tecnologico** (CNAPI) (Figura 1) mostra la localizzazione di 67 potenziali aree. Questa mappatura è stata sviluppata da SOGIN in collaborazione con atenei e centri di ricerca ed basata su 28 criteri di selezione proposti da ISPRA (Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale [3]) e in particolare dall'ISIN[1] [4].

I 28 criteri comprendono:

- **15 Criteri di Esclusione.** Sono i criteri che escludono le aree del territorio nazionale le cui caratteristiche non rispondo ai requisiti di sicurezza. Esempi sono le aree a elevato rischio vulcanico, sismico, idrogeologico, etc.
- **13 Criteri di Approfondimento.** Questi sono definiti per valutare se le aree individuate dall'applicazione dei criteri di esclusione rispondano ancora a determinati parametri di sicurezza (Figura 2). Ad esempio, occorrenza di fenomeni vulcanici secondari tipo degassamento, fenomeni di instabilità dovuti a subsidenza e sollevamento del terreno, impatto su specie animali e habitat a rischio, viabilità, etc.

La Carta Nazionale delle Aree Potenzialmente Idonee a ospitare il Deposito Nazionale e Parco Tecnologico (CNAPI) è stata oggetto di una consultazione pubblica [5] che ha visto Regioni, enti

[1] ISIN: Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione è oggi l'autorità di regolamentazione competente in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione, indipendente ai sensi delle Direttive 2009/71/Euratom e 2011/70/Euratom. L'Ispettorato assorbe tutte le funzioni in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione. In passato la legislazione nazionale ha assegnato queste funzioni al CNEN, all'ENEA DISP, all'ANPA, all'APAT. Successivamente al Dipartimento nucleare, rischio tecnologico e industriale, al Centro Nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione, nonché all'Area Fisica del Centro Nazionale per la rete nazionale dei laboratori per le attività in materia di radioattività dell'ISPRA.

locali e soggetti portatori di interessi qualificati esporre le proprie osservazioni e proposte tecniche. A seguito del recepimento di queste osservazioni e proposte si è arrivati nel 2023 alla pubblicazione della **Carta Nazionale delle Aree Idonee** (CNAI) con la presentazione dei 51 potenziali siti.



Figura 2 Carta Nazionale delle aree Potenzialmente Idonee al Deposito dei rifiuti radioattivi (CNAPI), redatta da SOGIN (Rev. 8 gennaio 2020).

Figure 2 *National map of areas potentially suitable for the storage of radioactive waste (CNAPI), drawn up by SOGIN (Rev. 8 January 2020).*

Le caratteristiche tecnologiche

Congiuntamente alle caratteristiche geologiche e ambientali del sito, il Deposito dovrà essere costituito da una struttura con **barriere ingegneristiche** e **barriere naturali** poste in serie per il contenimento della radioattività, progettata secondo gli standard IAEA (International Atomic Energy Agency [6]) e dell'ente di controllo ISIN.

Il futuro progetto italiano comprenderà, oltre al Deposito Nazionale, anche la realizzazione di un **Parco Tecnologico**. Il parco risiederà nella stessa area ove verrà realizzato il Deposito, e le attività riguarderanno soprattutto la ricerca e l'innovazione nei settori dello smantellamento degli impianti nucleari e della gestione dei rifiuti radioattivi.

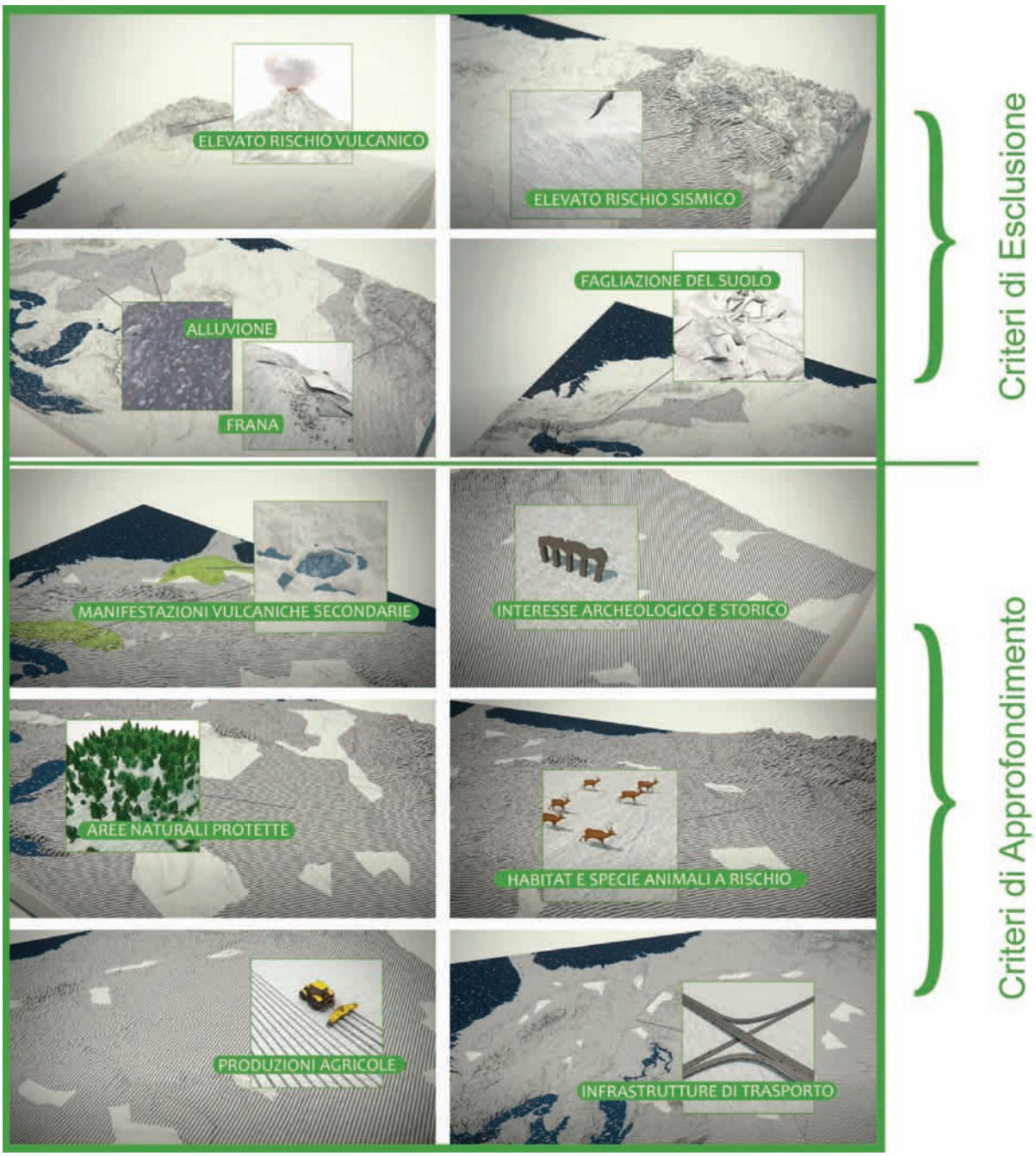


Figura 3 Alcuni dei 28 criteri di esclusione e approfondimento proposti dall'ISPRA e utilizzati da SOGIN per lo sviluppo della CNAPI (da Deposito Nazionale[2]).

Figure 3 *Some of the 28 exclusion and in-depth analysis criteria proposed by ISPRA and used by SOGIN for the development of the CNAPI.*

Il Deposito Nazionale e il Parco Tecnologico saranno costruiti all'interno di un'area di circa 150 ettari, di cui 110 dedicati al Deposito e 40 al Parco Tecnologico [2].

Nel dettaglio, all'interno di 90 costruzioni in calcestruzzo armato, dette celle (Figura 3a), verranno collocati grandi contenitori in calcestruzzo speciale, i moduli (Figura 3b). Queste racchiuderanno a loro volta i contenitori metallici con i rifiuti radioattivi già condizionati, detti manufatti (Figura 3c). Nelle celle gli operatori sistemeranno definitivamente circa 78.000 m^3 di rifiuti a molto bassa e bassa attività. Una volta completato il riempimento, le celle saranno ricoperte da una collina artificiale di materiali inerti e impermeabili (Figura 3d) che rappresenterà un'ulteriore protezione e permetterà un'armonizzazione dell'infrastruttura con l'ambiente circostante.

Il Deposito Nazionale, terminata la sua capacità recettiva, verrà chiuso ed entrerà nell'esercizio di solo monitoraggio, della durata di almeno 300 anni, per poi essere rilasciato privo di vincoli di natura radiologica.

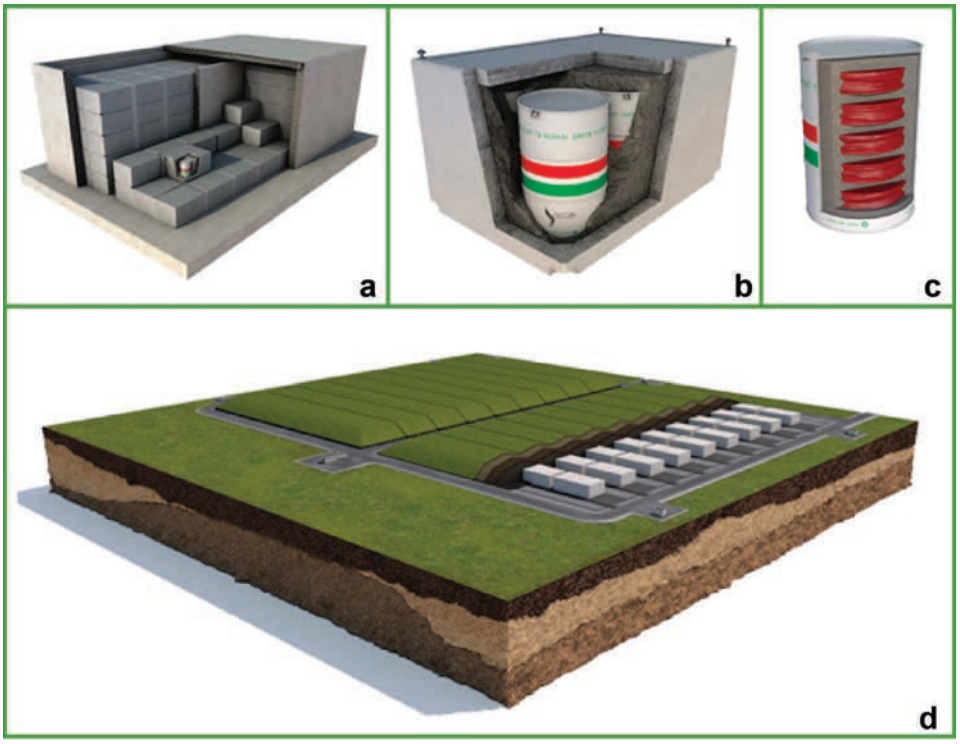


Figura 4 a-d: Progetto del Deposito Nazionale, in dettaglio riportiamo; a) le celle in calcestruzzo armato; b) i moduli in calcestruzzo speciale; c) i manufatti in metallo con all'interno i rifiuti radioattivi condizionati e d) la collina artificiale che andrà a coprire le intere celle. (Da Deposito Nazionale [2]).

Figure 4 *a-d: National Repository project, in detail we report; a) the reinforced concrete cells; b) special concrete modules; c) the metal artifacts with the conditioned radioactive waste inside and d) the artificial hill that will cover the entire cells.*

Nei 300 anni necessari a far decadere la radioattività dei rifiuti a molto bassa e bassa attività la struttura sarà monitorata costantemente. Resterà inoltre operativa una **rete di monitoraggio ambientale e radiologico** nei dintorni del sito.
Al termine dei 300 anni le caratteristiche geologiche del sito, individuato sulla base dei criteri di localizzazione e confermato attraverso un'analisi di sicurezza di lungo periodo, assicurerà il contenimento della radioattività residua.
Questi scenari contemplano tutte le situazioni normali, anomale e incidentali cui il deposito può essere soggetto.

I progetti Europei

Nei Paesi più vicini a noi troviamo esempi di Depositi definitivi per rifiuti a bassa e media attività? La risposta è sì e sono presenti anche in paesi come la Norvegia (Figura 4) dove non si è mai prodotta energia elettrica da fonte nucleare.
È necessario affrontare e superare il cosiddetto effetto **NIMBY**, dall'inglese *Not In My Back Yard*, ossia "Non nel mio cortile" per cui una comunità locale protesta contro la realizzazione di opere pubbliche che potrebbero avere impatto rilevante sull'ambiente a loro vicino.

È quindi indispensabile per tutti comprendere il fenomeno attingendo da **fonti certe**. Lo scopo è quello di acquisire maggiori strumenti per raggiungere un'**opinione solida, critica e strutturata** senza mai dimenticare che ad oggi i rifiuti radioattivi italiani sono ospitati in luoghi non più idonei richiedendo quindi nuove e sicure collocazioni.
A giugno 2024 ancora non sono presenti comuni candidati, tra le 51 aree potenzialmente idonee, ad ospitare il deposito nazionale.

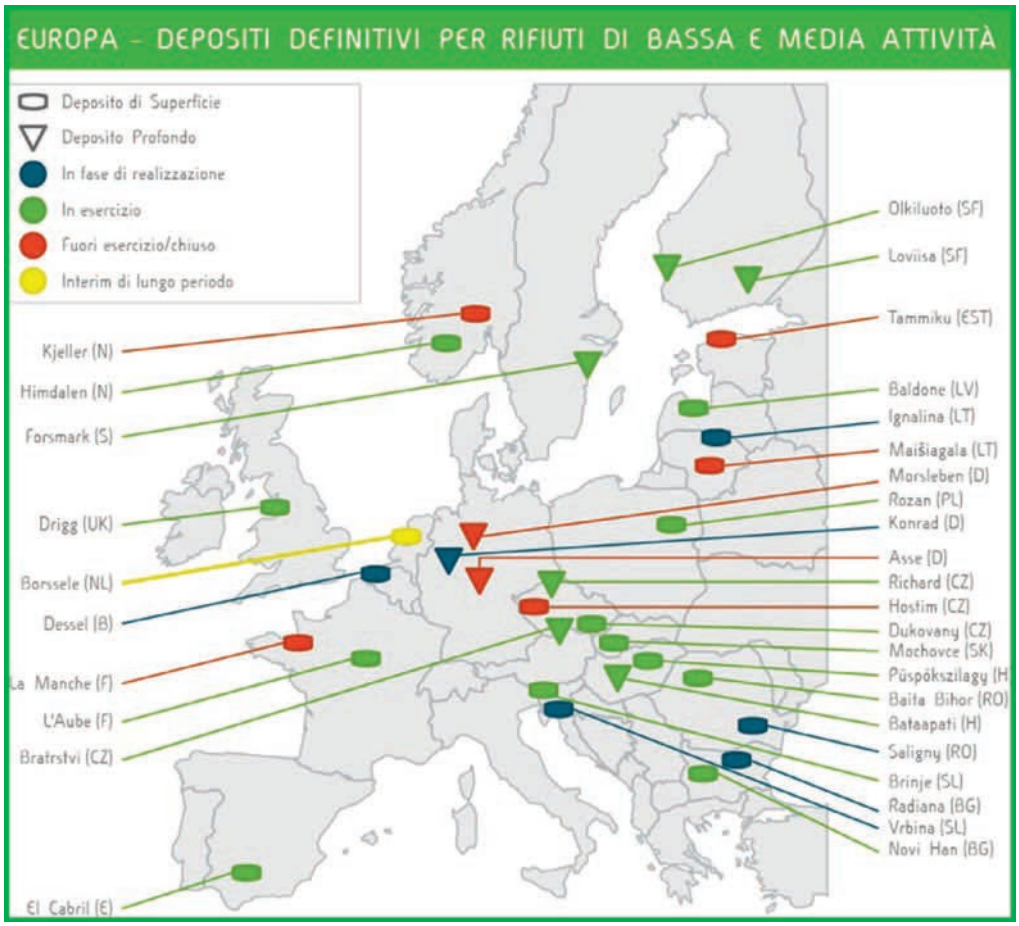


Figura 5 Mappa europea dei Depositi definitivi per rifiuti radioattivi di bassa e media attività
Lo smaltimento delle scorie radioattive è quindi una reale necessità da affrontare e risolvere in modo sicuro per le generazioni di oggi ma soprattutto per quelle che verranno (da Deposito Nazionale [2]).
Figure 5 *European map of definitive repositories for low and medium level radioactive waste. The disposal of radioactive waste is therefore a real necessity to be addressed and resolved in a safe way for today's generations but above all for those to come.*

Sitografia

[1] https://www.youtube.com/watch?v=0EBTn_3DBYo
[2] https://www.depositonazionale.it/
[3] https://www.isprambiente.gov.it/it/archivio/notizie-e-novita-normative/notizie-ispra/2015/03/criteri-per-la-localizzazione-del-deposito-nazionale-dei-rifiuti-radioattivi
[4] https://www.isinucleare.it/
[5] https://www.depositonazionale.it/consultazione-pubblica/pagine/documento-per-la-consultazione.aspx
[6] https://www.iaea.org/

Tra storia e geologia: il fascino del cratere di Castiglione e delle antiche cave di Lapis Gabinus nel Lazio

Patrizia Macrì[1], Chiara Andreotti[2], Rocco Bochicchio[2]

[1]INGV | Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione Roma 2
[2]MiC, Soprintendenza Speciale Archeologia, Belle Arti e Paesaggio di Roma

L'incontro tra una storia millenaria e la geologia vulcanica nel cuore di Gabii, antica città romana ai margini del suggestivo cratere di Castiglione.

Situata sulla via Prenestina antica, a circa 20 chilometri a est di Roma, l'antica città di Gabii ha rappresentato, in epoca protostorica, uno dei centri politici e culturali più importanti del Lazio. Ubicata nei pressi di un lago vulcanico ora prosciugato, il paleolago di Castiglione, Gabii divenne un importante centro abitato durante l'età del bronzo e del ferro e nel corso dell'epoca romana. Gabii fu una delle città latine più influenti e prosperose, famosa per la sua posizione strategica lungo la *via Praenestina*, una delle principali vie di comunicazione dell'epoca. La città è menzionata in molte fonti antiche, tra cui le opere di Tito Livio e di Dionigi di Alicarnasso. L'area archeologica è oggi situata in alto, sul bordo del cratere che ospitava il paleolago di Castiglione [1]. Qui sono state rinvenute le antiche cave di Lapis Gabinus, noto anche con il nome generico di Peperino dei Colli Albani o Pietra Gabina, ampiamente sfruttate dai romani a partire dall'età repubblicana. Si tratta di una zona dal fascino particolare, dove storia e geologia si intrecciano sullo sfondo di un antico vulcano.

Il cratere di Castiglione

Il bacino di Castiglione è una formazione vulcanica, caratterizzata da una forma quasi perfettamente circolare e con un diametro di 1,3 km. La morfologia del cratere rappresenta l'espressione superficiale del condotto di alimentazione di un antico vulcano. Queste strutture si formano a seguito di una attività vulcanica esplosiva di tipo freato-magmatica, quando cioè il magma in risalita viene a contatto con l'acqua sotterranea contenuta nei sedimenti.
L'attività esplosiva ebbe luogo tra 400 e 300 mila anni fa. Successivamente l'acqua, proveniente dalle precipitazioni e dalla sottostante falda freatica, riempì il cratere formando un vero e proprio lago sul cui fondo cominciò la lenta deposizione di sedimenti fini argillosi, intervallati da episodici livelli di materiale vulcanico proveniente dalle eruzioni dei vulcani laziali (Sabatini, Vico-Cimino, Vulsini) e dei più lontani complessi vulcanici campani (Campi Flegrei, Ischia e Vesuvio).
La sedimentazione nel paleolago si interruppe nel XVII secolo, quando si pensò di prosciugare il lago per sfruttare i suoi terreni a scopo agricolo e in seguito fu nuovamente bonificato all'inizio del XIX secolo.

Il Lapis Gabinus

Quello di Castiglione è il più meridionale fra i distretti vulcanici del Lazio. I suoi prodotti eruttivi, lave e tufi, sono stati usati fin dall'antichità come materiale di costruzione. Una delle caratteristiche della valle di Castiglione è infatti la presenza di numerose cave di Lapis Gabinus, noto anche come Peperino o Pietra Gabina. Si tratta di un tufo compatto, di colore grigio scuro, ricco di frammenti litici bianchi e neri (lavici e sedimentari) e di cristalli di feldspato e pirosseno.

Per le buone caratteristiche fisico-meccaniche rappresenta una pietra da costruzione solida e facile da lavorare. Per questo motivo il suo impiego è stato molto diffuso sia *in loco* che in importanti monumenti dell'antica Roma.



Figura 1 Il cratere di Castiglione e la posizione dell'area archeologica. (GoogleEarth)
Figure 1 *The Castiglione crater and the position of the archaeological area. (GoogleEarth)*

Il Lapis Gabinus a Gabii

Nell'antica città di Gabii il Peperino locale è stato il principale elemento costruttivo del Santuario di Giunone, dedicato ad una delle principali divinità del Pantheon romano: la dea Giunone. Costruito durante il periodo repubblicano romano, il Santuario è stato un importante centro religioso e culturale per gli abitanti della città e di quelle circostanti. L'edificio riferibile alla cella è interamente realizzato con blocchi parallelepipedi ricavati dalle vicine cave presenti ai margini della città. Il Santuario e le aree circostanti sono state oggetto nel corso del '900 di importanti scavi archeologici che hanno portato alla luce reperti e testimonianze dell'antica vita religiosa e culturale della città e che oggi è possibile visitare.

Il Lapis Gabinus a Roma

Nell'antica Roma il Lapis Gabinus fu ampiamente utilizzato. Tra i vari monumenti realizzati ricordiamo la Tomba di Cecilia Metella, grandioso monumento funerario situato nei pressi della via Appia Antica. Qui il tufo è utilizzato per la costruzione delle mura esterne del mausoleo. I

Romani usarono poi la Pietra Gabina nel Foro di Augusto per la costruzione del muro di fondo, divisorio tra il Foro e il quartiere della Suburra. Il muro è alto fino a 33 metri nel tratto più elevato, e doveva isolare e proteggere il Foro dalla retrostante Suburra, quartiere popolare e sovraffollato nel quale gli incendi erano frequentissimi.



Figura 2 Area archeologica di Gabii. (Foto di C. Caricchi)
***Figure 2** Archaeological area of Gabii. (Photo by C. Caricchi)*

Con la sua caratteristica facciata ad archi, il Tabularium, l'Archivio di Stato dove i Romani conservavano le *tabulae* ovvero le leggi emanate dalla città, domina tutto il Foro Romano. Qui la Pietra Gabina è intervallata con caratteristici blocchi rossastri di tufo dell'Aniene. È sicuramente tra gli edifici più noti a Roma realizzati con il peperino. Riconosciamo l'uso della Pietra Gabina anche nel Teatro di Pompeo, il primo teatro della città costruito in muratura, nelle pareti del primo tratto della Cloaca Maxima, nelle tabernae poste sui lati lunghi del Foro di Cesare.
I Romani utilizzarono i blocchi di *Lapis Gabinus* anche per costruire i Ponti di Fabricio, Emilio, Milvio e di Nona. In particolare, quest'ultimo si trova al nono miglio dell'antica via Prenestina che conduceva da Roma a Praeneste (attuale Palestrina) passando per Gabii. Lungo 72 metri, alto 16 metri e sostenuto da 7 arcate con luce di 6 metri, può essere considerato un capolavoro dell'ingegneria romana: costruito intorno alla fine del II secolo a.C. su di esso ancora oggi scorre il traffico delle nostre auto.



Figura 3 Il Foro di Augusto. (Foto di Ragnar per Canva)
Figure 3 *The Forum of Augustus. (Photo by Ragnar for Canva)*

Gli studi scientifici: la perforazione nel paleolago

Oltre all'interesse archeologico e storico questa area ricopre anche un importante significato per chi studia le variazioni climatiche del passato. I sedimenti del lago contengono infatti una registrazione continua delle variazioni paleoambientali occorse localmente e importanti informazioni sulle variazioni paleoclimatiche dell'area mediterranea. A partire dagli anni '70 diverse ricerche scientifiche hanno indagato la successione lacustre di Castiglione allo scopo di ricostruire le caratteristiche stratigrafiche, micropaleontologiche e il contenuto in ceneri vulcaniche del paleolago.
Nel 2021 Il team del Progetto INGV AMUSED [2] ha effettuato una perforazione profonda che ha permesso di recuperare una lunga carota sedimentaria dal cui studio sarà possibile ricavare nuovi dati utili alla comprensione delle variazioni del clima del passato. La perforazione ha attraversato i quasi 130 metri di sedimenti lacustri e ha raggiunto per la prima volta il fondo del lago costituito da materiale vulcanico. Gli studi hanno consentito di definire l'età del cratere che è risultata più vecchia di quanto si pensasse: le datazioni effettuate sui livelli vulcanici presenti nei sedimenti vanno indietro fino a circa 350.000 anni fa. Questo significa che nei sedimenti abbiamo le registrazioni di un lungo periodo del passato che ha attraversato diversi cicli glaciale/interglaciale.

Grazie alla perforazione possiamo studiare nel dettaglio l'andamento nel tempo di diversi parametri, chimico, fisici e biologici, che variano con il variare delle condizioni climatiche (i cosiddetti *proxies* paleoclimatici). Si tratta di uno studio multidisciplinare reso possibile dalla realizzazione di una fitta rete di collaborazioni tra l'INGV e i ricercatori di numerose Università e Istituti di ricerca sia italiani che esteri. Un gruppo di scienziati che si occupano di paleoclima con approcci diversi e che ci racconteranno la storia climatica di questo luogo.
Oggi, chi si reca all'area archeologica di Gabii, troverà sul bordo del cratere che delimita il paleolago, un cartello descrittivo sulla storia geologica del luogo curato dagli esperti che partecipano al Progetto AMUSED in collaborazione con la Soprintendenza Speciale di Roma [3].



Figura 4 La perforazione INGV nel paleolago di Castiglione.
Figure 4 *INGV drilling in the paleolake of Castiglione.*

Sitografia

[1] https://ingvambiente.com/2021/03/12/il-cratere-di-castiglione-una-chiave-per-capire-il-clima-del-passato/
[2] https://progetti.ingv.it/index.php/it/amused
[3] https://www.soprintendenzaspecialeroma.it/schede/area-archeologica-di-gabii_3005/

QUADERNI di GEOFISICA

ISSN 1590-2595 http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/quaderni-di-geofisica.html/

I QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) accolgono lavori, sia in italiano che in inglese, che diano particolare risalto alla pubblicazione di dati, misure, osservazioni e loro elaborazioni anche preliminari che necessitano di rapida diffusione nella comunità scientifica nazionale ed internazionale. Per questo scopo la pubblicazione on-line è particolarmente utile e fornisce accesso immediato a tutti i possibili utenti. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi. I QUADERNI DI GEOFISICA sono presenti in "Emerging Sources Citation Index" di Clarivate Analytics, e in "Open Access Journals" di Scopus.

QUADERNI DI GEOFISICA (QUAD. GEOFIS.) welcome contributions, in Italian and/or in English, with special emphasis on preliminary elaborations of data, measures, and observations that need rapid and widespread diffusion in the scientific community. The on-line publication is particularly useful for this purpose, and a multidisciplinary Editorial Board with an accurate peer-review process provides the quality standard for the publication of the manuscripts. QUADERNI DI GEOFISICA are present in "Emerging Sources Citation Index" of Clarivate Analytics, and in "Open Access Journals" of Scopus.

RAPPORTI TECNICI INGV

ISSN 2039-7941 http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/rapporti-tecnici-ingv.html/

I RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) pubblicano contributi, sia in italiano che in inglese, di tipo tecnologico come manuali, software, applicazioni ed innovazioni di strumentazioni, tecniche di raccolta dati di rilevante interesse tecnico-scientifico. I RAPPORTI TECNICI INGV sono pubblicati esclusivamente on-line per garantire agli autori rapidità di diffusione e agli utenti accesso immediato ai dati pubblicati. Un Editorial Board multidisciplinare ed un accurato processo di peer-review garantiscono i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi.

RAPPORTI TECNICI INGV (RAPP. TEC. INGV) publish technological contributions (in Italian and/or in English) such as manuals, software, applications and implementations of instruments, and techniques of data collection. RAPPORTI TECNICI INGV are published online to guarantee celerity of diffusion and a prompt access to published data. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

MISCELLANEA INGV

ISSN 2039-6651 http://istituto.ingv.it/it/le-collane-editoriali-ingv/miscellanea-ingv.html

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favorisce la pubblicazione di contributi scientifici riguardanti le attività svolte dall'INGV. In particolare, MISCELLANEA INGV raccoglie reports di progetti scientifici, proceedings di convegni, manuali, monografie di rilevante interesse, raccolte di articoli, ecc. La pubblicazione è esclusivamente on-line, completamente gratuita e garantisce tempi rapidi e grande diffusione sul web. L'Editorial Board INGV, grazie al suo carattere multidisciplinare, assicura i requisiti di qualità per la pubblicazione dei contributi sottomessi.

MISCELLANEA INGV (MISC. INGV) favours the publication of scientific contributions regarding the main activities carried out at INGV. In particular, MISCELLANEA INGV gathers reports of scientific projects, proceedings of meetings, manuals, relevant monographs, collections of articles etc. The journal is published online to guarantee celerity of diffusion on the internet. A multidisciplinary Editorial Board and an accurate peer-review process provide the quality standard for the publication of the contributions.

Coordinamento editoriale
Francesca DI STEFANO
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Progetto grafico
Barbara ANGIONI
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Impaginazione
Barbara ANGIONI
Patrizia PANTANI
Massimiliano CASCONE
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

©2024
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia
Via di Vigna Murata, 605
00143 Roma
tel. +39 06518601

www.ingv.it

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Finito di stampare nel mese di settembre 2024
presso le Industrie Grafiche della Pacini Editore Srl
Via A. Gherardesca • 56121 Ospedaletto • Pisa
Telefono 050 313011
www.pacinieditore.it



ISTITUTO NAZIONALE DI GEOFISICA E VULCANOLOGIA