

DOSSIER

OSSERVAZIONI, PREVISIONI E SCENARI FUTURI
PER IL CLIMA E LA QUALITÀ DELL'ARIA:

IL RUOLO STRATEGICO DI ENEA

OBSERVATIONS, FORECASTS, AND FUTURE SCENARIOS

FOR CLIMATE AND AIR QUALITY:

THE STRATEGIC ROLE OF ENEA



DOSSIER

**Osservazioni, previsioni e scenari futuri per il clima e la qualità dell'aria:
il ruolo strategico di ENEA dalle regioni polari al Mediterraneo**

Observations, forecasts, and future scenarios for climate and air quality:
the strategic role of ENEA from the polar regions to the Mediterranean

DOSSIER - Osservazioni, previsioni e scenari futuri per il clima e la qualità dell'aria: il ruolo strategico di ENEA dalle regioni polari al Mediterraneo

Observations, forecasts, and future scenarios for climate and air quality: the strategic role of ENEA from the polar regions to the Mediterranean

2025 - ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

A cura della Divisione Modelli, Osservazioni e Scenari per il Cambiamento Climatico e la Qualità dell'Aria - ENEA

Progetto grafico: Servizio Promozione e Comunicazione - ENEA

Stampa: Laboratorio tecnografico ENEA - Centro Ricerche Frascati

Agosto 2025

INDICE

INTRODUZIONE	4
OSSERVAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI	13
• ANTARTIDE	15
• ARTIDE	17
• MEDITERRANEO	22
MODELLISTICA OCEANOGRAFICA OPERATIVA	27
MODELLISTICA MOTO ONDOSO	29
LABORATORIO DI MISURA E ANALISI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	31
PREVISIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA A BREVE TERMINE IN ITALIA E IN EUROPA	33
MODELLISTICA INTEGRATA DI QUALITÀ DELL'ARIA IN SUPPORTO ALLE POLITICHE SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	35
VALUTAZIONI DI IMPATTO SU DELLA QUALITÀ DELL'ARIA SALUTE UMANA, VEGETAZIONE, INFRASTRUTTURE E BENI CULTURALI	37
MODELLI CLIMATICI GLOBALI	39
MODELLI CLIMATICI REGIONALI	42
MODELLISTICA CLIMATICA A SCALA URBANA	45
SERVIZI CLIMATICI PER L'AREA MEDITERRANEA	48
MICROPLASTICHE, CAMBIAMENTO CLIMATICO E RISCHIO ECOLOGICO: UN'ANALISI INTEGRATA	52
L'OSSERVATORIO SOTTOMARINO DI SMART BAY DI SANTA TERESA	56
IL CALCOLO SCIENTIFICO IN ENEA, I SISTEMI CRESCO ED ENEAGRID	61

INDEX

INTRODUCTION	9
OBSERVATION OF CLIMATE CHANGE	12
• ANTARCTIC REGION	14
• ARCTIC REGION	16
• MEDITERRANEAN SEA	18
OCEANOGRAPHIC OPERATIONAL MODELS	26
WAVES MODELS	28
LABORATORY OF AIR POLLUTION MEASUREMENT AND ANALYSIS	30
SHORT-TERM AIR QUALITY FORECASTING IN ITALY AND EUROPE	32
INTEGRATED AIR QUALITY MODELLING TO SUPPORT AIR POLLUTION POLICIES	34
IMPACT ASSESSMENT OF AIR QUALITY ON HUMAN HEALTH, VEGETATION, INFRASTRUCTURES AND CULTURAL HERITAGE	36
EARTH SYSTEM MODELS	38
REGIONAL CLIMATE MODELS	40
CLIMATE MODELING AT URBAN SCALE	44
CLIMATE SERVICES FOR THE MEDITERRANEAN REGION	46
MICROPLASTICS, CLIMATE CHANGE AND ECOLOGICAL RISK: AN INTEGRATED ANALYSIS	50
SMART BAY S. TERESA UNDERWATER OBSERVATORY	54
SCIENTIFIC COMPUTING AT ENEA: THE CRESCO AND ENEAGRID SYSTEMS	58

INTRODUZIONE

Osservazioni, previsioni e scenari futuri per il clima e la qualità dell'aria: il ruolo strategico di ENEA dalle regioni polari al Mediterraneo.

Viviamo in un periodo storico caratterizzato da trasformazioni climatiche di portata e velocità senza precedenti. L'aumento delle temperature globali, la frequenza crescente di eventi meteorologici estremi e il deterioramento della qualità dell'aria rappresentano alcune delle principali sfide ambientali che la comunità internazionale si trova oggi ad affrontare. Questi fenomeni richiedono risposte coordinate e basate sull'evidenza scientifica, coinvolgendo ricercatori, istituzioni e società civile.

In questo contesto, l'ENEA (Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile) svolge un ruolo di primo piano grazie a un approccio multidisciplinare che integra osservazioni dirette, modellistica numerica avanzata e l'elaborazione di previsioni e scenari climatici e di qualità dell'aria su diverse scale temporali e spaziali.

L'attività di ricerca dell'ENEA si concentra su aree geografiche di particolare rilevanza per la comprensione dei processi climatici come le regioni polari che costituiscono indicatori altamente sensibili e amplificatori dei cambiamenti climatici globali, e il bacino del Mediterraneo, con particolare attenzione al territorio nazionale ed europeo in generale riconosciuto a livello internazionale come hotspot climatico per la sua elevata vulnerabilità agli eventi estremi e alla pressione antropica. In questi contesti, l'Agenzia conduce regolarmente campagne di monitoraggio meteorologico, atmosferico, oceanografico e ambientale. I dati raccolti vengono tra l'altro integrati nei modelli climatici al fine di affinare le capacità previsionali e supportare strategie efficaci di gestione dei rischi associati ai cambiamenti in atto.

Nelle regioni polari, i ricercatori ENEA impiegano sistemi modellistici complessi (tra cui UKESM1-0-LL e CESM2, integrati nel framework del Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) per analizzare le interazioni tra criosfera, oceano

e troposfera. Questi strumenti computazionali sofisticati, basati su equazioni primitive della fluidodinamica, consentono di quantificare gli effetti di retroazione tra riduzione della banchisa artica, anomalie termiche nell'oceano meridionale e modifiche dei regimi di circolazione atmosferica, con implicazioni anche per i regimi pluviometrici alle medie latitudini.

L'infrastruttura osservativa polare dell'ENEA comprende due avamposti strategici: le stazioni Mario Zucchelli e Concordia in Antartide e la base Artica di Thule in Groenlandia.

Nel continente antartico, una rete di AWS (Automatic Weather Stations) acquisisce parametri micrometeorologici con risoluzione sub-oraria: temperatura superficiale, umidità relativa, pressione barometrica, velocità del vento e radiazione solare. I profili verticali atmosferici vengono ricostruiti attraverso campagne di radiosondaggio giornaliere, integrate da misure LIDAR per la caratterizzazione aerosol-nubi.

Presso la base artica di Thule, ENEA è attivamente coinvolta nel THAAO (Thule High Arctic Atmospheric Observatory), focalizzato sull'analisi quantitativa dell'amplificazione artica. Le attività sperimentali integrano tecniche di campionamento in situ e remote sensing, lidar atmosferico e campionatori per la caratterizzazione degli aerosol submicronici. Questi dati sono fondamentali per identificare i processi di feedback radiativo e i meccanismi di trasporto atmosferico che contribuiscono all'accelerazione del riscaldamento in Artide.

L'elaborazione e l'analisi di queste serie temporali ad alta frequenza consentono di affinare le parametrizzazioni nei modelli climatici regionali e globali, riducendo le incertezze nelle proiezioni e fornendo un supporto scientifico solido per la comprensione dei cambiamenti climatici nelle alte latitudini.

Concentrando l'attenzione sul bacino Mediterraneo, le attività di ricerca dell'ENEA affrontano le criticità emergenti di una regione riconosciuta come hotspot climatico. Qui, il riscaldamento delle masse d'acqua marine manifesta tassi di incremento preoccupanti; si evidenziano le significative anomalie termiche positive, con scostamenti di +5-7 °C dalle medie

climatologiche, osservate durante l'estesa ondata di calore del biennio 2022-2023 e reiterate nell'estate 2024. A tali fenomeni si associano l'innalzamento continuo del livello marino e una marcata propensione verso l'intensificazione degli eventi meteorologici estremi.

Nell'ambito mediterraneo, ENEA conduce un monitoraggio rigoroso del sistema climatico mediante l'Osservatorio Climatico di Lampedusa, una struttura articolata in tre componenti integrate: atmosferica, oceanografica e terrestre. La componente atmosferica è dedicata alla misurazione delle concentrazioni di gas a effetto serra (CO_2 , CH_4 , N_2O), dell'ozono troposferico, degli aerosol atmosferici e delle proprietà ottico-radiative delle nubi. Tali parametri sono essenziali per quantificare il ruolo del Mediterraneo nel contesto dei cambiamenti climatici globali. La componente oceanografica impiega una boa di grandi dimensioni strumentata per l'acquisizione continua di dati relativi a temperatura, salinità, ossigeno disciolto, pH e CO_2 marina, integrati da misure di radiazione solare incidente e parametri meteorologici superficiali. Queste osservazioni risultano fondamentali per la comprensione dei processi a scala locale, incluse le anomalie termiche marine e i fenomeni di acidificazione. Infine, la torre di misura dei flussi ecosistemici quantifica gli scambi di carbonio tra l'atmosfera e la copertura vegetale, fornendo una visione integrata del ciclo del carbonio nell'ambiente mediterraneo. I dati derivanti da queste infrastrutture di monitoraggio integrato contribuiscono in modo sostanziale al progresso nella comprensione scientifica delle dinamiche climatiche, sia a scala regionale che globale. Essi forniscono, inoltre, un solido fondamento scientifico per i processi di calibrazione e validazione dei modelli numerici climatici, garantendo che le proiezioni modellistiche rappresentino accuratamente le specificità del sistema climatico mediterraneo.

Nell'ambito della modellistica previsionale, l'ENEA sviluppa sistemi modellistici specificamente orientati al bacino del Mediterraneo. Il modello MITO, ad esempio, è in grado di prevedere fino a cinque giorni quale sarà la circolazione marina mediterranea la temperatura, la salinità, e livello del mare con un dettaglio spaziale di circa 2Km e in tre dimensioni. Le applicazioni risultano

molteplici: dalla tutela della sicurezza marittima alla stima della dispersione di contaminanti in caso di sversamento, fino all'ottimizzazione degli impianti per lo sfruttamento dell'energia marina. In quest'ultimo ambito, simulazioni ad altissima risoluzione (fino a 450 m) nell'area di Pantelleria hanno consentito di analizzare in dettaglio la micro-circolazione costiera, fornendo indicazioni progettuali determinanti per dispositivi di conversione del moto ondoso.

A integrazione di MITO opera un modello dedicato alla previsione del moto ondoso che copre l'intero bacino con risoluzioni nell'ordine di poche centinaia di metri, restituendo i principali parametri ondometrici e spettri energetici ad alta definizione.

Un secondo pilastro delle attività ENEA riguarda il monitoraggio, la previsione a breve termine e la proiezione a lungo termine della qualità dell'aria in Italia e in Europa.

Nei laboratori di Bologna, Faenza e Casaccia, strumentazioni analitiche di ultima generazione consentono la quantificazione del particolato atmosferico nelle diverse frazioni (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, ultrafini) e dei principali inquinanti gassosi (NO_x , O_3). Le metodiche spaziano dal campionamento tradizionale su filtro alle analisi in continuo ad alta frequenza, impiegando campionatori sequenziali, analizzatori termo-ottici, spettrometri XRF e sistemi evoluti di speciazione chimica in tempo reale (ACSM). Un laboratorio mobile, dotato fra l'altro di Scanning Mobility Particle Sizer per la caratterizzazione delle nanoparticelle ultrafini e di un nefelometro Aurora per la misura della dispersione della luce, indicatore della visibilità atmosferica, permette di estendere le campagne di misura sul territorio, inclusi ambienti indoor. Questa capacità analitica consente all'ENEA di definire profili chimico-fisici dettagliati dell'aerosol, individuando traccianti specifici (ioni, anidrozuccheri quali il levoglucosano, metalli). Mediante l'applicazione di modelli recettoriali, come la Positive Matrix Factorization (PMF), è possibile procedere al source apportionment, distinguendo e quantificando il contributo delle diverse sorgenti - traffico, riscaldamento, attività industriali, reazioni chimiche secondarie in atmosfera - alle concentrazioni osservate. Tali informazioni rivestono una duplice valenza: da un lato arricchiscono la conoscenza dei processi atmosferici; dall'altro risultano imprescindibili

per la validazione e il perfezionamento dei modelli di qualità dell'aria, orientando in modo mirato le politiche di risanamento. Ne derivano ricadute dirette sulla tutela della salute pubblica e informazioni importanti per la conservazione degli ecosistemi e del patrimonio culturale e paesaggistico.

Inoltre, la capacità di prevedere la qualità dell'aria a breve termine rappresenta uno strumento strategico per la gestione del rischio ambientale. Per questo motivo l'ENEA implementa quotidianamente sistemi operativi di previsione come MINNI-FORAIR, che fornisce ogni giorno stime ad alta risoluzione sull'andamento delle concentrazioni di inquinanti in Italia, e MINNI-CAMS, che estende analoghe previsioni all'intero territorio europeo. In particolare, MINNI-FORAIR opera su una griglia di circa 4 km e produce previsioni orarie fino a tre giorni per le concentrazioni di particolato (PM), ossidi di azoto e ozono, mentre il sistema MINNI-CAMS, con risoluzione di ~10 km, elabora previsioni fino a quattro giorni sull'Europa ed è integrato nel servizio europeo Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), che produce anche la previsione delle concentrazioni dei pollini di principale interesse allergologico. Queste piattaforme modellistiche combinano dati meteorologici ad alta risoluzione (derivati da modelli atmosferici come RAMS/WRF), inventari aggiornati delle emissioni e modelli di chimica e trasporto degli inquinanti (ad esempio il modello FARM), sfruttando la potenza di calcolo del supercalcolatore CRESCO per elaborare in tempo reale l'ingente volume di informazioni. I risultati sono regolarmente confrontati con le osservazioni prodotte dalle reti di monitoraggio a terra, assicurando il massimo livello di affidabilità, e vengono pubblicati quotidianamente sui portali ENEA nonché condivisi con il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e con le amministrazioni regionali.

Le previsioni di qualità dell'aria risultano essenziali sia per la popolazione sia per i decisori pubblici. I cittadini possono consultare le mappe previsionali orarie e giornaliere al fine di adottare misure di autotutela, ad esempio rinunciando ad attività fisiche intense all'aperto nei periodi di picco dello smog, diminuendo pertanto la propria esposizione agli agenti

inquinanti. Parallelamente, gli enti territoriali possono utilizzare tali informazioni per attivare tempestivamente le misure emergenziali previste dal quadro normativo (recentemente aggiornato con la Direttiva 2881/2024, che è in via di recepimento della legge nazionale): limitazioni temporanee del traffico, promozione del tele-lavoro o ulteriori restrizioni vengono frequentemente implementate sulla base degli avvisi modellistici, con l'obiettivo di salvaguardare i gruppi di popolazione più vulnerabili (bambini, anziani, soggetti affetti da patologie respiratorie o cardiovascolari). Durante la stagione fredda, ad esempio, le simulazioni ad alta risoluzione del sistema MINNI-FORAIR consentono di individuare con anticipo le configurazioni meteorologiche sfavorevoli, quali prolungate inversioni termiche in Pianura Padana che favoriscono l'accumulo di particolato fine.

Per le valutazioni retrospettive e le proiezioni a lungo termine (2050) delle emissioni inquinanti, della qualità dell'aria e degli effetti sulla salute umana, i modelli di dispersione degli inquinanti si integrano con modelli energetici e metodiche WHO di valutazione di impatto sanitario. MINNI integra al suo interno il modulo GAINS-Italia, dedicato agli scenari emissivi, alla valutazione speditiva (screening) della qualità dell'aria e della mortalità negli anni dal 2030 al 2050, all'ottimizzazione delle misure di riduzione delle emissioni inquinanti rispetto ai costi e all'efficacia. La valutazione di dettaglio di scenari di qualità dell'aria ed effetti sanitari (mortalità per causa, morbidità) può essere effettuata con il modulo Sistema di Modellistica Atmosferica di MINNI, a partire dagli scenari emissivi di GAINS-Italia.

A completare il panorama delle attività ENEA vi è la realizzazione di scenari climatici globali e regionali, imprescindibili per valutare gli impatti futuri dei cambiamenti in corso e orientare le strategie di adattamento e mitigazione. Su scala globale, l'ENEA contribuisce allo sviluppo del modello di Earth System EC-Earth, prendendo parte alle simulazioni internazionali CMIP6 che costituiscono la base dei rapporti redatti dall'IPCC.

In un'ipotesi emissiva elevata (scenario SSP5-8.5), tali simulazioni prospettano, da qui al 2100, incrementi sostanziali della temperatura media

globale accompagnati da profonde alterazioni nei regimi precipitativi.

Su scala regionale vengono condotte simulazioni climatiche da alta ad altissima risoluzione (da 15 km fino a circa 3 km) sull'intero territorio nazionale e sull'area euro-mediterranea, finalizzate a descrivere con dettaglio fenomeni estremi quali ondate di calore, precipitazioni intense, siccità prolungate, portate fluviali eccezionali e inondazioni improvvise. Queste proiezioni costituiscono la base scientifica per la quantificazione dei rischi specifici e per la definizione di piani di adattamento: i risultati delle simulazioni ENEA supportano la redazione del Piano Nazionale di Adattamento ai Cambiamenti Climatici e alimentano diversi progetti strategici del Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR) mirati al rafforzamento della resilienza territoriale.

L'approccio integrato perseguito dall'ENEA si traduce in strumenti operativi avanzati per la valutazione del rischio ambientale e territoriale. Emblematica, a tal proposito, è la piattaforma GIS sviluppata dall'Agenzia, che sovrappone modelli digitali del terreno, proiezioni di innalzamento del livello marino e misure satellitari di subsidenza del suolo (European Ground Motion Service), generando cartografie ad alta risoluzione delle aree costiere italiane più esposte. Il sistema individua con precisione zone vulnerabili - dalla Laguna di Venezia al litorale laziale, sino a tratti della costa sarda - fornendo un supporto conoscitivo diretto alla pianificazione: dalla gestione delle risorse idriche nei distretti aridi alla protezione di infrastrutture strategiche quali porti, insediamenti costieri e impianti offshore, oltre a contribuire alla salvaguardia degli ecosistemi marini minacciati da erosione, acidificazione e ondate di calore oceaniche. L'azione multidisciplinare dell'ENEA offre

un apporto essenziale alla comprensione della complessità climatica e ambientale. L'integrazione sinergica fra osservazioni, modelli numerici e tecnologie innovative attiva un circuito virtuoso di feedback che accresce progressivamente l'accuratezza delle simulazioni e la capacità interpretativa. Ne consegue una quantificazione più precisa della sensibilità climatica regionale - dal rapido riscaldamento artico, che procede a un ritmo quasi triplo rispetto alla media globale, all'aumento della temperatura della regione mediterranea, ormai prossima a +1,5 °C rispetto all'epoca preindustriale - e una valutazione puntuale degli impatti e dei rischi connessi all'intensificarsi di eventi estremi quali alluvioni costiere, siccità persistenti o mareggiate via via più violente indotte dall'innalzamento del livello del mare. La portata di queste attività è ulteriormente amplificata dalla partecipazione dell'ENEA a reti e programmi internazionali di alto profilo, come Copernicus, il World Climate Research Programme (WCRP) o l'iniziativa MED-CORDEX dedicata allo studio del clima Mediterraneo. Tali collaborazioni favoriscono la condivisione dei dati e dei risultati, aumentano la capacità di confronto con la comunità scientifica globale e consolidano il ruolo dell'ENEA come punto di riferimento internazionale nella ricerca climatica e ambientale.

In un'epoca segnata da crescenti incertezze e dalla minaccia concreta di superamento di soglie climatiche critiche - dalla fusione accelerata delle calotte polari alla potenziale destabilizzazione delle grandi correnti oceaniche - un approccio scientifico multidisciplinare come quello condotto in ENEA risulta imprescindibile. Solo il rigore della ricerca e l'innovazione tecnologica consentono di anticipare le trasformazioni, valutarne oggettivamente gli impatti e sostenere una gestione sostenibile delle risorse.

INTRODUCTION

Observations, Forecasts, and Future Scenarios for Climate and Air Quality: the Strategic Role of ENEA from the Polar Regions to the Mediterranean.

We are living in a historical period marked by climate transformations of unprecedented magnitude and speed. The rise in global temperatures, the increasing frequency of extreme weather events, and the deterioration of air quality represent some of the main environmental challenges facing the international community today. These phenomena demand coordinated, science-based responses involving researchers, institutions, and civil society.

In this context, ENEA (Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development) plays a leading role through a multidisciplinary approach that integrates direct observations, advanced numerical modeling, and the development of climate and air quality forecasts and scenarios across multiple temporal and spatial scales.

ENEA's research activities focus on geographic areas of particular relevance to understanding climate processes, such as the polar regions, which serve as highly sensitive indicators and amplifiers of global climate change, and the Mediterranean basin, particularly the national and European territory, internationally recognized as a climate hotspot due to its high vulnerability to extreme events and anthropogenic pressure. In these contexts, the Agency regularly conducts meteorological, atmospheric, oceanographic, and environmental monitoring campaigns. The collected data are integrated into climate models to enhance predictive capabilities and support effective risk management strategies for ongoing changes.

In the polar regions, ENEA researchers employ complex modeling systems (including UKESM1-0-LL and CESM2, integrated within the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 framework) to analyze interactions between the cryosphere, ocean, and troposphere. These sophisticated computational tools, based on primitive fluid dynamics equations, allow for quantifica-

tion of feedback effects between Arctic sea ice reduction, thermal anomalies in the Southern Ocean, and changes in atmospheric circulation patterns, with implications for precipitation regimes at mid-latitudes.

ENEA's polar observational infrastructure includes two strategic outposts: the Mario Zucchelli and Concordia stations in Antarctica, and the Thule Arctic base in Greenland.

In Antarctica, a network of Automatic Weather Stations (AWS) collects micrometeorological parameters at sub-hourly resolution: surface temperature, relative humidity, barometric pressure, wind speed, and solar radiation. Daily radiosonde campaigns reconstruct atmospheric vertical profiles, complemented by LIDAR measurements for aerosol-cloud characterization.

At the Thule Arctic base, ENEA is actively involved in the THAAO (Thule High Arctic Atmospheric Observatory) project, focused on the quantitative analysis of Arctic amplification. This advanced observatory conducts continuous measurements of aerosol concentration and optical properties. Experimental activities integrate in situ sampling techniques and remote sensing, atmospheric LIDAR, and aerosol samplers for submicron characterization. These data are crucial for identifying radiative feedback processes and atmospheric transport mechanisms contributing to accelerated Arctic warming.

The processing and analysis of these high-frequency time series refine parameterizations in regional and global climate models, reduce projection uncertainties, and provide solid scientific support for understanding climate change in high-latitude regions.

Focusing on the Mediterranean basin, ENEA's research addresses the emerging challenges of a region recognized as a climate hotspot. Marine water masses are warming at alarming rates; significant positive thermal anomalies, +5 to +7°C above climatological averages, were recorded during the extended heatwave of 2022-2023 and repeated in the summer of 2024. These phenomena are associated with continuous sea-level rise and an increasing tendency for intensified extreme weather events.

In the Mediterranean area, ENEA conducts rigorous climate system monitoring through the Lampedusa Climate Observatory, structured into three integrated components: atmospheric, oceanographic, and terrestrial. The atmospheric component measures concentrations of greenhouse gases (CO_2 , CH_4 , N_2O), tropospheric ozone, atmospheric aerosols, and the optical-radiative properties of clouds. These parameters are essential to quantify the Mediterranean's role in the context of global climate change. The oceanographic component employs a large moored buoy equipped for continuous acquisition of temperature, salinity, dissolved oxygen, pH, and marine CO_2 data, complemented by solar radiation and surface meteorological measurements. These observations are fundamental for understanding local-scale processes, including marine thermal anomalies and acidification phenomena. Finally, the ecosystem flux tower quantifies carbon exchanges between the atmosphere and vegetation cover, offering an integrated view of the carbon cycle in the Mediterranean environment.

Data from these integrated monitoring infrastructures significantly contribute to scientific understanding of climate dynamics at both regional and global scales. They also provide a robust scientific basis for calibrating and validating numerical climate models, ensuring that projections accurately represent the specific characteristics of the Mediterranean climate system.

In terms of predictive modeling, ENEA develops modeling systems specifically targeted to the Mediterranean basin. The MITO model, for example, can forecast marine circulation, temperature, salinity, and sea level with a spatial resolution of approximately 2 km and in three dimensions up to five days in advance. Applications range from maritime safety to estimating contaminant dispersion in spill scenarios, and optimizing marine energy exploitation systems. In this field, ultra-high-resolution simulations (up to 450 m.) in the Pantelleria area have allowed detailed analysis of coastal microcirculation, providing critical design insights for wave energy conversion devices.

Complementing MITO is a dedicated wave forecasting model covering the entire basin with resolutions on the order of a few hundred meters, delivering high-definition wave parameters and energy spectra.

A second pillar of ENEA's activities concerns air quality monitoring, short-term forecasting, and long-term projections in Italy and Europe.

In laboratories in Bologna, Faenza, and Casaccia, state-of-the-art analytical instruments quantify atmospheric particulate in various fractions (PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, ultrafine) and key gaseous pollutants (NO_x , O_3). Methods range from traditional filter sampling to high-frequency con-

tinuous analysis, using sequential samplers, thermo-optical analyzers, XRF spectrometers, and advanced real-time chemical speciation systems (ACSM). A mobile laboratory, equipped with a Scanning Mobility Particle Sizer for ultrafine nanoparticle characterization and an Aurora nephelometer for light scattering measurements (an indicator of atmospheric visibility), enables extended measurement campaigns, including indoor environments. This analytical capability allows ENEA to define detailed physicochemical aerosol profiles and identify specific tracers (ions, anhydrosugars such as levoglucosan, metals). By applying receptor models such as Positive Matrix Factorization (PMF), source apportionment is performed, distinguishing and quantifying contributions from different sources, traffic, heating, industrial activities, secondary atmospheric chemical reactions, to observed concentrations.

This information is doubly valuable: it enhances knowledge of atmospheric processes and is essential for validating and refining air quality models, guiding targeted remediation policies. The outcomes have direct impacts on public health protection and provide critical insights for preserving ecosystems and cultural and landscape heritage.

Moreover, the ability to forecast air quality in the short term is a strategic tool for environmental risk management. For this reason, ENEA operates daily forecasting systems such as MINNI-FORAIR, which delivers high-resolution estimates of pollutant concentration trends across Italy, and MINNI-CAMS, which extends similar forecasts to the entire European territory. In particular, MINNI-FORAIR runs on a grid of about 4 km, producing hourly forecasts up to three days for particulate (PM), nitrogen oxides, and ozone, while the MINNI-CAMS system, with ~10 km resolution, provides forecasts up to four days for Europe and is integrated into the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), which also forecasts allergenic pollen concentrations. These modeling platforms combine high-resolution meteorological data (derived from atmospheric models such as RAMS/WRF), updated emission inventories, and pollutant chemistry and transport models (e.g., FARM), leveraging the CRESCO supercomputer's processing power to manage the vast data volume in real time. Results are regularly compared with ground-based monitoring networks, ensuring maximum reliability, and are published daily on ENEA portals and shared with the Ministry of the Environment and Energy Security and regional administrations.

Air quality forecasts are essential for both the population and policymakers. Citizens can consult hourly and daily forecast maps to adopt self-protective measures,

such as avoiding intense outdoor physical activity during smog peaks, thus reducing exposure to pollutants. Simultaneously, local authorities can use this information to activate emergency measures under the regulatory framework (recently updated with Directive 2881/2024, currently being transposed into national law): temporary traffic restrictions, promotion of teleworking, or further restrictions are often implemented based on model warnings to protect vulnerable population groups (children, the elderly, individuals with respiratory or cardiovascular conditions). During the cold season, for example, high-resolution simulations from the MINNI-FORAIR system enable early detection of unfavorable meteorological configurations, such as prolonged thermal inversions in the Po Valley that facilitate fine particulate accumulation.

For retrospective evaluations and long-term projections (2050) of pollutant emissions, air quality, and impacts on human health, pollutant dispersion models are integrated with energy models and WHO methodologies for health impact assessment. MINNI includes the GAINS-Italia module, dedicated to emission scenarios, rapid air quality and mortality screening from 2030 to 2050, and optimization of emission reduction measures based on cost-effectiveness. Detailed assessments of air quality scenarios and health effects (cause-specific mortality, morbidity) can be performed using MINNI's Atmospheric Modeling System module, starting from GAINS-Italia emission scenarios.

Complementing ENEA's range of activities is the development of global and regional climate scenarios, which are essential for assessing future impacts of ongoing changes and guiding adaptation and mitigation strategies. At the global level, ENEA contributes to the development of the EC-Earth Earth System model, participating in international CMIP6 simulations, which underpin IPCC reports.

Under a high-emission scenario (SSP5-8.5), these simulations project substantial increases in global average temperature by 2100, accompanied by profound alterations in precipitation regimes.

At the regional level, high to ultra-high-resolution climate simulations (from 15 km to about 3 km) are conducted across the entire national territory and the Euro-Mediterranean area, aiming to describe in detail extreme phenomena such as heatwaves, intense rainfall, prolonged droughts, exceptional river flows, and flash floods. These projections provide the scientific basis for quantifying specific risks and defining adaptation plans: ENEA simulation results support the drafting of the National Climate Change Adaptation Plan and inform

several strategic projects within the National Recovery and Resilience Plan (PNRR) aimed at enhancing territorial resilience.

ENEA's integrated approach translates into advanced operational tools for assessing environmental and territorial risk. A prime example is the GIS platform developed by the Agency, which overlays digital terrain models, sea level rise projections, and satellite-based ground subsidence measurements (European Ground Motion Service), generating high-resolution maps of the most exposed Italian coastal areas. The system precisely identifies vulnerable zones, from the Venice Lagoon to the Lazio coast, and sections of the Sardinian shoreline, providing direct knowledge support for planning: from water resource management in arid districts to the protection of strategic infrastructure such as ports, coastal settlements, and offshore facilities, and contributing to the preservation of marine ecosystems threatened by erosion, acidification, and oceanic heatwaves.

ENEA's multidisciplinary action offers essential contributions to understanding climate and environmental complexity. The synergistic integration of observations, numerical models, and innovative technologies activates a virtuous feedback loop that progressively increases simulation accuracy and interpretive capacity. The result is a more precise quantification of regional climate sensitivity, from the rapidly warming Arctic, progressing at nearly three times the global average, to the Mediterranean temperature increase, now approaching +1.5 °C above pre-industrial levels, and a timely assessment of impacts and risks associated with intensifying extreme events such as coastal floods, persistent droughts, or increasingly violent storm surges induced by sea level rise. The impact of these activities is further amplified by ENEA's participation in high-level international networks and programs, such as Copernicus, the World Climate Research Programme (WCRP), and the MED-CORDEX initiative dedicated to Mediterranean climate studies. These collaborations promote data and result sharing, enhance engagement with the global scientific community, and consolidate ENEA's role as an international reference point in climate and environmental research.

In an era marked by growing uncertainties and the concrete threat of crossing critical climate thresholds, from the accelerated melting of polar ice caps to the potential destabilization of major ocean currents, a multidisciplinary scientific approach such as that pursued by ENEA is indispensable. Only rigorous research and technological innovation can anticipate transformations, objectively assess their impacts, and support sustainable resource management.

OBSERVATION OF CLIMATE CHANGE

The activity of observation and measurement of climate in the Mediterranean and polar regions is based on the climatic observatories of Lampedusa, Madonie - Piano Battaglia, Pituffik (Greenland) and Antarctica. These are found in the regions of the planet most prone to climate change, because of the speed at which they are occurring, the key role in maintaining the global climatic equilibrium and their effect on populations and ecosystems. The observatories, active since the mid-1980s, are managed directly by the Laboratory for Models and Measurements of Air Quality and Climate Observations. The long-term time series of measurements of parameters of climate interest represent a significant asset for the national and international scientific community. They not only allow the study of climate variability at different time scales, but also validate satellite observations and help to improve regional and/or global climate models for future climate projections.

Climate projections show that the Mediterranean region is and will be particularly sensitive to the increase in global temperature, both in terms of increased extreme events (heat waves, droughts, fires, heavy and localised rainfall) and of variations in the average climate parameters (increase of sea and air temperature, decrease in annual precipitation, acidification and rise in sea level). To study the variability of atmospheric composition and its effects on the region's energy balance, in the late 1990s ENEA has started the Lampedusa Climate Observation Station. Thanks to its geographical isolation and distance from major natural and anthropogenic sources of emissions, Lampedusa is an ideal site for assessing the changes taking place in the Mediterranean region, whether they are of natural or anthropogenic origin. Over the years, the station has become an integrated observatory dedicated to the study of the atmosphere, the sea and ecosystems.

The Piano Battaglia Mountain Observatory, located within the Madonie Natural Park, is also a background site for studying changes in the composition of the atmosphere thanks to CO₂ and CH₄

concentration measurements started in 2005. Its position also makes it possible to study the long-range transport of air from different sources and analyse their effects on atmospheric variability.

Antarctica is the main source of fresh water on the planet; its geographical configuration makes it the most isolated region from the rest of the planet and the least affected by human influence. Yet, the effects of global warming are beginning to be visible in this region too, especially in sectors such as the Antarctic Peninsula. It is therefore of fundamental importance the study of the variation of its climate system that together with the Southern Ocean plays a decisive role in the regulation of the terrestrial climate. ENEA staff, since the first expedition managed by the National Research Project in Antarctica in the mid-80s, has started the weather-climate monitoring in the Terranova bay, in the Ross sea, where is located the Italian base of Mario Zucchelli. Along the years, weather-climatic observations have been extended to a wider coastal region of the Victoria land and inside the continental land on the East Antarctic plateau.

The Arctic is the region showing the fastest temperature increase of about three times the planet's average, known as Arctic Amplification. This rapid warming has effects on the Arctic ecosystems and is the basis for the increasing exploitation of natural resources in the region. In the Arctic climate variations are dominated by complex interactions between cryosphere, ocean and atmosphere as evidenced by the rapid decline of sea ice surface throughout the Arctic Ocean over recent decades. There is also a link between what happens in the Arctic stratosphere and variations in circulation in the mid-latitudes troposphere. Currently, ENEA, together with INGV, the Universities of Rome and Florence, is carrying out activities at the Thule High Arctic Atmospheric Observatory (THAAO), within the Pituffik Space Base in north-west Greenland. Continuous observations allow the main processes involved in Arctic amplification to be studied.

OSSERVAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

L'attività di osservazione e misura del clima nel Mediterraneo e nelle regioni polari è basata sugli osservatori climatici di Lampedusa, Madonie – Piano Battaglia, Pituffik (Groenlandia) e Antartide. Queste si trovano nelle regioni del pianeta maggiormente soggette ai cambiamenti climatici, per la velocità a cui si stanno manifestando, per il ruolo chiave che giocano nel mantenimento dell'equilibrio climatico globale e per l'effetto che possono avere sulla popolazione e gli ecosistemi. Gli osservatori, attivi dalla metà degli anni 80, sono gestiti direttamente dal Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche. Le serie temporali a lungo termine di misure di parametri di interesse climatico rappresentano un patrimonio significativo per la comunità scientifica nazionale e internazionale. Esse non solo permettono di studiare la variabilità del clima su diverse scale temporali, ma anche di validare le osservazioni satellitari e di contribuire a migliorare i modelli climatici regionali e/o globali, a beneficio delle proiezioni sul clima futuro.

Le proiezioni climatiche mostrano come la regione del Mediterraneo sia e sarà particolarmente sensibile all'aumento della temperatura globale, sia in termini di aumento di eventi estremi (ondate di calore, siccità, incendi, forti e localizzate precipitazioni) che di variazioni dei parametri medi che ne caratterizzano il clima (aumento della temperatura del mare e dell'atmosfera, diminuzione delle precipitazioni annue, acidificazione ed aumento del livello del mare). Per studiare la variabilità della composizione atmosferica e gli effetti che ne derivano sul bilancio energetico della regione, l'ENEA sul finire degli anni '90, ha avviato la Stazione di Osservazioni Climatiche di Lampedusa. Grazie al suo isolamento geografico e alla distanza dalle maggiori sorgenti emissive naturali ed antropiche Lampedusa è un sito ideale per valutare i cambiamenti in atto nella regione Mediterranea, siano essi di origine naturale che antropica. Negli anni la Stazione è divenuta un Osservatorio integrato dedicato allo studio dell'atmosfera, del mare e degli ecosistemi.

Anche l'Osservatorio montano di Piano Battaglia, situato all'interno del parco delle Madonie, rappresenta un sito di fondo per lo studio dei

cambiamenti nella composizione dell'atmosfera grazie alle misure di concentrazione di CO₂ e CH₄ iniziate nel 2005. La sua posizione permette anche di studiare fenomeni di trasporto a lungo raggio di masse d'aria di diversa provenienza e di analizzarne gli effetti sulla variabilità atmosferica. L'Antartide rappresenta la principale riserva d'acqua dolce del pianeta; la sua conformazione geografica ne fa la regione più isolata e la meno soggetta all'influenza delle attività antropiche. Eppure, gli effetti del riscaldamento globale cominciano ad essere visibili anche in questa regione specialmente in alcuni suoi settori, come la Penisola Antartica. È quindi di fondamentale importanza lo studio della variazione del suo sistema climatico che assieme all'Oceano meridionale svolge un ruolo determinante nella regolazione del clima terrestre. Personale ENEA fin dalla prima spedizione del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide nel 1986 ha avviato il monitoraggio meteo-climatico nell'area della Baia di Terranova, nel mare di Ross, dove sorge la base italiana Mario Zucchelli, estendendolo negli anni ad una più ampia regione lungo le coste della Terra di Vittoria ed all'interno del continente sul Plateau orientale.

L'Artide è la regione che sta mostrando il più rapido aumento della temperatura pari a circa tre volte quello medio del pianeta, effetto noto come Amplificazione Artica. Questo veloce riscaldamento produce effetti sugli ecosistemi artici ed è alla base del crescente sfruttamento di risorse naturali presenti nella regione. In Artide le variazioni climatiche sono dominate da complesse interazioni tra criosfera, oceano e atmosfera evidenziate dalla rapida diminuzione della superficie del ghiaccio marino in tutto l'Oceano Artico avvenuta nelle ultime decadi. Esiste anche un legame tra ciò che avviene nella stratosfera artica e le variazioni nella circolazione in troposfera alle medie latitudini. Attualmente l'ENEA assieme all'INGV, all'Università di Roma e Firenze porta avanti attività presso il Thule High Arctic Atmospheric Observatory (THAAO), all'interno della Pituffik Space Base, nel nord-ovest della Groenlandia. Le osservazioni continuative permettono di studiare i principali processi coinvolti nell'Amplificazione Artica.

ANTARCTIC REGION

The Italian Antarctic Meteo-Climatological Observatory (IAMCO) is a long-term project funded by the Italian National Antarctic Research Program (PNRA) and coordinated by the ENEA Laboratory for Air Quality Models and Measurements and Climate Observations. Established in 1986, the Observatory began its activities with the installation of several automatic weather stations (AWS) and the launch of atmospheric radiosoundings, aimed at monitoring meteorological conditions in the area selected for the construction of Italy's first scientific base in Antarctica, located in Terra Nova Bay, within the Victoria Land region.

Today, in collaboration with other countries operating across the Antarctic continent, the Meteo-Climatological Observatory contributes to the monitoring of atmospheric dynamics and their variability across different time scales with the goal of improving our understanding of global climate change.

The Observatory collects meteorological data both at the surface and throughout the atmospheric column. Over the years, it has expanded its measurements to include snow accumulation and transport, as well as precipitation.

Since 1985, the AWS network managed by the Observatory has grown significantly, becoming one of the most extensive monitoring systems in Antarctica. This network supports both scientific research and logistical operations conducted as part of the Italian polar program. At present, the Observatory operates 16 AWS, installed and maintained across the continent during the 40 scientific expeditions carried out by the PNRA to date. The network spans from the Mario Zucchelli Station, located along the coast of Victoria Land, to the Italian-French Concordia Station, situated at 3,233 meters above sea level on the East Antarctic Plateau.

The data collected by the Observatory—freely accessible to the scientific community at www.climantartide.it—are also integrated into global observation systems such as the WMO's GTS and GCOS networks, as well as into national and international data repositories, including the National Antarctic Data Center (NADC), the SCAR Antarctic Master Directory (AMD), and AGCS-MetREADER.

IAMCO has also contributed to international initiatives such as the Year of Polar Prediction, an effort led by the World Meteorological Organization (WMO) to improve weather forecasting in polar regions through intensive measurement campaigns conducted in both the Arctic and Antarctic.

Equipments:

- Two VAISALA radiosounding systems (at MZS and DC) for atmospheric profiling (from the surface up to ~25 km) of temperature, pressure, humidity, and wind;
- Sixteen automatic weather stations, operating year-round, for the measurement of pressure, temperature, relative humidity, wind speed and direction (some also record snow depth and radiation);
- VAISALA ceilometers C51 (at MZS and DC) and C61 (at MZS, also equipped with depolarization capability) for measuring cloud base height, vertical aerosol distribution, and characterizing snowfall;
- Mooglow All-Sky Camera for monitoring cloud cover;
- Total Precipitation Weighing Sensor (MPS system) for measuring precipitation amounts;
- Micro Rain Radar MRR-2 (Metek) for determining precipitation rate and hydrometeor size distribution;
- Two Thies Clima laser disdrometers (at MZS and DC) for measuring the number, size, and fall velocity of hydrometeors;
- A driftometer for quantifying blowing snow transport;
- Four stake farms at AWS sites on the Plateau for measuring snow accumulation.



ANTARTIDE

L'Osservatorio Meteo-Climatologico Antartico (Italian Antarctic Meteo-Climatological Observatory, IAMCO) è un progetto di lungo periodo finanziato dal Programma Nazionale di Ricerche in Antartide (PNRA), ed è coordinato dal personale del Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche dell'ENEA. L'Osservatorio nasce nel 1986 con l'installazione di alcune stazioni meteorologiche automatiche (AWS) e poi con l'inizio dell'attività di radiosondaggio atmosferico destinate al monitoraggio delle condizioni atmosferiche dell'area individuata per la realizzazione della prima Base scientifica italiana in Antartide, nell'area della Baia Terra Nova, nella regione Terra Vittoria.

Oggi, in analogia e in collaborazione con gli altri Paesi operanti sul territorio antartico l'Osservatorio Meteo-Climatologico, contribuisce al monitoraggio della dinamica atmosferica antartica e delle sue variazioni su differenti scale temporali al fine di migliorare la conoscenza dei cambiamenti climatici globali.

L'Osservatorio esegue il monitoraggio dei parametri meteorologici sia alle superficie che in quota ed ha ampliato, nel corso degli anni, il set di dati raccolti con misure di accumulo e trasporto della neve e di precipitazione.

A partire dal 1985, l'insieme delle AWS dell'Osservatorio è stato ampliato a tal punto da costituire una fra le più estese reti di monitoraggio dell'Antartide a supporto dei progetti scientifici e delle attività logistiche del programma italiano. Attualmente, l'Osservatorio gestisce una rete di 16 AWS, che sono state installate e mantenute in funzione sul territorio antartico nel corso delle 40 spedizioni scientifiche svolte finora dal PNRA. La rete osservativa dell'Osservatorio Meteo-Climatologico si estende a partire dalla base italiana Mario Zucchelli lungo le coste della Terra Vittoria, fino alla stazione italo-francese Concordia, a 3233 m sul livello del mare, nella parte più interna del Plateau orientale.

I dati dell'Osservatorio, disponibili alla comunità scientifica attraverso il sito web www.climantartide.it confluiscono anche nei network dell'Organizzazione Mondiale della Meteorologia WMO-GTS and GCOS, e in database nazionali (National Antarctic Data Center NADC) ed internazionali (SCAR Antarctic Master Directory (AMD) and AGCS-MetREADER) L'Osservatorio Meteo-Climatologico ha contribuito ad iniziative internazionali come lo Year Of Polar Prediction dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/WMO), con lo scopo di migliorare le capacità di previsione dei modelli meteorologici nelle aree polari, coordinando campagne di misura intensive sia in Artide che in Antartide.

Strumenti:

- Due sistemi (a MZS e DC) di radiosondaggio atmosferico, con ricevitore, antenna e sonde Vaisala per profili verticali in atmosfera (dal suolo a circa 25 km) di temperatura, pressione, umidità e vento;
- 16 stazioni meteorologiche automatiche, in funzione tutto l'anno per la misura di pressione, temperatura, umidità relativa, velocità e direzione del vento (in alcune anche altezza della neve e radiazione)
- Ceilometers VAISALA C51 (a MZS e DC) e C61 (anche con depolarizzazione a MZS) per la misura dell'altezza delle nubi, della distribuzione verticale dell'aerosole e la caratterizzazione della precipitazione nevosa
- All Sky Camera Mooglow per la copertura nuvolosa pluviometro per la quantità totale di precipitazione;
- radar Doppler MRR-2 a 24GHz per il tasso di precipitazione e distribuzione dimensionale delle idrometeore;
- Due disdrometri (a MZS e DC) laser per misura del numero, della dimensione e della velocità di caduta delle idrometeore;
- Diftrometro per la misura del trasporto di neve
- Campi paline nei siti delle AWS di Plateau per la misura dell'accumulo nevoso.



ARCTIC REGION

The Arctic region, where the widest and fastest changes related with climate are occurring, plays a fundamental role for climate research and for global geopolitics.

Within this context, ENEA has been carrying out since 1990 research activities at the Thule High Arctic Atmospheric Observatory (THAAO, <https://www.thuleatmos-it.it/index.php>), in North Western Greenland. The research activities are carried out in collaboration with Sapienza University of Rome, University of Florence, INGV, and with international institutions (NSF, NCAR, AFRL, NASA), also through participation in global measurement networks (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC) and international projects (e.g., the recent ARCSIX, Arctic Radiation-Cloud-Aerosol-Surface Interaction Experiment organized by NASA).

In last decades the Arctic region has warmed about three times faster than the global scale (this phenomenon is also known as Arctic amplification), and a significant reduction of sea ice extension has been observed throughout the year, but particularly in late summer. At the same time, the continental ice is also declining, contributing to the global sea level increase. Changes occurring in the polar regions involve interactions among atmosphere, land, ocean, sea and land ice through various and complex feedback mechanisms in which solar and infrared radiation, clouds, atmospheric particles, play a relevant role.

A full understanding of the complex processes occurring in the Arctic is still lacking, and their representation in climate models is often problematic, also due to the limited availability of continuous observations, which are sparse and very difficult to be maintained in the extreme Arctic environmental conditions.

ENEA early activities at THAAO have been directed at investigating middle atmospheric processes and the ozone destruction phenomenon; starting from mid 2000's, measurements were added aimed at studying the impact of aerosol and clouds on the surface radiation budget and the climate change processes.

The THAAO observatory over the years contributed to many international research programmes, such as the Year of Polar Prediction, organized by the World Meteorological Organization; this programme had the objective to improve the forecasting capabilities of meteorological models in the polar areas, also through coordination of intensive field activities both in the Arctic and in Antarctica.

Equipments:

- Lidar system (5 channels, two wavelengths, depolarization diversity) for tropospheric and lower stratospheric aerosol and clouds, and middle atmosphere temperature profiles (together with Physics Dep. Sapienza University of Rome);
- CMP21 pyranometer for downwards solar irradiance;
- CGR4 pyrgeometer for downward infrared irradiance;
- PAR radiometer for downward photosynthetic irradiance;
- CMP21 pyranometer for upward solar irradiance and surface albedo;
- CGR4 pyrgeometer for upward infrared irradiance;
- PAR radiometer for upward photosynthetic irradiance and photosynthetic surface albedo;
- Moonglow all sky camera for cloud cover;
- sun photometers for spectral measurements of aerosol optical depth;
- Lufft Ceilometer CHM15k to detect cloud base and aerosol vertical distribution;
- Giano aerosol sampler for PM10, and subsequent determinations of aerosol concentration and chemical composition;
- 2 weather stations for pressure, temperature, humidity, wind speed and direction (together with INGV);
- rain/snow gauge for total precipitation;
- 24GHz MRR-2 Doppler radar for rain rate and precipitation size distribution;
- disdrometer for precipitation size and falling velocity;
- snow level sensor;
- TRIOS zenith sky UV-Vis spectrometer to measure cloud microphysical parameters and optical depth (together with INGV);
- Vaisala radiosounding system to measure pressure, temperature, humidity and wind vertical profile (INGV);
- Water Vapor Emission Spectrometer for Polar Atmospheres at 22 GHz (VESPA22) to measure total column water vapour and water vapour profiles in the middle atmosphere (INGV);
- GNSS receiver for ionospheric scintillations (INGV);
- Fourier transform infrared interferometer for gaseous atmospheric constituents (NCAR, USA);
- Cimel Sun photometer for atmospheric aerosol optical properties (NASA, USA).

ARTIDE

La regione Artica, che sta subendo i cambiamenti climatici più ampi e rapidi del pianeta, riveste un ruolo fondamentale per la ricerca sul clima, oltre che per gli equilibri geopolitici globali.

In questo contesto, l'ENEA è attiva presso il Thule High Arctic Atmospheric Observatory (THAAO) dal 1990, in collaborazione con l'Università Sapienza di Roma, l'Università di Firenze e l'INGV, oltre ad istituzioni straniere (NSF, NCAR, AFRL e NASA), con la partecipazione consolidata a reti di misura globali (Network for the Detection of Atmospheric Composition Change, NDACC) e progetti internazionali (ARCSIX, Arctic Radiation-Cloud-Aerosol-Surface Interaction Experiment della NASA).

Negli ultimi decenni la temperatura nella regione Artica è cresciuta ad una velocità che è circa tre volte più grande rispetto al resto del pianeta (da qui il nome di Amplificazione Artica) e si è assistito ad una riduzione nell'estensione del ghiaccio marino durante tutto l'anno, soprattutto nella stagione estiva. Parallelamente, il ritiro del ghiaccio nella parte interna della Groenlandia sta contribuendo all'innalzamento del livello del mare.

I cambiamenti osservati nelle regioni polari riguardano le interazioni tra l'atmosfera, il suolo, l'oceano ed il ghiaccio marino attraverso numerosi e complessi meccanismi di retroazione, che vedono coinvolti la radiazione (solare ed infrarossa), l'umidità atmosferica, le nubi, il ghiaccio marino e terrestre.

La comprensione dei processi interessati è particolarmente complessa, così come la loro rappresentazione nei modelli climatici, anche a causa del fatto che osservazioni continuative in queste aree sono difficili da mantenere a causa delle condizioni climatiche estreme.

L'ENEA presso il THAAO, dopo aver indirizzato la maggior parte delle risorse allo studio della media atmosfera e alla distruzione dell'ozono stratosferico ad opera dei CloroFluoroCarburi (CFC), a partire da metà degli anni 2000 pone sempre maggiore attenzione allo studio della bassa atmosfera, all'impatto delle nubi e dell'aerosol sul bilancio radiativo alla superficie e al cambiamento climatico in atto nella regione artica.

L'Osservatorio ha contribuito ad iniziative internazionali come lo Year Of Polar Prediction dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM/WMO), con lo scopo di migliorare le capacità di previsione dei modelli meteorologici nelle aree polari, coordinando campagne di misura intensive sia in Artide che in Antartide.

Strumenti:

- Sistema Lidar (5 canali, due lunghezze d'onda, depolarizzazione) per profili verticali di aerosol e nubi in troposfera e bassa stratosfera, di temperatura in atmosfera media (in collaborazione con il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma Sapienza);
- piranometro CMP21 per la misura della componente verso il basso dell'irradianza solare;
- pirgeometro CGR4 per la misura della componente verso il basso dell'irradianza infrarossa;
- radiometro PAR per la misura della componente verso il basso dell'irradianza fotosintetica;
- piranometro CMP21 per la misura della componente verso l'alto dell'irradianza solare e albedo;
- pirgeometro CGR4 per la misura della componente verso l'alto dell'irradianza infrarossa;
- radiometro PAR per la misura della componente verso l'alto dell'irradianza solare fotosintetica e albedo PAR;
- all sky camera Moonglow per la copertura nuvolosa;
- fotometri solari per lo spessore ottico atmosferico in varie bande di frequenza;
- Ceilometer Luftt CHM15k per l'altezza della base delle nubi e distribuzione verticale di aerosol;
- campionatore GIANO per la concentrazione e composizione chimica di PM10;
- 2 stazioni meteorologiche per la pressione, temperatura, umidità, intensità e direzione del vento (in collaborazione con INGV);
- pluviometro per la quantità totale di precipitazione;
- radar Doppler MRR-2 a 24GHz per il tasso di precipitazione e distribuzione dimensionale delle idrometeore;
- disdrometro per la dimensione e velocità di caduta delle idrometeore;
- sensore di livello della neve.
- spettrometro zenitale UV-Vis TRIOS; spessore ottico e parametri microfisici delle nubi (in collaborazione con INGV);
- sistema di radiosondaggi meteorologici con ricevitore, antenna e sonde Vaisala per profili verticali in atmosfera di temperatura, pressione, umidità e vento (INGV);
- Water Vapor Emission Spectrometer for Polar Atmospheres at 22 GHz (VESPA22) per profili di vapor d'acqua in atmosfera media e vapor acqueo colonnare (INGV);
- sistema GNSS per la scintillazione ionosferica (INGV);
- spettrometro FTIR (con Trasformata di Fourier nell'Infrarosso) per la misura della concentrazione colonnare di gas atmosferici (NCAR, USA);
- fotometro solare Cimel per le proprietà ottiche dell'aerosol atmosferico (NASA, USA).

MEDITERRANEAN SEA

Lampedusa Station for Climate Observations

The ENEA Station for Climate Observations on the island of Lampedusa (<https://www.lampedusa.enea.it/>) is a research infrastructure in the Mediterranean dedicated to the measurement of relevant climate parameters and coordinated by the staff of the Laboratory for Models and Measurements for Air Quality, and Climate Observations of ENEA. Lampedusa is an integrated observatory composed of three sections:

- an Atmospheric Observatory located on the island, operational since 1997 and dedicated to the research on changes in the structure and composition of the atmosphere and their effects on surface radiation.
- an Oceanographic Observatory located in the open sea, operational since 2015 and composed of an instrumented buoy with various sensors dedicated to the research of air-sea interactions and the validation of satellite observations.
- an Ecosystem Observatory located on the island, operational since 2023 and dedicated to the measurement of atmospheric concentration and vegetation-atmosphere fluxes of CO₂, meteorological parameters, solar and infrared radiation.

The “Roberto Sarao” Atmospheric Observatory aims to assess the atmospheric composition and its variability over different time scales. It is dedicated both to the monitoring of the main greenhouse gases such as carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and various other gases, and to the study of the radiation budget (upward and downward component of short- and long-wave radiation, spectral radiation in the ultraviolet, global, direct and diffuse radiation in some selected bands) and of some important parameters that can influence it (total ozone and water vapor, aerosol optical thickness, physical and micro-physical characteristics of clouds). The study is carried out by combining long-term measurements and intensive campaigns. During intensive campaigns additional instruments (radiosoundings, lidars, radiometers and spectroradiometers in different spectral bands) are added to obtain a more detailed characterization of the atmospheric structure and composition and of the radiative fluxes at the surface. If available, observations from satellites or aircraft are also used. The collected measurements are analyzed and integrated, also by using a detailed radiative transfer model to accurately describe the atmospheric vertical structure and the properties of aerosols and clouds.

The Oceanographic Observatory is located about 8 km from the west coast of the island, on a seabed of about 74 m. It is an elastic beacon designed to minimize rotations and oscillations due to wave motion. There are instruments installed in the air to measure meteorological parameters and radiation on different bands, instruments in the sea to characterize temperature, salinity, dissolved oxygen at different depths from 1 to 32 m, dissolved CO₂ concentration, pH, chlorophyll and turbidity, dissolved organic matter, photosynthetically active radiation, underwater noise, and to measure marine currents. Part of the instrumentation is from CNR-ISMAR and CNR-IAS. The site is particularly interesting for verifying satellite observations and numerical models. The analysis of the collected data allows, among other things, to monitor the evolution of CO₂ exchanges between the atmosphere and the sea and to detect and study marine heat waves.

The Terrestrial Ecosystem Observatory is located in a reforestation area of the island and consists of a 10 m tower on which instruments are installed to measure CO₂ exchanges between vegetation and the atmosphere through the eddy covariance technique. These measurements are related to meteorological conditions, radiation levels, and precipitation, measured by sensors installed at different altitudes and at the surface, as well as to soil characteristics (temperature, humidity, heat flows) measured by sensors positioned in trenches.

The Station is included in the European Research Infrastructures:

- ACTRIS - Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure, for European observations and scientific research on aerosols, clouds and trace gases;
- ICOS - Integrated Carbon Observation System, to improve our understanding of greenhouse gas emissions and absorption;
- EMSO - European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory, to study the processes occurring in the water column and deep sea.

Furthermore, the Station participates in several international networks such as AERONET - AErosol RObotic NETwork (NASA) for aerosol properties, BSRN - Baseline Surface Radiation Network (GEWEX) for the surface solar and infrared radiation budget, EMEP - European Monitoring and Evaluation Programme (ONU-ECE) for the transboundary monitoring of atmospheric pollutants, Global Atmosphere Watch (World Meteorological Organization) and Global Greenhouse Gas Reference Network of NOAA (USA) for the measurement of greenhouse gases, as well as in the national network for mercury using passive sensors.

Equipments:

Atmospheric Observatory "Roberto Sarao" Lampedusa

- Aerosol lidar [insieme all'Università di Roma; Aerosol Backscattering e Profili di Depolarizzazione] - dal 1999.
- Meteorological station [pressure, temperature, humidity, wind speed and direction, precipitation (Vaisala)] - since 1999.
- Non-dispersive Infra-red (I) analyzer [atmospheric CO₂ concentration (the system includes a Siemens 5E analyzer)] - weekly samples, since 1992; continuous, 1998-2012.
- Gaschromatograph [atmospheric concentration of CH₄, N₂O, CFC-11 and CFC-12 (HP 6890)] - weekly samples, since 1997; continuous, 2006-2012.
- Cavity ring-down spectroscopy analyzer [atmospheric CO₂, CO, CH₄ (Picarro G2401)] - since 2012.
- Cavity ring-down spectroscopy analyzer for CO₂ and CH₄ isotopes (Picarro G2201i) - since 2022
- Brewer MK III spectrophotometer (total ozone, spectral UV irradiance, aerosol optical depth) - since 1998.
- Visible Multi Filter Rotating Shadowband Radiometer [MFRSR; aerosol optical depth at several wavelengths, diffuse-to-direct irradiance ratio, column water vapor, aerosol single scattering albedo (Yankee Environmental Systems MFR-7)]; 2001-2020.
- Ultraviolet Multi Filter Rotating Shadowband Radiometer [UV-MFRSR; aerosol optical depth at several wavelengths, diffuse-to-direct irradiance ratio (Yankee Environmental Systems UV-MFR-7)]; 2004-2006, restarted in 2010.
- Cimel CE-318 solar/lunar/sky photometer [aerosol optical and microphysical parameters] - 2000-2005, restarted in 2010.
- Middleton 4-channel sun-photometer, wide field of view [aerosol optical depth, column water vapour] - since 2013.
- Middleton 4-channel sun-photometer, narrow field of view [aerosol optical depth, column water vapour] - since 2013.
- PM-10 aerosol sampler [Tecora Skypost, daily chemical analyses performed at the University of Florence; FAI Hydra, University of Florence] - 2004-2022.
- Dadolab Giano PM10/TSP particle sampler [PM10 and total suspended particles daily chemical analyses performed at the University of Florence] Particle soot/absorption photometer [PSAP; aerosol absorption coefficient; LSCE/IPSL] - 2010-2017.
- Eppley Precision Spectral Pyranometer /Kipp and Zonen CMP22 [downward shortwave irradiance (Eppley)] - since 2003.
- Precision Infrared Radiometer [downward longwave irradiance (Eppley)] - since 2003.
- Shaded CGR4 pyrgeometer [downward longwave irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2007.
- Shaded CMP21 [diffuse downward shortwave irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2006.
- CHP1 pyrheliometer [direct normal irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2011.
- Photosynthetic radiation radiometer [downward photosynthetically active radiation (Li-cor)] - since 2004.
- Diffuse Photosynthetic radiation radiometer [downward photosynthetically active radiation (Li-cor)] - since 2016
- Actinic radiation spectrometer [actinic radiation spectra, photodissociation rates (Metcon GmbH)] - since 2004.
- UV-Vis-near IR spectrometer [global spectral irradiance (Satlantic HyperOCR)] - since 2013.
- CARAGA aerosol sampler [dust/aerosol total deposition; LISA] - 2011-2017.
- Total sky imager [cloud cover (Yankee Environmental Systems TSI 440)] - 2003-2024.
- Water vapor Raman lidar [day/nighttime vertical profiles of water vapor, aerosol extinction (jointly with University of Rome)] - since 2009.
- Vaisala radiosonde [temperature, pressure, humidity, wind (Vaisala Digicora III)] - since 2004.
- SODAR [wind vertical profiles, three components, RSE] - 2006-2010.
- RPG Hat-Pro Microwave radiometer [temperature, water vapour, clouds vertical profiles] - 2009; -2010-2014, restarted 2021.
- IR camera [IR radiance in the atmospheric window (Heitronics)] - 2009; restarted in 2010.
- Ozone analyzer [surface ozone mixing ratio; Province of Agrigento] - 2003, 2006-2007, 2010-2013.
- Ozone analyzer [surface ozone mixing ratio; ISAC/CNR] - since 2014.
- ICOS automatic flask sampling unit - since 2024
- Pylon TEL1/MIAM Radon mapper - since 2022
- ENEA gas sampling unit [weekly analyses of CFC-113, HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HFC-134a, SF₆, CH₃Cl, CH₃Br, CH₂Cl₂, CCl₄, CH₃CCl₃, Halon-1211, Halon-1301, CH₂Br₂, CH₃I, CHCl₃, made at ENEA, Rome] - 2004-2014.
- NOAA gas sampling unit [weekly analyses of CO₂, CH₄, SF₆, CO, 13C, H₂, 18O, made at NOAA] - weekly analyses since 2006.
- Doppler Cloud Radar Metek MIRA 35C [continuous clouds and precipitations vertical profile] - since 2023.
- Ceilometer Lufft CHM15K [continuous aerosols vertical profile] - since 2020.
- Disdrometer Thies Laser Precipitation Monitor [number and size distribution of hydrometeors] - since 2022.
- Pluviometer OTT Pluvio2 [precipitation amount], since 2022.

- Total sky imager ASI 16 [cloud cover] - since 2024.
- Optical particle counter, Grimm11-D [number and size distribution of aerosols, 0,25-30 micron] - since 2025.
- Aethalometer Magee A-33 [aerosol extinction at 7 wavelengths from 370 to 950 nm] - since 2025.

Oceanographic Observatory

- Meteorological station [air pressure, temperature, humidity (Vaisala)] - since 2017.
- Sonic anemometer [wind direction and velocity (Gill)] - since 2017.
- CGR4 pyrgeometer [downward longwave irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2015.
- CMP21 pyranometer [downward shortwave irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2015.
- Photosynthetic radiation radiometer [downward photosynthetically active radiation (Li-cor)] - since 2017.
- Electronic level [sensor attitude] - since 2015.
- Satlantic HyperOCR [spectral downwelling irradiance; CNR-ISMAR] - since 2018.
- WebCAM - since 2023
- Seabird SBE39P at 1 m depth [ocean pressure and temperature] - since 2017.
- Seabird SBE39P at 2 m depth [ocean pressure and temperature] - since 2017.
- 2xSatlantic OCR-507ICSW at 2.5 m depth (upwelling and downwelling 7-band irradiances; CNR-ISMAR) - since 2018.
- 2 x Satlantic Hyper-OCR at 2.5 m depth (downwelling and upwelling spectral irradiance; CNR]
- Seabird SBE50 at 2.5 and 6 m depth [pressure; CNR]
- Seabird PAR sensor at 2.5 m [PAR irradiance]
- Seabird EcoTriplet at 5 m depth [backscattering, chlorophyll, F-DOM]
- ProOceanus Pro CO₂ V at 5 m depth [pCO₂]
- Seabird SBE16 at 5 m depth [temperature, salinity, pressure, dissolved oxygen]
- Seabird SeaFET at 5 m depth [pH]
- Satlantic HyperOCR at 6 m depth (downwelling spectral irradiance; CNR]
- Satlantic HyperOCRS at 6 m depth [upwelling spectral radiance; CNR]
- Seabird SBE50 at 6 m depth [pressure; CNR]
- Seabird SBE37 at 18 m depth [ocean pressure, temperature, salinity, dissolved oxygen]
- Seabird EcoTriplet at 17 m depth [backscattering, chlorophyll, F-DOM; CNR]
- Soundtrap ST600 Underwater sound recorder at 20 m depth [Underwater noise, mammals; CNR]
- Seabird SBE39P at 42 m depth [ocean pressure and temperature]
- Acoustic Doppler Current Profiler at 42 m [current in the 0-40 m depth range]

Ecosystem Observatory

- Li7200 gas analyzer [CO₂ and H₂O concentrations for eddy covariance measurements, Licor] - since 2023.
- HS-50 sonic anemometer [tridimensional wind for eddy covariance measurements, Gill] - since 2023.
- CNR4 net radiometer [downward and upward shortwave and longwave irradiance (Kipp and Zonen)] - since 2023.
- SPN1 radiometer [downward global and diffuse shortwave irradiance (Delta-T)] - since 2023.
- Photosynthetic radiation radiometers [downward and upward photosynthetically active radiation (Li-cor)] - since 2023.
- HMP155 Thermoigrometers [air temperature and relative humidity at 4 altitudes (Vaisala)] - since 2023.
- WindSonic WS75 anemometer [horizontal wind components (Gill)] - since 2023.
- Li850 gas analyzer [CO₂ and H₂O concentrations, Licor] - since 2023.
- CS106 barometer [atmospheric pressure (Campbell Scientific)] - since 2023.
- T-200B pluviometer [precipitation amount (Geonor)] - since 2023.
- LPM disdrometer [number and size distribution of hydrometeors (Thies Clima)] - since 2023.
- Soil thermometers [soil temperature at 3 depths (Campbell Scientific)] - since 2023.
- CS 616 soil sensor [soil water content (Campbell Scientific)] - since 2023.
- HFP01SC-15 plate [soil heat flux (Campbell Scientific)] - since 2023.



Lampedusa Research Laboratory.

Madonie-Piano Battaglia Observatory (PA)

The Madonie-Piano Battaglia Observatory is located at about 1,700 meters above sea level, in the municipality of Petralia Sottana (Palermo) and is coordinated by the staff of the Laboratory of Models and Measurements for Air Quality and Climate Observations of ENEA. It represents one of the eight greenhouse gas monitoring sites in Italy and has been officially recognized as a regional station for the entire central Mediterranean area, within the global network for the study of climate change, Global Atmosphere Watch (GAW), which involves about 80 countries and is part of the World Meteorological Organization. The high altitude, the geographical position, the absence of local contamination and the accuracy of the measurements make it a site of excellence for monitoring and studying the mechanisms linked to climate change on a regional and global scale.

High-quality measurements of greenhouse gases (CO_2 , CH_4) are carried out, together with meteorological parameters (wind, temperature, pressure, humidity), solar and infrared radiation. The analyses of CO_2 and CH_4 concentrations are carried out with instrumentation and protocols similar to those used in Lampedusa, to guarantee equal levels of accuracy.

Equipments:

- ENEA gas sampling unit per CO_2 e CH_4
- Data Logger Campbell: CR1000;
- Campbell CS100 for atmospheric pressure;
- Campbell HC2S3-L for temperature and humidity;
- Sonic anemometer Gill windisonic4-L mod.1405-PK-021 for wind speed and direction;
- Pluviometer Campbell SBS500/A;
- Radiometer Kipp&Zonen CNR4, for incident and outgoing solar and infrared radiation.

MEDITERRANEO

Stazione di Osservazione Climatica (<https://www.lampedusa.enea.it/index.php?lang=it>)

La stazione di Osservazioni Climatiche ENEA sull'isola di Lampedusa è una infrastruttura di ricerca nel Mediterraneo dedicata alla misura di parametri di rilevanza per il clima e coordinata dal personale del Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche dell'ENEA. Lampedusa è un osservatorio integrato composto da tre sezioni:

- un Osservatorio Atmosferico situato sull'isola, operativo dal 1997 e dedicato alla ricerca dei cambiamenti nella struttura e composizione dell'atmosfera e dei loro effetti sulla radiazione superficiale.
- un Osservatorio Oceanografico situato in mare aperto, operativo dal 2015 e composto da una boa strumentata con vari sensori dedicati alla ricerca delle interazioni aria-mare e alla validazione di osservazioni satellitari
- un Osservatorio Ecosistemico situato sull'isola, operativo dal 2023 e dedicato alla misura di concentrazione atmosferica e flussi vegetazione-atmosfera di CO₂, parametri meteorologici, radiazione solare ed infrarossa.

L'Osservatorio Atmosferico "Roberto Sarao" ha lo scopo di definire la composizione dell'atmosfera a lungo termine, ed in particolare è dedicato al monitoraggio dei principali gas serra come anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O) e vari altri gas. Inoltre, l'Osservatorio è dedicato allo studio del bilancio radiativo (componente verso l'alto e verso il basso della radiazione ad onda corta e lunga, radiazione spettrale nell'ultravioletto, radiazione globale, diretta e diffusa in alcune bande selezionate) e di alcuni importanti parametri che possono influenzarlo (ozono e vapore acqueo totali, spessore ottico dell'aerosol, contenuto di acqua liquida delle nubi). Lo studio è condotto combinando misurazioni a lungo termine e campagne intensive.

Durante campagne intensive vengono aggiunti ulteriori strumenti (palloncini meteorologici, lidar, radiometri e spettrometri in diverse bande spettrali) per ottenere una caratterizzazione più dettagliata della struttura e composizione atmosferica e dei flussi radiativi in superficie. Se disponibili, vengono utilizzate anche osservazioni compiute da satelliti o da aerei. Le misurazioni raccolte vengono analizzate in maniera integrata, anche mediante l'uso di un dettagliato modello di trasferimento radiativo sviluppato specificamente per descrivere con precisione la struttura verticale atmosferica e le proprietà dell'aerosol e delle nubi.

L'Osservatorio Oceanografico si trova a circa 8 km dalla costa ovest dell'isola, su un fondale di circa 74 m. Si tratta di una meda elastica progettata per minimizzare le rotazioni e le oscillazioni dovute al moto ondoso. Vi sono installati strumenti in aria per la misura di parametri meteorologici e radiazione su diverse bande, strumenti in mare per la caratterizzazione di temperatura, salinità, ossigeno disciolto a diverse profondità da 1 a 32 m, concentrazione di CO₂ disciolta, pH, clorofilla e torbidità, materia organica disciolta, radiazione fotosinteticamente attiva, rumore sottomarino, e per la misura delle correnti marine. Parte della strumentazione è di CNR-ISMAR e CNR-IAS. Il sito è particolarmente interessante per la verifica di osservazioni satellitari e di modelli numerici. Le analisi dei dati dell'osservatorio permettono tra l'altro di monitorare l'evoluzione degli scambi di CO₂ tra atmosfera e mare e di rilevare e studiare le ondate di calore marine.

L'Osservatorio dell'Ecosistema Terrestre si trova in una zona di rimboschimento dell'isola ed è costituito da un traliccio di altezza di 10 m su cui sono installati strumenti per misurare gli scambi di CO₂ tra la vegetazione e l'atmosfera attraverso la tecnica dell'eddy covariance. Tali misure sono messe in relazione alle condizioni meteorologiche, ai livelli di radiazione, alla precipitazione, misurate da sensori installati a diverse quote ed in superficie, nonché alle caratteristiche del suolo (temperatura, umidità, flussi di calore) misurate da sensori posizionati in trincee.

La stazione è inclusa nelle Infrastrutture di Ricerca Europee :

- ACTRIS - Aerosol, Clouds and Trace Gases Research Infrastructure, per le osservazioni e la ricerca scientifica europea su aerosol, nubi e gas in traccia
- ICOS - Integrated Carbon Observation System, per migliorare la nostra comprensione delle emissioni e degli assorbimenti di gas a effetto serra
- EMSO - European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory, per studiare i processi che avvengono nella colonna d'acqua e nel mare profondo.

Inoltre, la stazione partecipa a diversi network internazionali quali AERONET - AErosol RObotic NETwork (NASA) per le proprietà dell'aerosol, BSRN - Baseline Surface Radiation Network (GEWEX) per il bilancio superficiale della radiazione solare, EMEP - European Monitoring and Evaluation Programme (ONU-ECE) per il monitoraggio transfrontaliero degli inquinanti atmosferici, Global Atmosphere Watch (World Meteorological Organization) e Global Greenhouse Gas Reference Network della NOAA (USA) per la misura dei gas ad effetto serra, nonché alla rete nazionale per il mercurio mediante sensori passivi.

Strumenti:

Osservatorio Atmosferico "Roberto Sarao" Lampedusa

- Lidar [profili di backscattering e depolarizzazione degli aerosol e di vapor acqueo, in collaborazione con Università di Roma "La Sapienza"] - dal 1999.
- Stazione meteorologica [pressione, temperatura, umidità, velocità e direzione del vento, precipitazione (Vaisala)] - dal 1999.
- Analizzatore CRDS [concentrazione di CO₂, CO, CH₄ in atmosfera (Picarro G2401)] - dal 2012.
- Analizzatore CRDS [isotopi del carbonio in CO₂ e CH₄ (Picarro G2201i)] - dal 2022.
- Analizzatore NDIR [concentrazione di CO₂] - 1992-2012.
- Gascromatografo con ECD e FID [concentrazione di CH₄, N₂O, CFC] - 1995-2012
- Spettrofotometro Brewer MKIII [ozono totale, irradianza spettrale UV, spessore ottico degli aerosol] - dal 1998.
- Radiometro Ultraviolet Multi Filter Rotating Shadowband Radiometer [spessore ottico degli aerosol a sette lunghezze d'onda, rapporto diffusa/diretta (Yankee Environmental Systems UV-MFR-7)]; 2004-2006, dal 2010.
- Fotometro solare/lunare [spessore ottico degli aerosol, distribuzione dimensionale, indice di rifrazione (Cimel CE-318-TP9)] - 2000-2005, dal 2010.
- Fotometro solare a quattro canali, campo di vista largo [spessore ottico degli aerosol, vapor acqueo colonnare (Middleton SP02)] - dal 2013.
- Fotometro solare a quattro canali, campo di vista stretto [spessore ottico degli aerosol, vapor acqueo colonnare (Middleton SP02-L)] - dal 2013.
- Campionatore di PM10/TSP [analisi chimiche sui campioni effettuate dall'Università di Firenze FAI Hydra/Dadolab Giano)] - dal 2004.
- Piranometri [irradianza solare globale, diffusa e riflessa (Eppley PSP/Kipp and Zonen CMP21 e CMP22)] - dal 2004.
- Pirgeometri [irradianza infrarossa incidente ed emessa dalla superficie (Epey PIR/Kipp and Zonen CGR4)] - dal 2004.
- Pireliometro [irradianza solare diretta (Kipp and Zonen CHP1)] - dal 2011.
- Sensore di quanto [radiazione fotosinteticamente attiva globale e diffusa (Li-cor Li190R)] - dal 2004.
- Attinometro [flusso attino spettrale, tassi di fotodissociazione (Metcon GmbH)] - dal 2004.
- Spettrometri UV-Vis-vicino IR [irradianza spettrale incidente (Satlantic HyperOCR, Trios Ramses)] - dal 2013.
- Sistema di radiosondaggi [profili di temperatura, pressione, umidità, vento (Vaisala Digicora III)] - dal 2004.
- Radiometro a microonde [vapor acqueo colonnare, contenuto di acqua liquida nelle nubi, profili di temperature e vapor acqueo (RPG- HATPRO)] - 2009-2014, dal 2021.
- Pirometro [radianza/temperature di brillantezza IR nella finestra atmosferica (Heitronics KT19.85)] - dal 2009.
- Analizzatore di ozono [rapporto di mescolamento dell'ozono superficiale; CNR-ISAC] - dal 2014.
- Campionatore automatico ICOS in flask [campioni settimanali per analisi di concentrazione di CO₂, CO, CH₄, altri gas serra ed isotopi di C e O in atmosfera, analisi condotte presso i laboratori analitici di ICOS] - dal 2024.
- Campionatore di radon [livelli di radon in atmosfera (MIAM Pylon TEL1)] - dal 2022.
- Unità di campionamento di gas NOAA [campioni settimanali per analisi di concentrazioni di CO₂, CH₄, SF₆, CO, 13C, H₂, 18O, analisi condotte presso NOAA] - dal 2006.
- Radar Doppler per nubi/precipitazione [profili verticali di nubi e precipitazione (Metek MIRA 35C)] - dal 2023.
- Nefoipsometro [profili verticali di aerosol, altezza delle nubi (Luft CHM15K)] - dal 2020.
- Disdrometro [numero e distribuzione dimensionale delle idrometeore (Thies Clima Laser Precipitation Monitor)] - dal 2022.
- Pluviometro [precipitazione (OTT Pluvio2)], dal 2022.
- Imager per immagini del cielo [copertura nuvolosa (EKO Instruments ASI 16)] - dal 2024.
- Contatore ottico di particelle [numero e distribuzione dimensionale delle particelle nell'intervallo 0.25-30 micron (Grimm11-D)] - dal 2025.
- Etalometro [estinzione degli aerosol a sette lunghezze d'onda tra 370 e 950 nm (Magee A-33)] - dal 2025..

Osservatorio Oceanografico

- Stazione meteorologica [pressione, temperatura, umidità (Vaisala)] - dal 2017.
- Anemometro sonico [direzione e velocità del vento (Gill)] - dal 2017.
- Pirgeometro [irradianza infrarossa incidente (Kipp and Zonen CGR4)] - dal 2015.

- Piranometro [irradianza solare incidente (Kipp and Zonen CMP21)] - dal 2015.
- Sensore di quanto [radiazione fotosinteticamente attiva incidente (Li-cor Li190R)] - dal 2017.
- Spettrometro per irradianza solare [irradianza spettrale incidente (Satlantic HyperOCR); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- WebCAM - dal 2023.
- Sensore di pressione/temperatura ad 1 m di profondità [pressione e temperatura (Seabird SBE39P)] - dal 2017.
- Sensore di pressione/temperatura a 2 m di profondità [pressione e temperatura (Seabird SBE39P)] - dal 2017.
- Sensore di pressione a 2.5 e 6 m di profondità [pressione (Seabird SBE50); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- Radiometro PAR a 2.5 m di profondità [radiazione fotosinteticamente attiva in mare (Seabird PAR)] - dal 2021.
- Sensore triplet a 5 m di profondità [backscattering, clorofilla, F-DOM (Seabird EcoTriplet)] - dal 2018.
- Sensore di CO₂ disciolta in mare a 5 m di profondità [pCO₂ (ProOceanus Pro CO₂ V)] - dal 2021.
- Sonda multiparametrica a 5 m di profondità [temperatura, pressione, salinità, ossigeno disciolto (Seabird SBE16)] - dal 2021.
- Sensore di pH a 5 m di profondità [pH (Seabird SeaFET)] - dal 2021.
- 2 x spettrometri a 6 m di profondità [irradianza spettrale verso l'alto e verso il basso (Satlantic HyperOCR); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- Spettrometro per radianza a 6 m di profondità [radianza spettrale verso l'alto (Satlantic HyperOCRS); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- Sensore di pressione a 6 m di profondità [pressione (Seabird SBE50); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- Sonda multiparametrica a 18 m di profondità [temperatura, pressione, salinità, ossigeno disciolto (Seabird SBE37)] - dal 2018.
- Sensore triplet a 17 m di profondità [backscattering, clorofilla, F-DOM (Seabird EcoTriplet); CNR-ISMAR] - dal 2018.
- Sensore acustico Soundtrap ST600 a 20 m [rumore sottomarino, cetacei; CNR-IAS] - dal 2024.
- Sensore di pressione/temperatura a 32 m di profondità [pressione e temperatura (Seabird SBE39P)] - dal 2023.

Osservatorio dell'Ecosistema Terrestre

- Analizzatore veloce di CO₂/H₂O [concentrazioni di CO₂ e H₂O in atmosfera per misure di eddy covariance (Li-cor Li7200)] - dal 2023.
- Anemometro sonico tridimensionale [componenti del vento per misure di eddy covariance (Gill HS-50)] - dal 2023.
- Radiometro netto [irradianza solare ed infrarossa verso l'alto e verso il basso (Kipp and Zonen CNR4)] - dal 2023.
- Radiometro solare per irradianza solare/diffusa [irradianza solare globale e diffusa (Delta-T SPN1)] - dal 2023.
- Sensore di quanto [radiazione fotosinteticamente attiva globale e diffusa (Li-cor Li190R)] - dal 2023.
- 4 x termoigrometro [temperatura e umidità a quattro quote (Vaisala HMP155)] - dal 2023.
- Anemometro bidimensionale [direzione e velocità orizzontale del vento (Gill WindSonic WS75)] - dal 2023.
- Analizzatore di CO₂/H₂O [concentrazione di CO₂ e H₂O in atmosfera, Li-cor Li850] - dal 2023.
- Barometro [pressione atmosferica (Campbell Scientific CS106)] - dal 2023.
- Pluviometro [precipitazione (Geonor T-200B)] - dal 2023.
- Disdrometro [numero e distribuzione dimensionale delle idrometeore (Thies Clima Laser Precipitation Monitor)] - dal 2023.
- 3 x termometro per suolo [temperatura del suolo a tre profondità (Campbell Scientific 107)] - dal 2023.
- Sonda di umidità nel suolo [contenuto volumetrico di umidità nel suolo (Campbell Scientific CS 616)] - dal 2023.
- Piastra di flusso [flusso di calore nel terreno (Campbell Scientific HFP01SC-15)] - dal 2023.



Laboratorio di Ricerca di Lampedusa.

Osservatorio delle Madonie-Piano Battaglia (PA)

L'Osservatorio delle Madonie-Piano Battaglia, si trova a circa 1.700 metri di quota, nel comune di Petralia Sottana (Palermo) ed è coordinato dal personale del Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche dell'ENEA. Rappresenta uno degli 8 punti di monitoraggio dei gas serra in Italia ed è stato ufficialmente riconosciuto come Stazione regionale per tutta l'area del Mediterraneo centrale, nell'ambito della rete mondiale per lo studio del cambiamento climatico, Global Atmosphere Watch (GAW), che coinvolge circa 80 Paesi e fa parte del WMO, l'Organizzazione Meteorologica Mondiale. L'alta quota, la posizione geografica, l'assenza di contaminazioni locali e l'accuratezza delle misure ne fanno un sito di eccellenza per il monitoraggio e lo studio dei meccanismi legati al cambiamento climatico su scala regionale e globale.

Vengono effettuate misure di alta qualità di gas serra (CO_2 , CH_4), insieme a parametri meteorologici (vento, temperatura, pressione, umidità), radiazione solare e infrarossa. Le analisi delle concentrazioni di CO_2 e CH_4 vengono effettuate con strumentazione e protocolli analoghi a quelli utilizzati a Lampedusa, così da garantire pari livelli di accuratezza.

Strumenti:

- Unità di campionamento gas ENEA (CO_2 , CH_4)
- Data Logger Campbell: CR1000;
- Campbell CS100 per la pressione atmosferica;
- Campbell HC2S3-L per temperatura e umidità;
- Anemometro sonico Gill windsonic4-L mod.1405-PK-021 per velocità e direzione del vento;
- Pluviometro Campbell SBS500/A;
- Radiometro Kipp&Zonen CNR4, per radiazione solare incidente e uscente e radiazione infrarossa.

OCEANOGRAPHIC OPERATIONAL MODELS

Operational marine forecasting systems are critical for multiple applications, both globally and in regional contexts such as the Mediterranean Sea.

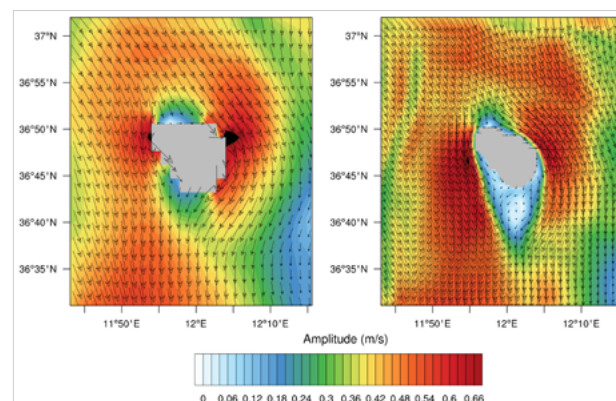
ENEA has developed the MITO system, which produces daily 5-day forecasts of the marine circulation (current fields temperature salinity and sea level) in the Mediterranean Sea and currently it represents the highest resolution forecasting system of the circulation existing in the basin. The operational system is based on MITgcm model and has the horizontal resolution of about 2 km. MITO includes tidal forcing, and at surface is forced by very high resolution atmospheric data. MITO has been producing hourly output for about five years and has been very useful for studies of coastal dynamics and on the effects of the tide on the circulation (<https://geoweb.enea.it>).

MITO can provide essential information for navigation, reducing the risk of accidents and improving the management of maritime traffic, can help predict the dispersion of pollutants (e.g., oil spills), and be very useful for the fisheries and aquaculture sector. The MITO system has also been used for years to optimize marine energy production (wind, from currents, waves) and offshore infrastructure management.

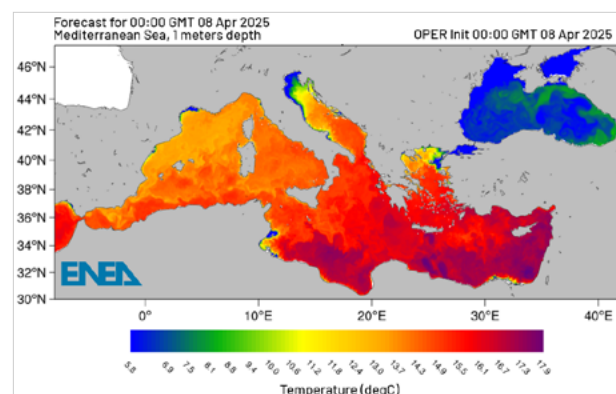
As part of the initiatives for the development of new technologies, with a focus on the conversion of wave energy into electricity, the island of Pantelleria was chosen as a pilot site for the installation of the innovative 'Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)' device, designed to optimise wave energy production by exploiting the specific conditions of the Mediterranean Sea.

Although MITO system provides fundamental boundary conditions for local simulations, its resolution (order of kilometres) is not sufficient to capture the finer ocean dynamics that are crucial for optimising the anchoring of the PeWEC. In particular, the complexity of bathymetry and the presence of eddies require a more detailed representation of currents to ensure the correct positioning of the device.

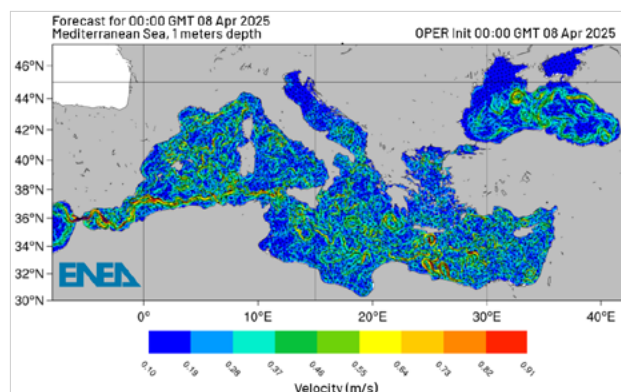
High-resolution numerical simulations are therefore essential for the study of complex oceanic phenomena, especially in coastal and insular areas.



Surface speed around Pantelleria for 10 september 2024 at 00:00. On the left MITO model, on the right MITO HR PANT.



Forecast of water Temperature at 1m depth provided by ENEA MITO operational system for 8 April 2025.



Forecast of water velocity at 1m depth provided by ENEA MITO operational system for 8 April 2025.

In Pantelleria, the use of a spatial resolution of around 500 metres allows for more accurate representation of vertical circulation and mixing processes, which are crucial for the design and operation of marine energy devices such as the PeWEC. Therefore, a high-resolution model of the circulation around the island of Pantelleria, called 'MITO HR PANT', based on the same code used in MITO, was realised.

The model domain covers the area around the island of Pantelleria and therefore has four open boundaries; these represented one of the main modelling challenges. Having several open boundaries in fact introduces considerable complexity, since each open boundary represents an input or output for momentum, heat and salinity from the computational domain, requiring careful management to avoid instability problems and inconsistencies with the physical system.

MODELLISTICA OCEANOGRAFICA OPERATIVA

I sistemi operativi di previsione della circolazione marina sono fondamentali per molteplici applicazioni, sia a livello globale che in contesti regionali come il Mar Mediterraneo.

L'ENEA ha sviluppato il sistema MITO, che produce previsioni giornaliere a 5 giorni della circolazione marina (correnti, temperatura, salinità e livello del mare) nel mar Mediterraneo, ed attualmente esso rappresenta il sistema di previsioni della circolazione a più alta risoluzione esistente nel bacino. Il sistema operativo è basato sul modello MITgcm del MIT ed ha una risoluzione orizzontale di circa 2 km, include il forzante mareale ed è forzato in superficie da dati atmosferici ad altissima risoluzione. MITO produce output da circa cinque anni con frequenza oraria ed ha consentito di realizzare studi importanti di dinamica costiera e studi sugli effetti della marea sulla circolazione (<https://geoweb.enea.it>)

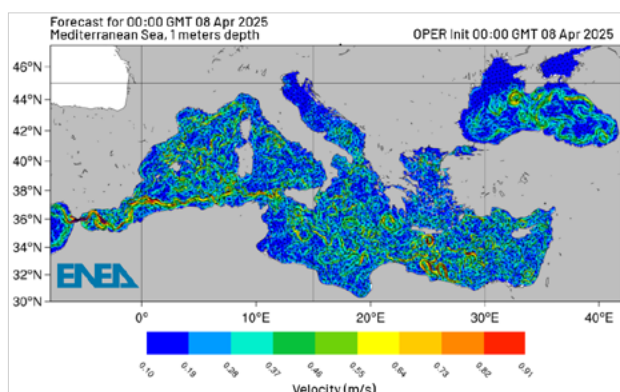
MITO può fornire informazioni essenziali per la navigazione, riducendo il rischio di incidenti e migliorando la gestione del traffico marittimo, può aiutare a prevedere la dispersione di inquinanti (es. sversamenti di petrolio -oil spill) ed essere molto utile per il settore della pesca e l'acquacoltura. Il sistema MITO da anni è anche utilizzato per ottimizzare la produzione di energia marina (dalle correnti e dalle onde) e per la gestione delle infrastrutture offshore.

Nell'ambito delle iniziative per lo sviluppo di nuove tecnologie, con particolare attenzione alla conversione dell'energia del moto ondoso in energia elettrica, l'isola di Pantelleria è stata scelta come sito pilota per l'installazione dell'innovativo dispositivo "Pendulum Wave Energy Converter (PeWEC)", progettato per ottimizzare la produzione di energia dalle onde, sfruttando le condizioni specifiche del Mediterraneo.

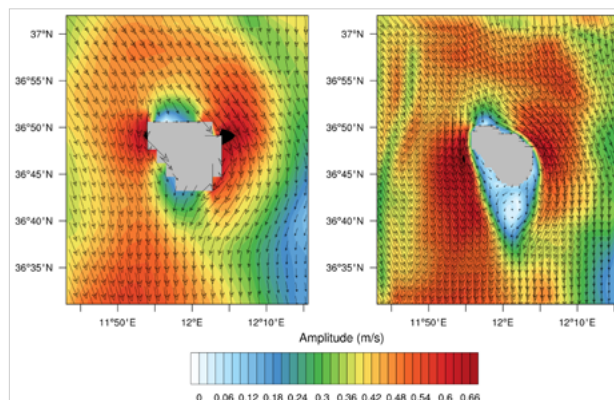
Sebbene il modello MITO fornisca condizioni al contorno fondamentali per le simulazioni locali, la sua risoluzione (ordine di chilometri) non è sufficiente per catturare le dinamiche oceaniche più fini, cruciali per l'ottimizzazione dell'ancoraggio del PeWEC.

In particolare, la complessità della batimetria e la presenza di vortici richiedono una rappresentazione più dettagliata delle correnti per assicurare il corretto posizionamento del dispositivo. Simulazioni numeriche ad alta risoluzione sono dunque essenziali per lo studio di fenomeni oceanici complessi, specialmente in aree costiere e insulari.

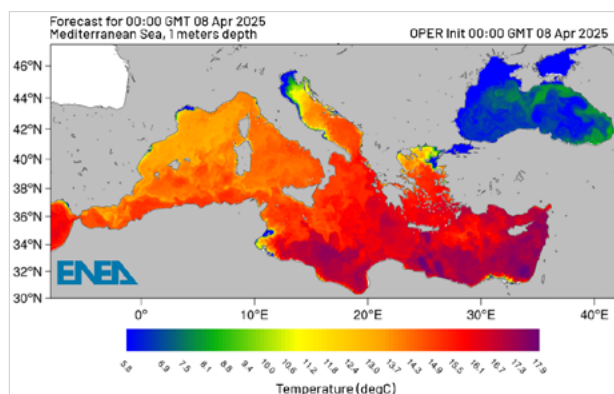
A Pantelleria l'uso di una risoluzione spaziale di circa 500 metri consente di rappresentare con maggiore precisione



Previsione della velocità della corrente ad 1 metro di profondità prodotta dal modello operativo ENEA MITO per l'8 Aprile 2025.



Campo di velocità intorno all'isola di Pantelleria del 10 settembre 2024 alle ore 00:00. Modello MITO a sinistra, modello MITO HR PANT a destra.



Previsione della temperatura del mare ad 1 metro di profondità prodotta dal modello operativo ENEA MITO per l'8 Aprile 2025.

i processi di circolazione e mescolamento verticale, che sono cruciali per la progettazione e il funzionamento di dispositivi di energia marina come il PeWEC. E' stato pertanto realizzato il modello ad altissima risoluzione della circolazione attorno all'isola di Pantelleria, chiamato "MITO HR PANT", basato sullo stesso codice MITgcm utilizzato in MITO.

Il dominio del modello copre l'area attorno all'isola di Pantelleria avendo pertanto quattro frontiere aperte (open boundaries); queste hanno rappresentato una delle principali sfide modellistiche. Avere più frontiere aperte introduce infatti complessità notevoli, poiché ogni lato aperto rappresenta un ingresso o uscita per quantità di moto, calore e salinità dal dominio di calcolo, richiedendo una gestione accurata per evitare problemi di instabilità e incongruenze con il sistema fisico.

WAVES MODELS

The availability of reliable climatology and forecasts of wind-induced waves is crucial for the management of human activities at sea, the safety of coastal communities and the development of a variety of coastal and ocean engineering applications. Wave forecasts over short timescales are mainly utilized for early warning and coastal management interventions, whereas the availability of wave climatologies (e.g. wave height typical range and likelihood of occurrence) allows to characterize the frequency of extreme events and to quantify the stresses exerted on the coastal environment, for both present climate and future climate change scenarios.

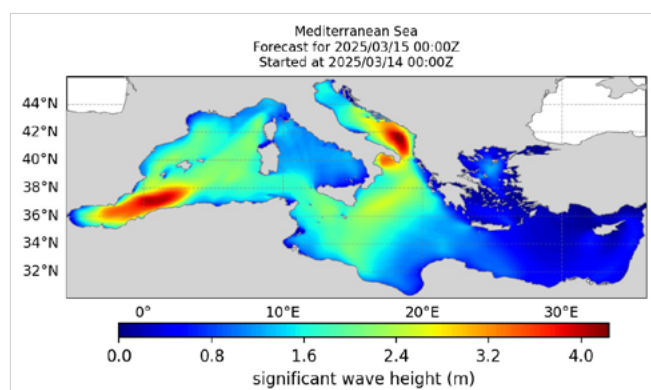
State of the art numerical models can effectively complement field observations for the study of surface water waves and represent a valuable support tool for the design and operation of assets at sea, including built infrastructures and energy converter devices.

An operational wave forecast system has therefore been developed at ENEA, to support the development of innovative wave converters and to provide the necessary parameters for device calibration. It has been operatively running since 2014, covering the entire Mediterranean basin at a spatial resolution of $1/32^\circ$ (approximately 3.5 km), with hourly output frequency. Higher resolution forecasts are routinely produced for selected areas characterized by sustained wave motion, at $1/128^\circ$ spatial resolution. The system is forced by the wind fields predicted by an atmospheric circulation model.

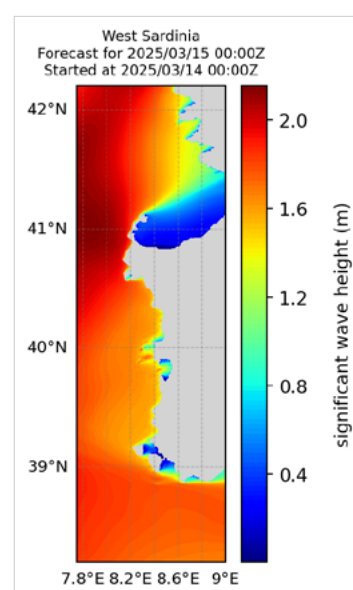
The standard forecast output includes significant wave height, mean and peak period, and wave direction. Detailed wave-energy spectra can be constructed at selected locations, providing valuable information on the available energy resource and allowing the preliminary assessment of the potential site productivity, if the specific device characteristics are known. Over its operational life, the forecast system has been validated against in situ-measurements (buoy data), satellite data and reanalyses products, with good results.

Moreover, in the context of EU research projects, wave climatologies have been produced at ENEA, to account for possible changes in wave characteristics that, in concomitance with rising sea level and storm frequency in the Mediterranean, can determine an increase in the magnitude and frequency of coastal hazards. Such studies also provide useful information for marine energy exploitation initiatives via the deployment of Wave Energy Converters (WECs).

In particular, the Wavewatch model (WW3) has been used at ENEA to produce climatological datasets for the European islands in the Atlantic Ocean (Azores, West Indies, Canaries and Madeira), characterizing their present wave climate (reference period: 1996-2005) and future changes under the highest emission IPCC scenario RCP8.5 (periods: 2036-2045 and 2091-2100).



Wave forecast for the entire Mediterranean basin at $1/32^\circ$ resolution.



Wave forecast for one of the Mediterranean sub-basins at $1/128^\circ$ resolution.

In conjunction with further downscaling of the atmospheric forcing fields down to 5 km, these simulations have also been used to prescribe the boundary conditions to higher resolution experiments ($1/128^\circ$ of spatial resolution) aiming to reproduce extreme events that cause coastal flooding in the Gulf of Naples. Wave projections have been combined with those obtained for the local sea level and tide to derive the overall statistics of potentially threatening sea water levels, the analysis of their expected magnitude and frequency being crucial to support the design of effective policies and interventions.

On the other hand, a preliminary resource assessment has been conducted to evaluate the feasibility of wave energy deployment in the area.

MODELLISTICA MOTO ONDOSO

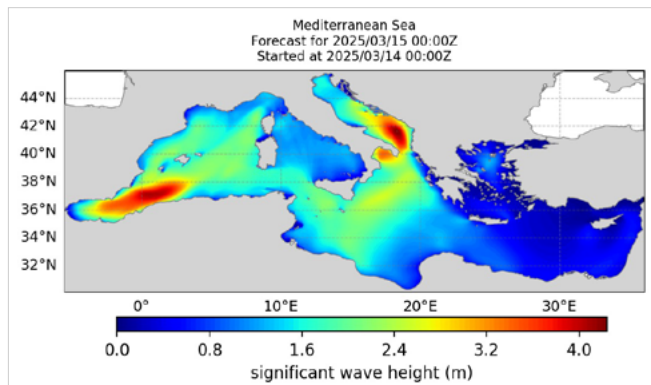
La disponibilità di previsioni e climatologie affidabili dello stato del mare è cruciale per la gestione delle attività umane connesse allo sfruttamento delle risorse marine, per la sicurezza delle comunità costiere e per lo sviluppo delle infrastrutture marittime. Le previsioni del campo d'onda sul breve periodo vengono soprattutto utilizzate per i sistemi di allerta e a supporto di interventi gestionali e di manutenzione, mentre le informazioni sulle scale di lungo periodo (ad es., i valori tipici di altezza d'onda e la loro frequenza) consentono di caratterizzare la probabilità di verificarsi di eventi estremi e di valutare quantitativamente le pressioni cui è soggetto l'ambiente costiero, sia in condizioni di clima presente che per scenari futuri di cambiamento climatico.

L'ultima generazione di modelli numerici per la previsione delle onde si è dimostrata capace di integrare efficacemente le osservazioni sperimentali e costituisce ormai uno strumento consolidato per la progettazione, la manutenzione e l'operatività delle infrastrutture e delle attività marittime.

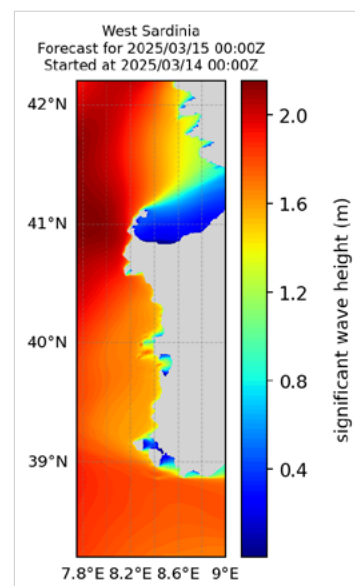
ENEA ha sviluppato un sistema di previsione del moto ondoso a supporto dello sviluppo di convertitori innovativi, fornendo inoltre in tempo reale i parametri necessari ad ottimizzarne le prestazioni di esercizio. Viene utilizzato in modalità operativa dal 2014 e copre l'intero bacino mediterraneo ad una risoluzione spaziale di $1/32^\circ$ (circa 3.5 km) e una risoluzione temporale pari ad un'ora. Previsioni a più alta risoluzione vengono regolarmente prodotte per aree selezionate, caratterizzate da un moto ondoso più sostenuto, ad una risoluzione spaziale di $1/128^\circ$. Il sistema è forzato dai campi di vento prodotti da un modello previsionale atmosferico.

I parametri forniti includono: altezza d'onda significativa, periodo medio e periodo di picco e direzione. Spettri di energia dettagliati possono essere ricavati nelle località di interesse, fornendo un'utile valutazione della risorsa energetica disponibile nonché della produttività potenziale del sito, note le caratteristiche tecniche del dispositivo. Il sistema è stato costantemente validato tramite confronto con dati osservati in-situ (boe), dati tele-rilevati da satellite e rianalisi, con buoni risultati. Inoltre, nel contesto di progetti di ricerca europei, l'ENEA ha prodotto climatologie del moto ondoso per il Mediterraneo e le isole europee dell'Atlantico, allo scopo di individuare eventuali variazioni nelle caratteristiche delle onde che, in concomitanza con l'innalzamento del mare e aumentate frequenza e intensità dei cicloni, possano incrementare i rischi costieri. Tali banche dati contengono anche informazioni utili ai progetti di sfruttamento delle energie marine, in particolare quelli dedicati allo sviluppo di convertitori di energia dal moto ondoso (Wave Energy Converters - WECs).

Il modello Wavewatch (WW3) è stato utilizzato per produrre dati climatologici per le isole europee dell'Atlantico (Azzorre, Indie Occidentali, Canarie e Madera), caratterizzandone il moto ondoso in condizioni di clima presente (periodo di riferimento: 1996-2005) e per uno scenario futuro (scenario IPCC RCP8.5) in cui non si preveda la riduzione delle emissioni climalteranti (periodi: 2036-2045 e 2091-2100).



Previsione del moto ondoso per l'intero bacino Mediterraneo alla risoluzione di $1/32^\circ$.



Previsione del moto ondoso per uno dei sottobacini mediterranei alla risoluzione di $1/128^\circ$.

Queste simulazioni sono state utilizzate, insieme all'ulteriore zoom dei campi meteorologici fino a 5 km di risoluzione, per prescrivere le condizioni al contorno di esperimenti a più alta risoluzione ($1/128^\circ$ di risoluzione spaziale), mirati a riprodurre specifici eventi estremi che si verificano nel Golfo di Napoli. I parametri d'onda ottenuti sono stati combinati con le proiezioni del livello del mare (ottenute dal modello di circolazione oceanica dell'ENEA) e con l'oscillazione mareale, per valutare la probabilità che si registrino valori estremi del livello del mare potenzialmente pericolosi, la cui caratterizzazione in termini di entità e frequenza è cruciale per la pianificazione di misure di adattamento efficaci.

I dati climatologici sono stati utilizzati anche per una quantificazione preliminare della risorsa energetica, allo scopo di valutare la fattibilità di impianti di conversione di energia del moto ondoso nell'area.

LABORATORY OF AIR POLLUTION MEASUREMENT AND ANALYSIS

The activities focus on sampling, analysis and chemical-physical characterization of atmospheric pollutants (also those regulated by European and national air quality legislation), with a particular attention on the various components of atmospheric particulate matter (aerosol) from anthropogenic and natural sources (Bologna and Casaccia offices).

The Models and Measurements for Air Quality and Climate Observations Laboratory conducts experimental activities focused on the chemical-physical characterization of atmospheric particulate matter (PM), together with the development of innovative methods for sampling and analysing atmospheric pollutants, as well as the testing and comparison of prototypes, instruments, and accessories for monitoring atmospheric pollutants.

Studies and research are carried out through experimental campaigns to measure indoor and outdoor air quality, using an instrumental set-up that includes off-line samplers (which collect samples for subsequent analysis in the laboratory) and on-line samplers (which analyse samples directly in the field) and a transportable measurement station (20-foot instrumented container). The chemical-physical characterization of particulate matter, using laboratory analytical instruments, consists in the analysis of its main components, such as the carbon fraction (elemental carbon - EC, equivalent black carbon - EBC, organic carbon - OC, anhydrosugars - levoglucosan and its isomers), the inorganic fraction (water-soluble inorganic ions) and metals and trace elements.

Besides, by applying Source Apportionment techniques with receptor models (e.g. Positive Matrix Factorization - PMF) to the chemical-physical characterization data, the pollutants are appropriately grouped allowing the identification and quantification of the different PM sources emissions, e.g. vehicular traffic, biomass combustion, secondary pollution.

Experimental data are also utilized to support or validate mathematical models for atmospheric pollution simulation (see dedicated sheet), thereby providing crucial insights and strategic guidance for national and international policy management and decision-making processes. Therefore, the Models and Measurements for Air Quality and Climate Observations Laboratory is able to assist and support public administrations (e.g. ministries and national, regional or local bodies) and private entities in determining and analysing emission sources and atmospheric pollution at medium and local scales, contributing to the assessment of potential impacts on human health, ecosystems, natural/anthropogenic landscapes and materials.

Equipments:

- 2 x FAI HYDRA Dual Sampler PM10/PM2.5/PM1 for PM sampling;
- 2 x FAI SILENT PM2.5 indoor for PM sampling;
- Tisch-Analitica Dust sampler High Volume PM2.5 for PM sampling;
- Ultra-Micro Balance Sartorius Cubis® MCA2.7S-2S00-M for determination of the PM mass concentration with gravimetric method;
- Sunset OC-EC Laboratory Analyser for analysis of the carbon fraction of PM with thermo-optical method;
- Thermo Scientific Dionex ICS3000 for analysis of anhydrosugars in PM;
- Thermo Scientific Dionex Ion Chromatography ICS1100 for analysis of water soluble ions in PM;
- RIGAKU NEX CG Energy Dispersive X-ray fluorescence spectrometer (ED-XRF) for analysis of metals and trace elements in PM
- Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) 3938 TSI Incorporated for analysis of dimensional distribution of Ultra Fine Particles;
- ENVIRONcheck EDM 107 GRIMM Aerosol Technik for determination with optical method of the PM mass concentration and size distribution of the number of particles;
- Aerodyne Research Inc. ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor) for analysis at high-time resolution of inorganic ions and non-refractory organic fraction in PM1;
- Aerosol Magee Scientific_Aethalometer_Model AE 43 for analysis at high-time resolution of Equivalent Black Carbon;
- Nephelometer Acoem Aurora NE for analysis of air visibility;
- Sunset Model-4 Semi-Continuous OC-EC Field Analyzer PM2.5/PM1 for analysis at high-time resolution of PM carbon fraction;
- URG 9000-D. Ambient Ion Monitor (AIM) PM2.5 for analysis at high-time resolution of water soluble ions in PM;
- Vaisala Weather station MAWS100-WTX510.



PM10 filter sampling station in measurement campaign.

LABORATORIO DI MISURA E ANALISI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Si occupa di campionamento, analisi e caratterizzazione chimico-fisica di inquinanti atmosferici (anche normati nella legislazione europea e nazionale di qualità dell'aria) con focus sulle diverse componenti del particolato (aerosol) atmosferico di origine antropica o naturale (sedi di Bologna e Casaccia).

Il Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche svolge attività sperimentali volte alla caratterizzazione chimico-fisica del particolato atmosferico (PM) mediante misure off-line e on-line, allo sviluppo di metodi innovativi per il campionamento e l'analisi degli inquinanti atmosferici, allo svolgimento di test e confronto di prototipi, strumenti e accessori per il monitoraggio degli inquinanti atmosferici.

Gli studi vengono effettuati con campagne sperimentali di misura della qualità dell'aria indoor e outdoor, con l'utilizzo di una dotazione strumentale che include campionatori off-line (che raccolgono campioni per successive analisi in laboratorio) e on-line (che analizzano i campioni sul campo) e una stazione di misura trasportabile (container strumentato da 20 piedi). La caratterizzazione chimico-fisica del particolato consiste nell'analisi delle sue componenti principali, quali la frazione carboniosa (carbonio elementare - EC, black carbon equivalente - eBC, carbonio organico - OC, anidrozuccheri - levoglucosano e suoi isomeri), la frazione inorganica (ioni inorganici solubili in acqua WSII) e i metalli ed elementi in traccia, mediante strumenti analitici da laboratorio.

Applicando ai dati della caratterizzazione chimico-fisica tecniche di Source Apportionment con modelli al recettore (es. Positive Matrix Factorization - PMF), gli inquinanti vengono opportunamente raggruppati consentendone l'identificazione e la quantificazione delle diverse sorgenti di emissione di particolato: traffico veicolare, combustione di biomassa, inquinamento secondario, etc.

I dati di caratterizzazione sono anche usati per supportare o validare i modelli matematici per la simulazione dell'inquinamento atmosferico (vedi scheda dedicata), contribuendo a fornire elementi e indicazioni strategiche nei processi gestionali e decisionali di politica nazionale e internazionale. Il Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche è quindi in grado di coadiuvare e supportare pubbliche amministrazioni (ministeri, enti nazionali, enti regionali, enti locali) e soggetti privati nella determinazione e analisi delle fonti emmissive e dell'inquinamento atmosferico su area di scala media e locale, contribuendo alla valutazione dei potenziali impatti su salute umana, ecosistemi, paesaggio naturale/antropico e materiali.

Strumenti:

- 2 x FAI HYDRA Dual Sampler PM10/PM2.5/PM1 per il campionamento del PM
- 2 x FAI SILENT PM2.5 per il campionamento indoor del PM
- Tisch-Analitica Dust sampler High Volume PM2.5
- Ultra-Micro Balance Sartorius Cubis® MCA2.7S-2S00-M per la determinazione della concentrazione in massa del PM con metodo gravimetrico
- Sunset Laboratory OC-EC Lab. Aerosol Analyser per l'analisi della frazione carboniosa del PM con metodo termo-ottico
- Thermo Scientific Dionex ICS3000 per l'analisi degli anidrozuccheri nel PM
- Thermo Scientific Dionex Ion Chromatography ICS1100 per l'analisi della componente degli ioni inorganici solubili in acqua (WSII) nel PM
- RIGAKU NEX CG Energy Dispersive X-ray fluorescence spectrometer (ED-XRF) per l'analisi dei metalli e d elementi in traccia nel PM
- Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) 3938 TSI Incorporated per l'analisi della distribuzione dimensionale delle Particelle Ultrafini (Ultra Fine Particle_UFP)
- ENVIRONcheck EDM 107 GRIMM Aerosol Technik per la determinazione della concentrazione in massa del PM con metodo ottico e distribuzione dimensionale del numero delle particelle
- Aerodyne Research Inc. ACSM (Aerosol Chemical Speciation Monitor) PM1 analisi della speciazione chimica di Ioni inorganici e Frazione Organica non-refrattaria nel PM ad elevata risoluzione temporale
- Aerosol Magee Scientific_Aethalometer_Model AE 43 per l'analisi del Black Carbon equivalente ad elevata risoluzione temporale
- Nefelometro Multi lunghezza d'onda Acoem Aurora Serie NE per l'analisi della visibilità atmosferica
- Sunset Model-4 Semi-Continuous OC-EC Field Analyzer PM2.5/PM1 per l'analisi della frazione carboniosa dell'aerosol ad elevata risoluzione temporale
- URG 9000-D. Ambient Ion Monitor (AIM) PM2.5 per l'analisi dei WSII ad alta risoluzione temporale
- Vaisala Weather station MAWS100-WTX510



Cabina di campionamento di PM10 su filtro in campagna di misura.

SHORT-TERM AIR QUALITY FORECASTING IN ITALY AND EUROPE

MINNI system.

Daily operational air quality forecasts (for fine particulate matter, nitrogen oxides, ozone) are produced for Italy and Europe for the next 3-4 days. These forecasts rely on meteorological modelling, emission inventories and atmospheric transport and chemistry models (CTMs).

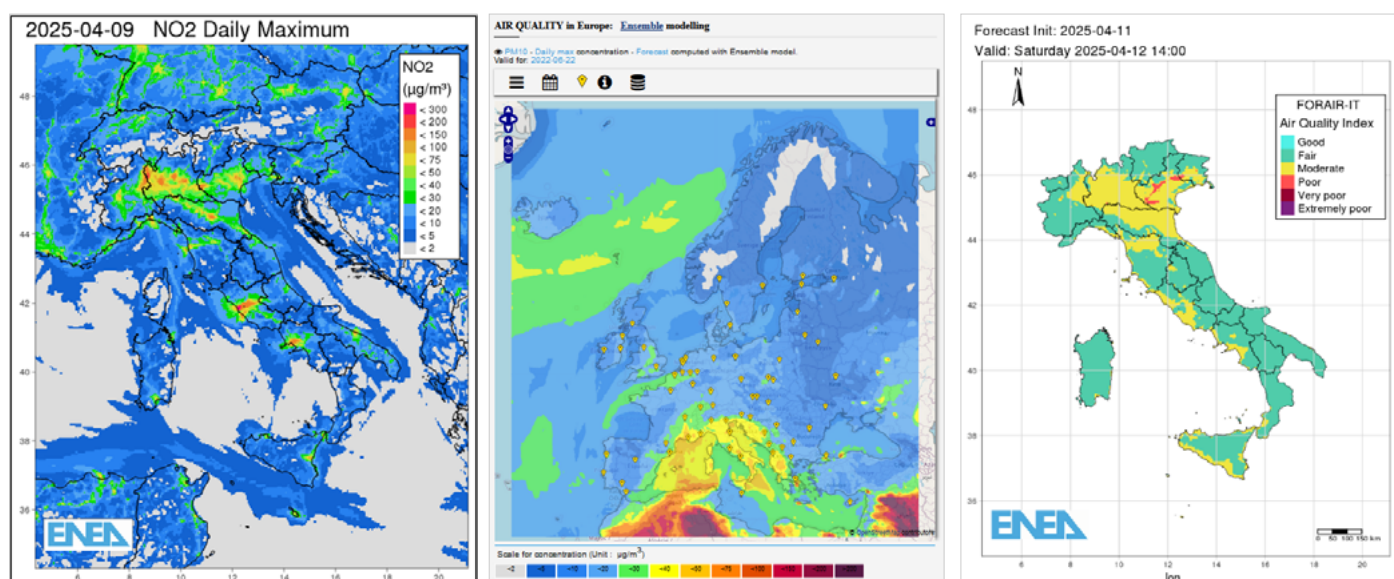
Short-term air quality forecasting provides valuable information to the public, helping individuals make informed decisions to reduce both their exposure to air pollution and their own emissions.

It is also a crucial tool for local authorities, who, under the European Air Quality Directive, are required to implement emergency plans during high-pollution episodes. These plans include measures to reduce emissions and limit population exposure, especially for vulnerable groups such as children, the elderly, and people with respiratory or cardiovascular conditions.

The MINNI-FORAIR system provides hourly meteorological and air quality forecasts across the entire Italian territory at 4 km horizontal resolution, for the following 3 days. These forecasts are available to the Ministry of Environment and Energy Security and to Regions, which may use them to drive their own high-resolution forecasting systems. Daily forecasts are published on ENEA's web portal (<https://clima.sostenibilita.enea.it/en/research/FORAIR-IT>). The system is also part of the National Collaboration Programme of the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS, the EU's Earth observation program).

On the European scale, the MINNI-CAMS system provides hourly air quality forecasts for the entire continent at a 10 km resolution, up to 4 days ahead. MINNI-CAMS is one of the 11 leading European modelling groups that are part of the Copernicus consortium for regional air quality. In addition to forecasting, the models produce daily analyses at surface-level for the main pollutant concentrations, integrating data from European air quality monitoring networks. Forecasts and analyses from all consortium members are used to compute an ensemble median, which currently offers the best estimate available. <https://atmosphere.copernicus.eu/european-air-quality-forecast-plots>.

All forecasts are powered by the ENEA's high-performance computing system CRESCO, which ensures a high level of reliability.



Air quality forecast maps: Italy – nitrogen dioxide (left), Europe – particulate matter (center), Italy – air quality index (right).

PREVISIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA A BREVE TERMINE IN ITALIA E IN EUROPA

Sistema MINNI.

Si effettuano quotidianamente previsioni operative di qualità dell'aria (polveri sottili, ossidi di azoto, ozono) in Italia e in Europa per i 3-4 giorni successivi, con l'uso della modellistica meteorologica, degli inventari delle emissioni di inquinanti atmosferici e dei modelli di trasporto e chimica dell'inquinamento atmosferico.

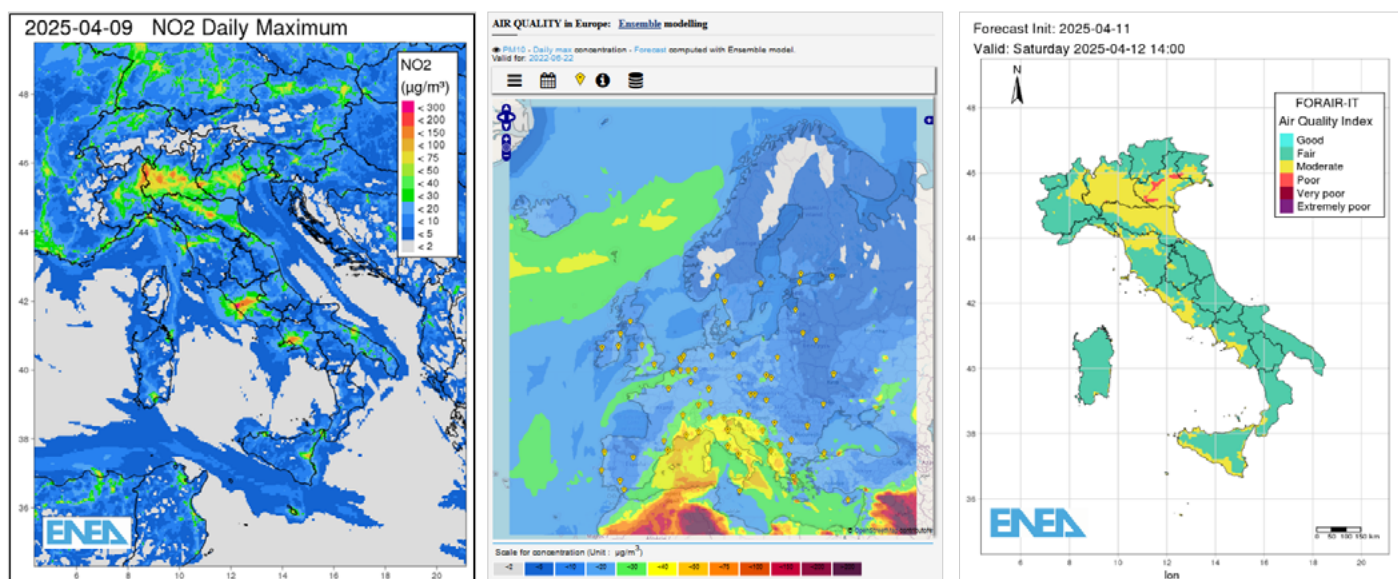
La previsione a breve termine della qualità dell'aria è utile per i cittadini, che possono adottare comportamenti consapevoli per ridurre la propria esposizione all'inquinamento atmosferico e per ridurre il proprio contributo alle emissioni inquinanti.

La previsione a breve termine dell'inquinamento atmosferico è utile anche per le amministrazioni locali, che ai sensi della Direttiva europea sulla Qualità dell'Aria devono attuare piani emergenziali in risposta agli episodi critici di inquinamento, con provvedimenti di limitazione delle emissioni e di riduzione dell'esposizione della popolazione all'inquinamento, in particolare per le fasce più vulnerabili (bambini, anziani, soggetti affetti da malattie respiratorie o cardiache).

Per l'Italia, il sistema MINNI-FORAIR effettua previsioni meteorologiche e di qualità dell'aria su tutto il territorio italiano, a 4 km di risoluzione spaziale orizzontale, per ogni ora dei successivi 3 giorni. La previsione è a disposizione del Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica e delle Regioni, che possono utilizzarla per alimentare i propri sistemi previsionali. Le previsioni sono quotidianamente disponibili sul portale web ENEA. Inoltre, il sistema è inserito nel Programma Nazionale di Collaborazione del Servizio di Monitoraggio dell'Atmosfera di Copernicus (programma di osservazione della Terra della Commissione Europea).

Per l'Europa, il sistema MINNI-CAMS previsioni di qualità dell'aria su tutto il territorio europeo, a 10 km di risoluzione spaziale orizzontale, per ogni ora dei successivi 4 giorni. MINNI-CAMS fa parte del consorzio Copernicus degli 11 gruppi europei leader nello sviluppo di modelli numerici per la qualità dell'aria. Accanto alle previsioni, i modelli eseguono analisi giornaliere degli inquinanti in prossimità della superficie, con integrazione delle misure delle reti europee di monitoraggio di qualità dell'aria. Le previsioni e le analisi di tutti i modelli partner vengono combinate nel calcolo del valore mediano dei singoli output, che attualmente fornisce la migliore stima dell'insieme (ovvero ENSEMBLE).

I sistemi forniscono previsioni ad alta affidabilità, grazie all'utilizzo del supercalcolatore CRESCO di ENEA.



Mappe di previsione della qualità dell'aria: Italia - biossido di azoto (sinistra), Europa - polveri sottili (centro), Italia - indice di qualità dell'aria (destra).

INTEGRATED AIR QUALITY MODELLING TO SUPPORT AIR POLLUTION POLICIES

The Laboratory Models and Measures for Air Quality and Climate Observations conducts advanced modelling activities for the comprehensive simulation of atmospheric pollution processes. These simulations are based on pollutant emission inventories and meteorological-climatic data, with the aim of assessing and forecasting concentrations of atmospheric pollutants harmful to human health.

ENEA has developed an integrated air quality modelling system, MINNI (National Integrated Model to support International Negotiation on Air Pollution issues), with the support of the Ministry for the Environment and the Energy Security, since the early 2000s.

MINNI comprises a suite of models and pre-/post-processing tools designed to support the development and assessment of air quality policies at both national and regional levels, consisting of two main modelling systems: the Atmospheric Modelling System (AMS) and GAINS-Italy.

The AMS includes models that reconstruct meteorological fields and simulate transport, dispersion, and chemical transformation of gases and aerosols (particulate matter) in the atmosphere. This allows the tracking of both primary pollutants (directly emitted into the atmosphere) and secondary pollutants (formed through atmospheric chemical reactions), providing insights into precursor-pollutant relationships. At the core of this system is FARM (Flexible Air quality Regional Model), a chemical transport model that reproduces the atmospheric chemical-physical processes, delivering pollutant concentration and deposition data as a function of space and time, based on given meteorological and emission conditions.

The AMS-MINNI is applied at multiple spatial scales: European level, through the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS); National level, supporting the Ministry of the Environment and Energy Security in the implementation of air quality directives; Local level, for detailed assessments in urban and regional contexts.

The GAINS-Italy model enables the elaboration and evaluation of future and alternative scenarios for the reduction of atmospheric pollutant and greenhouse gas emissions up to 2050. It integrates information on energy systems, industrial and non-industrial activities (like agriculture, waste, and solvent use), and emission control strategies. When coupled with AMS, GAINS-Italy provides spatially resolved air quality concentration scenarios across the Italian territory. Furthermore, it supports the development of cost-effective policy scenarios, tailored to health and/or environmental objectives. For each of the 20 Italy Regions, the model identifies potential emission reduction measures, the expected magnitude of emission reductions, the relevant sectors for intervention, and the associated implementation costs.

The MINNI system allows for the assessment of several air pollution impacts on public health; vegetation and ecosystems; agricultural productivity; cultural heritage and infrastructure at national, regional, and local scales, and on specific area (see the sheet on "Impact assessment of air quality on human health, vegetation, infrastructure, and cultural heritage). The system provides high-resolution outputs even in complex terrain, supports the evaluation of both persistent and episodic pollution events, and allows the simulation of emission scenarios related to specific policies and measures. In the context of nature-based solutions, MINNI can be applied to urban areas to quantify the synergistic impact of vegetation on air quality and local climate.

Some of the main MINNI applications are the regulatory compliance assessments (e.g., exceedance of air quality standards); the air quality impact assessments of industrial sources and transport infrastructures; the Environmental Impact Assessment and Integrated Environmental Authorization procedures; the design and evaluation of emission and air quality scenarios arising from national strategies, such as the National Air Pollution Control Programme (NAPCP) under the NEC Directive, and the National Integrated Energy and Climate Plan (PNIEC).

Thanks to its expertise in atmospheric modelling and air quality monitoring, ENEA represents Italy in the technical task forces of the United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) Air Convention, contributing to the development of mitigation strategies for transboundary air pollution.



MODELLISTICA INTEGRATA DI QUALITÀ DELL'ARIA IN SUPPORTO ALLE POLITICHE SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

Il Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche svolge attività modellistiche per la simulazione completa dei processi di inquinamento atmosferico, a partire dai dati sulle emissioni inquinanti e dalla meteo-climatologia del territorio, per verificare e prevedere le concentrazioni degli inquinanti atmosferici dannosi per la salute umana.

ENEA ha sviluppato un sistema modellistico completo per la qualità dell'aria, denominato MINNI (Modello Integrato Nazionale a supporto della Negoziazione Internazionale sui temi dell'Inquinamento Atmosferico), con il supporto del Ministero dell'Ambiente fin dai primi anni 2000.

MINNI è un insieme di modelli e pre/post processor per selezionare e valutare l'efficacia delle politiche di qualità dell'aria a livello nazionale e regionale, costituito da due principali sistemi modellistici: il Sistema Modellistico Atmosferico (SMA) e GAINS - Italia.

Il SMA è composto da modelli che provvedono alla ricostruzione dei campi meteorologici e calcolano il trasporto, la diffusione e le trasformazioni chimiche in atmosfera di gas e aerosol (polveri sottili). In questo modo, è possibile seguire la dispersione degli inquinanti primari (emessi direttamente in atmosfera) e secondari (generati dalle reazioni chimiche in atmosfera) e, per gli inquinanti secondari, fornire indicazioni sulle relazioni con i loro precursori. Cuore del sistema è FARM, un modello chimico di trasporto, che simula la descrizione dei processi chimico-fisici in atmosfera e fornisce le concentrazioni e le deposizioni degli inquinanti in funzione dello spazio e del tempo a partire da date condizioni meteorologiche ed emmissive. Il SMA di MINNI viene applicato a scala europea (nel Servizio di Monitoraggio dell'Atmosfera di Copernicus), a scala nazionale (per il supporto al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica nell'applicazione delle leggi sulla qualità dell'aria) e a livello locale.



GAINS-Italia, a partire dalla definizione di uno scenario energetico, di uno scenario relativo alle attività produttive (industriali e non) e di una strategia di controllo, è in grado di elaborare e valutare possibili scenari futuri e alternativi di riduzione delle emissioni di inquinanti atmosferici e gas ad effetto serra fino all'orizzonte temporale 2050, sia a livello nazionale che regionale, e (in connessione con lo SMA) scenari di concentrazione dei principali inquinanti su tutto il territorio nazionale italiano. Inoltre, GAINS-Italia permette di costruire scenari di policy ottimizzati sulla base di un approccio costi-efficacia con obiettivo sanitario e/o ambientale, dove, per ciascuna delle 20 Regioni italiane, vengono indicati possibili misure di riduzione delle emissioni, entità della riduzione emissiva attesa, possibili settori di intervento e relativi costi.

In base alla qualità dell'aria simulata con MINNI, si possono valutare successivi impatti "in cascata": sulla salute dei cittadini, sulla vegetazione, sulle produzioni agricole o sui monumenti a livello nazionale, regionale e locale su una determinata area (vedi scheda Valutazioni di impatto su della qualità dell'aria salute umana, vegetazione, infrastrutture e beni culturali). Il sistema consente di avere informazioni dettagliate anche in territori ad orografia complessa, di valutare gli impatti di fenomeni di lunga durata e transitori, di valutare vari scenari di emissioni di inquinanti prodotti a seguito di specifiche politiche/misure. In rapporto alle nature-based solution, MINNI può essere applicato sulle aree urbane per valutare l'impatto sinergico della vegetazione sulla qualità dell'aria e sul clima.

Alcune fra le principali applicazioni di MINNI sono il supporto ai decisori politici per la valutazione a fini normativi (rispetto dei limiti di legge), la valutazione di impatto sulla qualità dell'aria di sorgenti industriali o infrastrutture di trasporto, il supporto a studi VIA e AIA per i proponenti opera, il supporto ai decisori politici per valutazioni di scenari emissivi e di qualità dell'aria (anche ottimizzati, sul piano dei costi e dell'efficacia) derivanti da Piani nazionali di contrasto alle emergenze smog (Programma Nazionale di Controllo dell'Inquinamento Atmosferico ai sensi della Direttiva NEC) e da Piani Nazionali Integrati Energia e Clima (PNIEC).

Con la propria esperienza di modellistica e osservazione della qualità dell'aria, ENEA rappresenta l'Italia delle task force tecniche della Convenzione Aria delle Nazioni Unite, dedicate alla mitigazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico.

IMPACT ASSESSMENT OF AIR QUALITY ON HUMAN HEALTH, VEGETATION, INFRASTRUCTURES AND CULTURAL HERITAGE

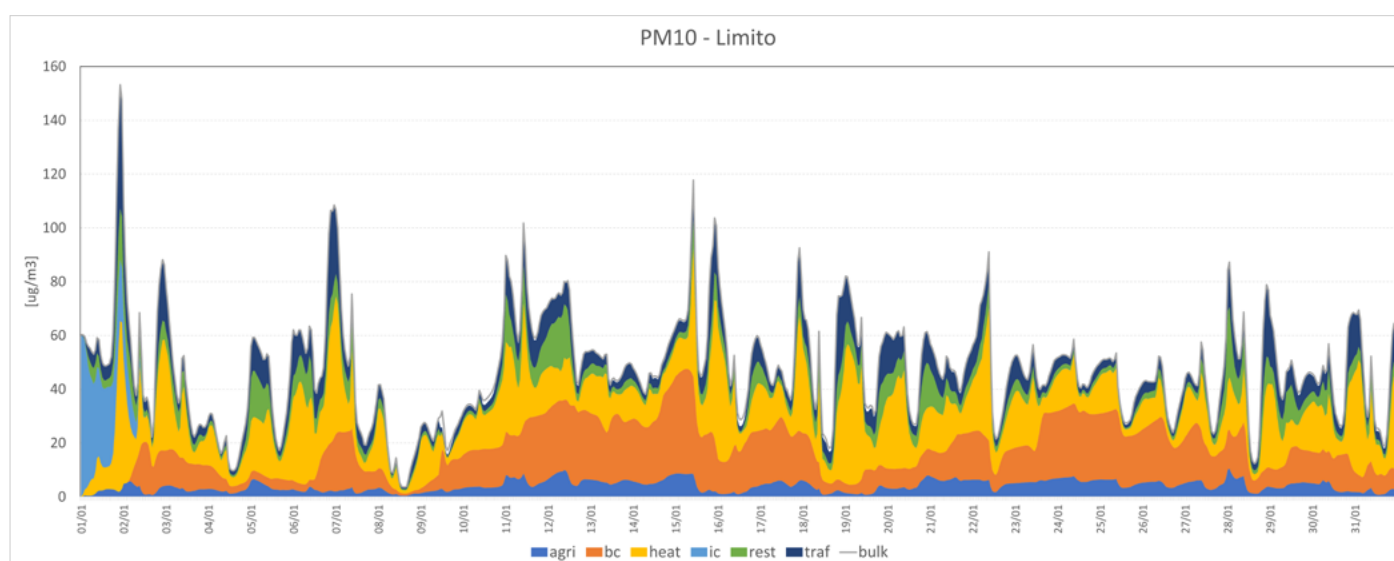
With an integrated approach to atmospheric modelling (see section on Integrated Air Quality Modelling to Support Air Pollution Policies - MINNI), advanced air pollutant monitoring technologies, toxicology and environmental epidemiology, the Laboratory Models and Measurements for Air Quality and Climate Observations evaluates the main impacts of air pollution on human health, vegetation, infrastructure and cultural heritage, supporting public administrations and private companies.

With regard to human health, ENEA carries out the analysis of the health impact of air pollution (present and/or future) and the evaluation of actions for improving air quality.

In particular:

- Development of Source Apportionment techniques, to identify and quantify the emission sources related to pollutant concentrations at selected locations (receptor models with Positive Matrix Factorization, algorithm with tracer species in the FARM chemistry-transport model)
- Cellular model analysis of the potential health impacts of air pollutants characterized at sites of interest
- Development of GIS procedures for population exposure calculation
- Application of methodologies for estimating the risk of general and cause-related mortality (carcinogenic and non-carcinogenic) and reduction of life expectancy, in relation to concentrations of specific pollutants.

The evaluation of the degradation produced by air pollution on materials that constitute assets of historical and artistic interest exposed outdoors is carried out in ENEA with the coordination of one of the Sub-centers of the ICP Materials Program "Effects of Air Pollution on Materials, including Historic and Cultural Monuments" of the United Nations Air Convention, where impacts on materials are studied experimentally in order to derive mathematical relations, called dose-response functions, that link the influence of individual pollutant concentrations, in combination with climatic parameters, to the overall effect on the material (loss of material due to corrosion or degree of blackening).



Source apportionment (quantification of contributions of emission sources) of particulate matter concentration.

VALUTAZIONI DI IMPATTO SU DELLA QUALITÀ DELL'ARIA SALUTE UMANA, VEGETAZIONE, INFRASTRUTTURE E BENI CULTURALI

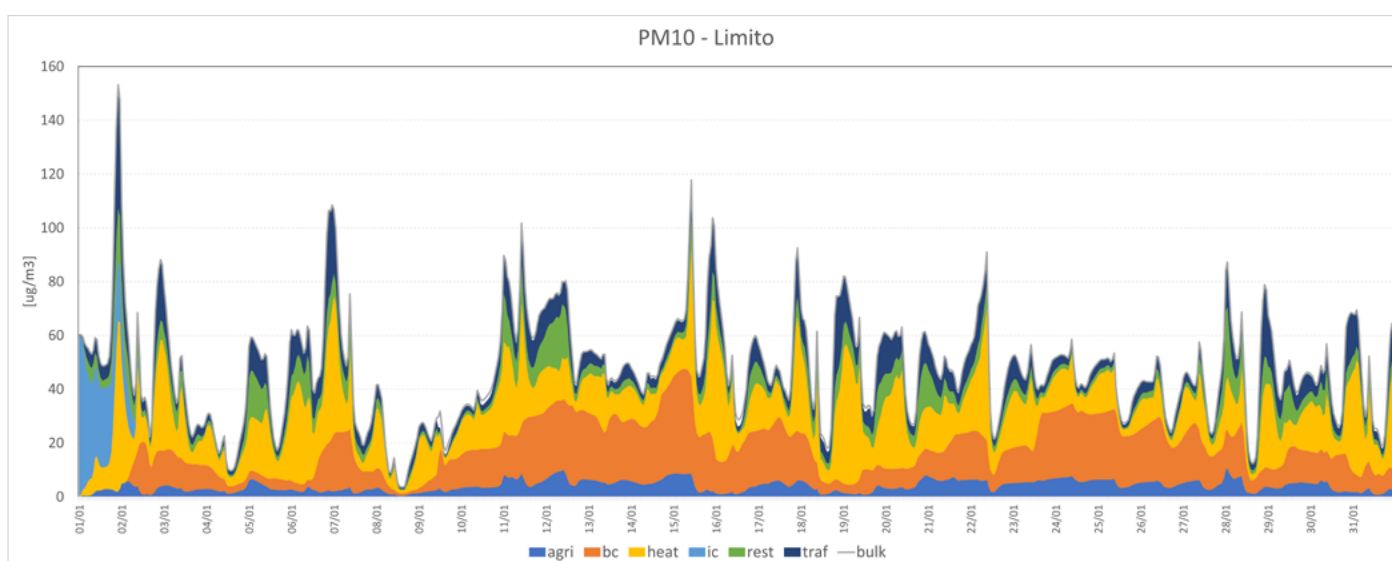
Con un approccio integrato di modellistica atmosferica (vedi scheda Modellistica integrata di qualità dell'aria in supporto alle politiche sull'inquinamento atmosferico - MINNI), tecnologie avanzate di monitoraggio degli inquinanti atmosferici, tossicologia ed epidemiologia ambientale, il Laboratorio Modelli e Misure per la Qualità dell'Aria ed Osservazioni Climatiche valuta i principali impatti dell'inquinamento atmosferico su salute umana, vegetazione, infrastrutture e beni culturali, in supporto alle amministrazioni pubbliche e ai soggetti privati.

Rispetto alla salute umana, ENEA effettua l'analisi di impatto sanitario dell'inquinamento atmosferico (presente e/o futuro) e valutazione di azioni di risanamento della qualità dell'aria.

In particolare:

- Sviluppo di tecniche di Source Apportionment, per identificare e quantificare le sorgenti emmissive legate alla concentrazione di inquinante in un punto (modelli a recettore con positive Matrix Factorization, algoritmo con specie traccianti nel modello di trasporto e chimica FARM)
- Analisi mediante modelli cellulari degli impatti potenziali sulla salute degli inquinanti atmosferici caratterizzati in siti di misura di interesse
- Sviluppo di procedure GIS per il calcolo dell'esposizione della popolazione
- Applicazione di metodologie di stima del rischio di mortalità generale e per causa (cancerogena e non cancerogena) e di riduzione dell'aspettativa di vita, in relazione alle concentrazioni di specifici inquinanti.

In particolare, la valutazione del degrado prodotto dall'inquinamento atmosferico sui materiali che costituiscono i beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto viene effettuata in ENEA con il coordinamento di uno dei Sub-center del Programma ICP Materials "Effects of Air Pollution on Materials, including Historic and Cultural Monuments" della Convenzione Aria delle Nazioni Unite, dove gli impatti sui materiali sono studiati sperimentalmente al fine di ricavare relazioni matematiche, dette funzioni dose-risposta, che legano l'influenza delle concentrazioni dei singoli inquinanti, in combinazione con i parametri climatici, all'effetto complessivo sul materiale (perdita di materiale per corrosione o grado di annerimento).



Source apportionment (quantificazione del contributo delle sorgenti emmissive) della concentrazione di polveri sottili.

EARTH SYSTEM MODELS

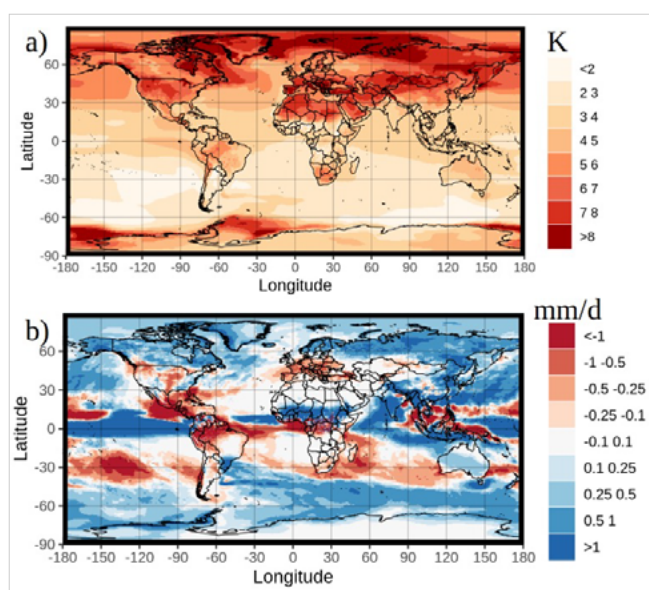
Climate predictability stems from the interaction of the atmosphere with slowly evolving components, like ocean and land-surface. The study of past and present climate, the prediction of seasonal and decadal climate anomalies and the projection of climate evolution until the end of the century require global Earth System Models (ESMs). These models are able to represent the four domains of the Earth System: air, ocean, ice and land are designed to simulate the complex interactions between terrestrial biosphere and climate, including carbon cycle, related biophysical processes and anthropic effects. ENEA contributes to the development of the global ESM of the European consortium EC-Earth (<https://ec-earth.org/>). ENEA improvements in the representation of land surface-atmosphere interaction processes led to a significant increase of model prediction skill over scales ranging from weather to seasonal and decadal. ENEA contributed with EC-Earth global climate projections to the sixth phase of CMIP (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) of WCRP (World Climate Research Programme), which formed the basis of the latest IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) assessment report. Climate projections such as the ones produced by CMIP projects are used by policy-makers around the world to develop appropriate climate and economic policies.

ENEA studies also what drives polar climate and how this climate might change in the future. Despite remote, the polar regions exert strong influence on the climate at lower latitudes because of the highly complex and interconnected nature of the Earth System.

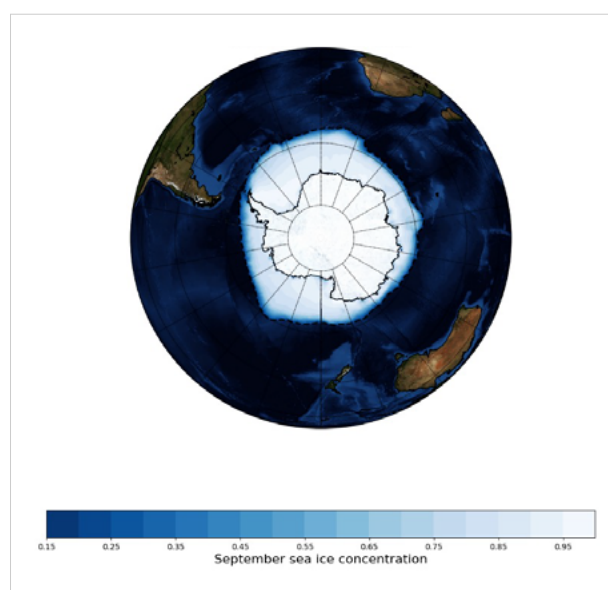
Representing sea ice variability, the higher layers of the atmosphere, and atmosphere-ice-ocean coupling in Antarctica is to-date one of the great challenges faced by the scientific international community.

We study the large-scale (100km or more) coupling between atmosphere and ocean via sea ice. We use CMIP models such as HadGEM3 to simulate plausible scenarios of atmosphere-ice-ocean interactions in Antarctica to: i) advance our knowledge of the underlying physical mechanisms governing high-latitude climate variability, and ii) develop further CMIP models to obtain an ever more realistic representation of atmospheric and oceanic processes.

By doing so, we contribute to understanding and alleviating known model biases. This reduces the uncertainty of current climate projections and aids policy-makers in taking better-informed decisions.



Climate warming (a) and precipitation change (b) over 21st century projected by EC-Earth3 for scenario SSP5-8.5 in summer (JJA).



Southern Hemisphere sea ice concentration from satellite observations (NASA Team). Map shows mean concentration computed using all September months (when sea ice extent is maximum) from 1979 to 2015.

MODELLI CLIMATICI GLOBALI

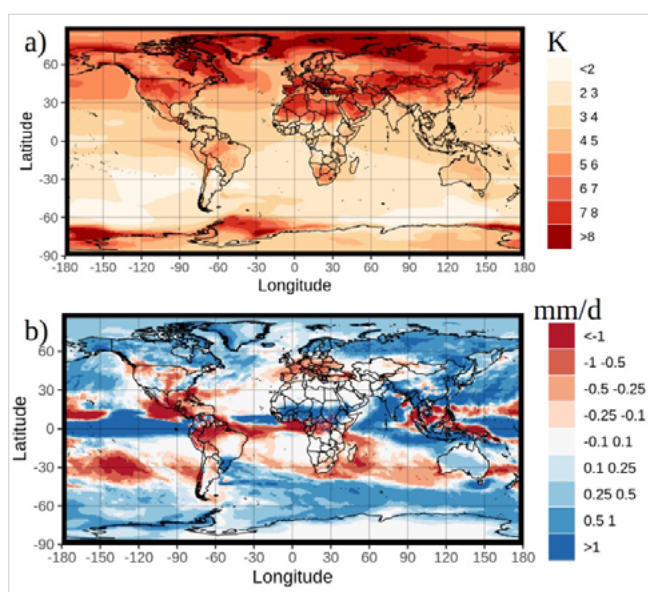
La possibilità di prevedere il clima deriva dall'interazione dell'atmosfera con componenti del sistema terra caratterizzate da variabilità lenta, come oceano e superficie terrestre. Per studiare il clima del passato e del presente e per prevedere quali saranno le probabilità di anomalie climatiche stagionali o l'evoluzione nei prossimi decenni o a fine secolo, si utilizzano dei modelli globali del Sistema Terra, o Earth System Models (ESMs). Questi modelli sono in grado di rappresentare i quattro domini del sistema Terra: aria, acqua, ghiaccio, terre emerse e simulano le interazioni tra biosfera terrestre e clima, incluso il ciclo del carbonio, i relativi processi biofisici e l'effetto antropico.

ENEA contribuisce a sviluppare l'ESM globale del consorzio europeo EC-Earth (<https://ec-earth.org/>).

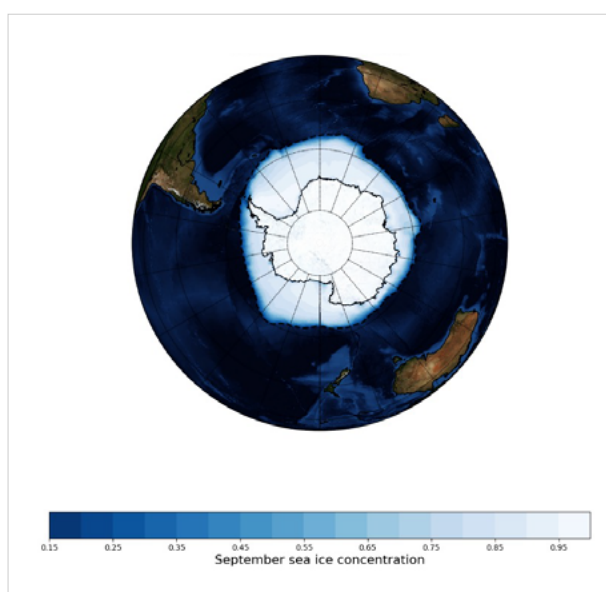
Gli sviluppi di ENEA, in particolare per quanto riguarda i processi di interazione tra superfici continentali e atmosfera, hanno portato a miglioramenti significativi delle capacità predittive del modello EC-Earth, dalla scala meteo a quella stagionale e decadale. Questa attività ha portato ENEA a contribuire con proiezioni climatiche globali alla sesta fase del progetto CMIP (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) del WCRP (World Climate Research Programme), i cui risultati sono stati alla base dell'ultimo assessment report dell'IPCC (AR6). Le proiezioni climatiche prodotte dai modelli CMIP costituiscono le basi scientifiche degli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Reports e vengono dunque utilizzate dai policymakers di tutto il mondo per elaborare e sviluppare politiche economiche e climatiche appropriate.

ENEA studia anche i meccanismi responsabili della variabilità climatica ai poli, e come il clima nelle regioni polari e a livello globale potrà cambiare in futuro. Infatti, anche se fisicamente remote, le regioni polari hanno influenze a cascata sui climi alle latitudini più basse. La rappresentazione del ghiaccio marino, degli strati alti dell'atmosfera, e delle interazioni aria-ghiaccio-oceano in Antartide rappresentano ad oggi una tra le più grandi sfide per la comunità scientifica internazionale.

Nello studio del sistema climatico ai poli, rivolgiamo particolare attenzione alle interazioni tra atmosfera, ghiaccio e oceano, ossia quello che viene definito "sistema accoppiato", su larga scala (100km o più). Per fare ciò, usiamo modelli climatici accoppiati facenti parte del programma di collaborazione internazionale CMIP6, quali ad esempio HadGEM3. Ad ENEA simuliamo scenari plausibili di interazioni atmosfera-ghiaccio-oceano con il duplice scopo di i) avanzare la conoscenza sui meccanismi che governano le variabilità climatica ai poli, e ii) sviluppare i modelli climatici di tipo accoppiato per ottenere una rappresentazione dei processi in atmosfera e in oceano sempre più realistica.



Riscaldamento globale (a) e cambiamento di precipitazione (b) nel 21mo secolo dal modello EC-Earth3 per lo scenario SSP5-8.5 in estate (JJA).



Osservazioni satellitari (NASA Team) della concentrazione di ghiaccio marino (sea ice) nell'emisfero sud a settembre (periodo di massima estensione). La media mostrata è stata calcolata per il periodo che va dal 1979 al 2015.

REGIONAL CLIMATE MODELS

Regional climate simulations, carried out on a limited region of the planet, are needed to better know the local climate, as well as their projections which allow to better characterized the impacts of climate change and climate-related risks locally.

In recent years, the availability of increasingly powerful computational resources has pushed regional modeling techniques to finer and finer scales, with demonstrated added value in comparison to coarser resolution of global models, especially in complex morphology regions.

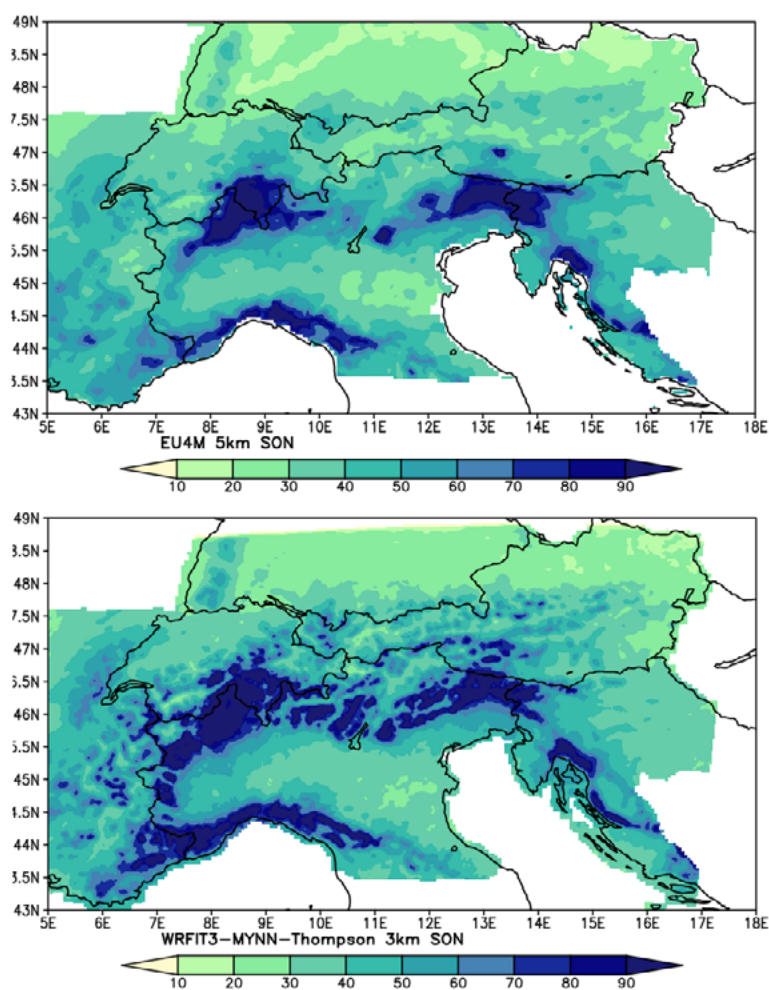
Climate studies have benefited from such technological advances and regional climate projections have achieved the space-time resolution needed to assess the regional sensitivity to the global warming, the local impacts of climate change and climate-related risks and to support adaptation and mitigations policies.

This represents a substantial breakthrough for the Mediterranean region, a climate hotspot characterized by a strongly heterogeneous morphology (a semi-closed basin with high and complex mountainous surroundings), which needs high-resolution analyses and data for an exhaustive climate representation. The region is, in fact, critically prone to the impacts of local-scale and severe weather, which can dramatically affect the wellbeing and the economies of local communities.

The Climate Modelling and Services Laboratory of ENEA develops regional climate models for downscaling the most recent global climate projections to local scales for the Mediterranean and Italian regions aiming to produce high-resolution climate information for the assessment of climate change signals and related impacts. Moreover, The Laboratory contributes to the 'National Recovery and Resilience Plan' (PNRR) projects HPC (CENTRO NAZIONALE PER HPC, BIG DATA E QUANTUM COMPUTING) and RETURN (multi-Risk sciEnce for resilientT commUnities undeR a changiNg climate), with km-scale state-of-the-art modelling activities.

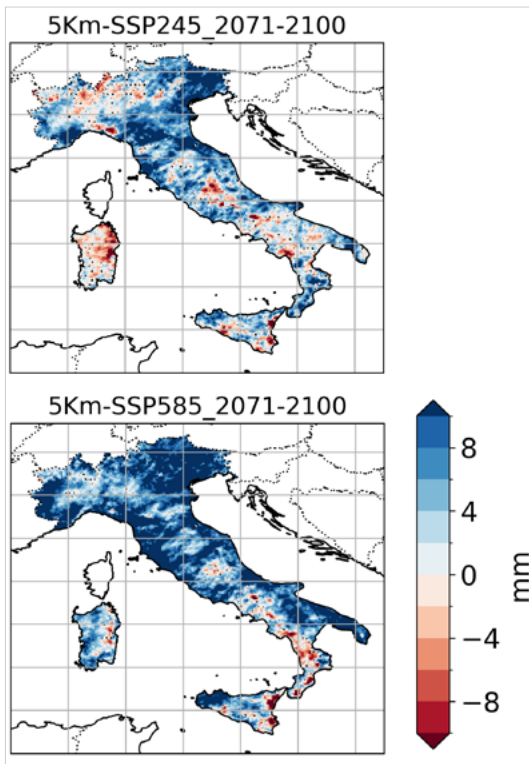
ENEA is carrying out the first atmospheric simulation experiments with numerical models at such high resolutions (~3km) to allow the explicit detailed representation of convective phenomena, which instead are parameterized at lower resolutions. This improves some known limitations of low-resolution models such as the early onset of convection, the simulation of drizzle precipitation, and the inability to reproduce extreme precipitation phenomena. Their correct representation is essential for climate change impact and adaptation studies.

In addition, ENEA's climate modelling group has recently developed a coupled atmosphere-ocean numerical model to describe the complex air-sea interaction and their effects on the circulation of the Mediterranean. These modelling products allow, among other, the study of future

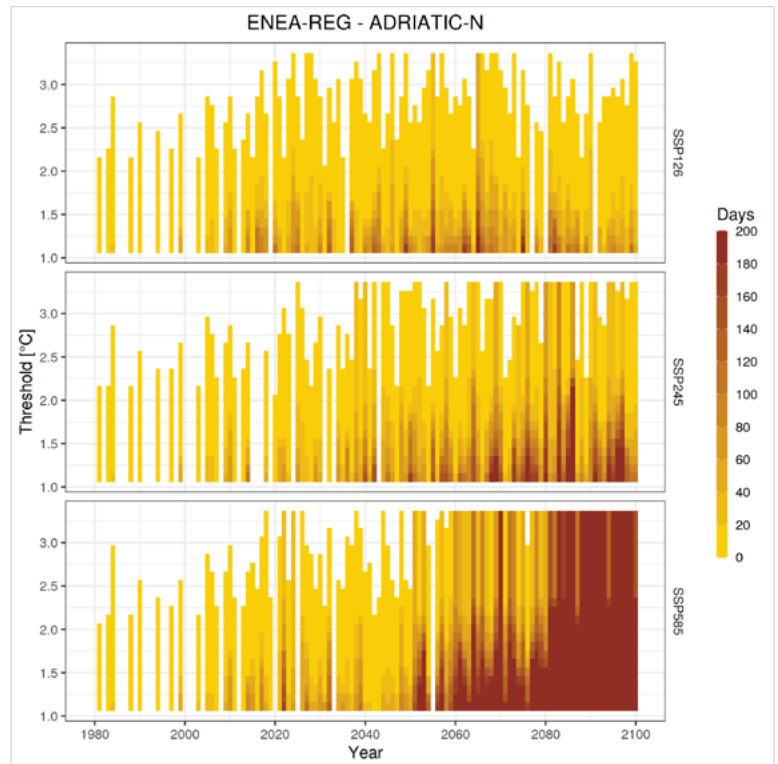


Comparison of fall mean extreme daily precipitation (99th percentile of daily precipitation, mm/day) over the alpine region for the period 1981-2011 between a high-resolution observed dataset retrieved from re-gridded rain-gauges data (5km EU4M, top panel) and the ENEA 3km simulation (bottom panel).

developments of marine heat waves. In the context of global warming, their frequency, intensity and duration are increasing, with significant impacts on marine ecosystems, altering biodiversity. In addition, excessive increases in marine temperatures can affect weather conditions, increasing the risk of extreme events such as violent thunderstorms during late summer and early fall.



Precipitation extreme events: Difference between the 99th percentile values (P99) of daily precipitation in the period 2071-2100 and the corresponding values calculated for the period 1985-2014 for two future climate scenarios.



Intensity and total annual length of heatwaves for the Northern Adriatic as described by ENEA-REG for three future climate scenarios.

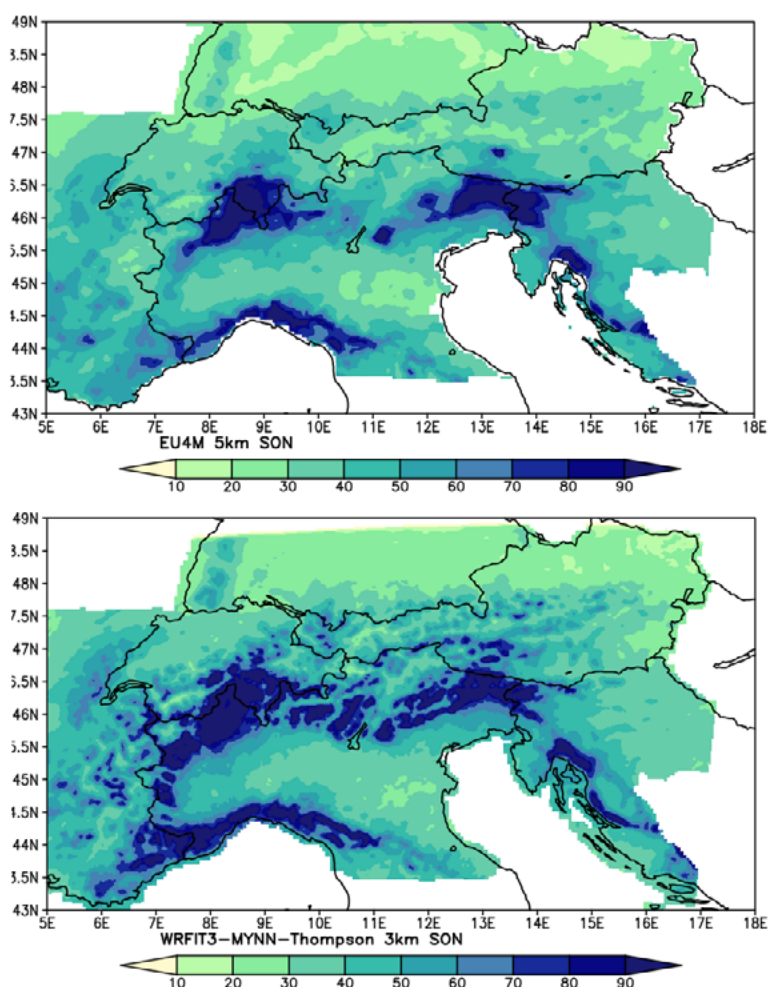
MODELLI CLIMATICI REGIONALI

Le simulazioni climatiche regionali, effettuate su una regione limitata del pianeta, sono necessarie per conoscere meglio il clima locale, così come le loro proiezioni che permettono di caratterizzare meglio gli impatti dei cambiamenti climatici e i rischi legati al clima a livello locale. Gli studi sul clima hanno beneficiato di questi progressi tecnologici e le proiezioni climatiche regionali hanno raggiunto la risoluzione spatio-temporale necessaria per valutare la sensibilità regionale al riscaldamento globale, gli impatti locali dei cambiamenti climatici e dei rischi correlati al clima e per sostenere le politiche di adattamento e mitigazione. Questo rappresenta una svolta sostanziale per la regione mediterranea, un hotspot climatico caratterizzato da una morfologia fortemente eterogenea (un bacino semi-chiuso con zone montuose alte e complesse vicine al mare), che necessita di analisi e dati ad alta risoluzione per una rappresentazione climatica esaustiva. La regione è, infatti, criticamente soggetta agli impatti di fenomeni meteorologici severi su scala locale, che possono incidere drammaticamente sul benessere e sull'economia delle comunità locali.

Il Laboratorio di Modelli e Servizi Climatici dell'ENEA sviluppa modelli climatici regionali per il downscaling delle più recenti proiezioni climatiche globali a scala locale per le regioni mediterranee e italiane, con l'obiettivo di produrre informazioni climatiche ad alta risoluzione per la valutazione dei segnali di cambiamento climatico e dei relativi impatti. Inoltre, contribuisce ai progetti "Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza" (PNRR) HPC (CENTRO NAZIONALE PER HPC, BIG DATA E QUANTUM COMPUTING) e RETURN (multi-Risk sciEnce for resilient commUnities under a changiNg climate), con attività modellistiche all'avanguardia rispetto alla scala chilometrica utilizzata.

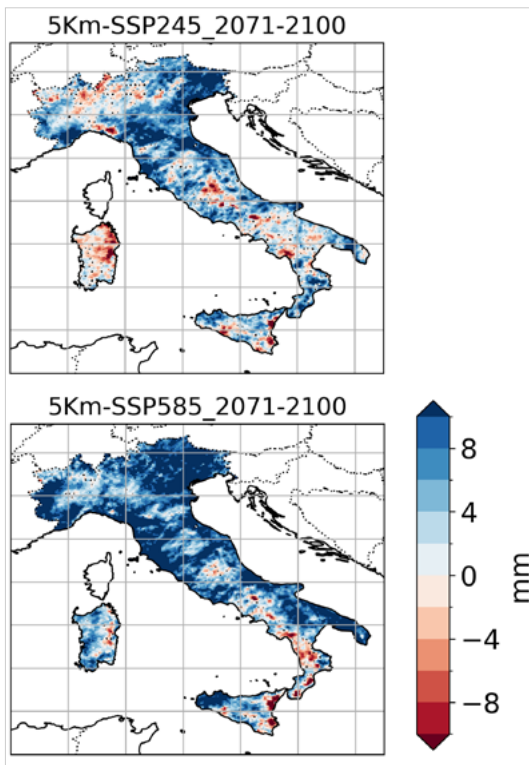
L'ENEA sta infatti conducendo i primi esperimenti di simulazione atmosferica con modelli numerici a una risoluzione tale (~3 km) da consentire la rappresentazione esplicita dettagliata dei fenomeni convettivi, che sono invece parametrizzati a risoluzioni inferiori. Questo migliora alcuni limiti noti dei modelli a bassa risoluzione, come l'innescio precoce della convezione, la simulazione delle precipitazioni piovose e l'incapacità di riprodurre i fenomeni di precipitazione estrema. La loro corretta rappresentazione è essenziale per gli studi sull'impatto dei cambiamenti climatici e sull'adattamento.

Inoltre, il gruppo di modellistica climatica dell'ENEA ha recentemente sviluppato un modello numerico accoppiato atmosfera-oceano che permette di descrivere le complesse interazioni aria mare e gli effetti di questa dinamica sulla circolazione del Mediterraneo. Tali prodotti modellistici permettono, tra le altre cose, lo studio delle evoluzioni future di ondate di calore marine. Nel contesto del riscaldamento globale, la loro frequenza, intensità e durata stanno

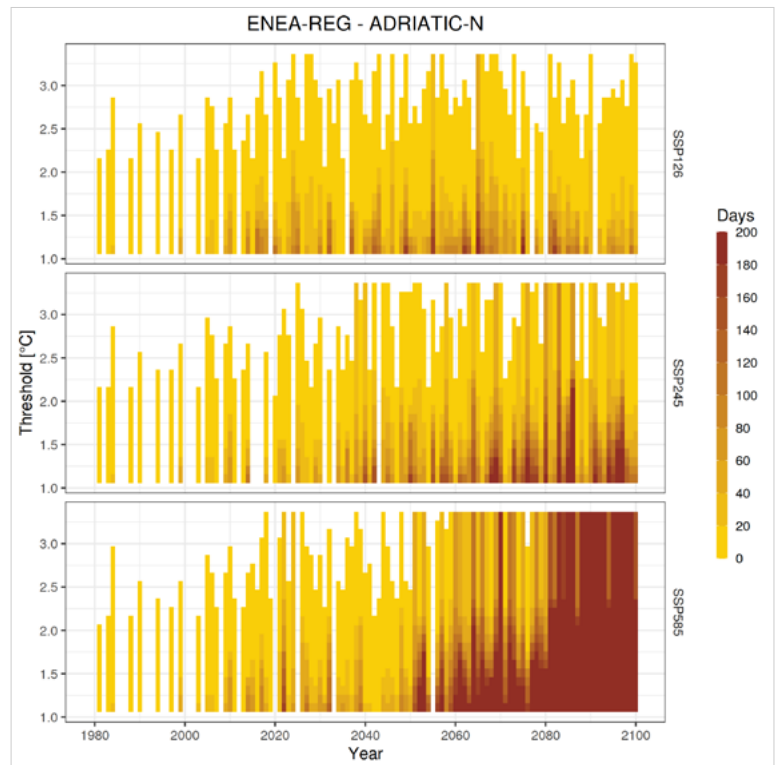


Confronto della precipitazione giornaliera estrema media nel periodo autunnale (99° percentile della distribuzione di pioggia giornaliera, mm/giorno) a ridosso dell'arco alpino per il periodo 1981-2011 tra un dataset osservato ad alta risoluzione ottenuto da dati re-grigliati da stazioni pluviometriche (EU4M a 5km, superiore) e la simulazione ENEA a 3km (inferiore).

umentando, con impatti significativi sugli ecosistemi marini, alterando la biodiversità. Inoltre, l'aumento eccessivo delle temperature marine può influenzare le condizioni meteorologiche, aumentando il rischio di fenomeni estremi come temporali violenti durante la fine dell'estate ed inizio autunno.



Eventi di precipitazione estrema: Differenza tra i valori del 99° percentile (P99) delle precipitazioni giornaliere nel periodo 2071-2100 e i corrispondenti valori calcolati per il periodo 1985-2014 per due scenari climatici futuri.



Intensità e durata totale annua delle ondate di calore per il Nord Adriatico come descritte da ENEA-REG per tre scenari climatici futuri.

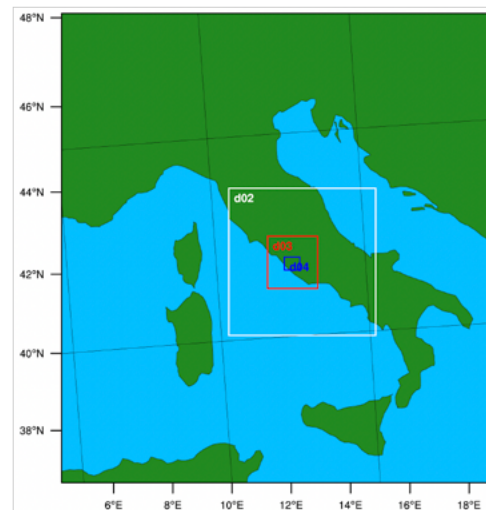
CLIMATE MODELING AT URBAN SCALE

The overheating of the urban areas with respect to the adjacent rural areas, called Urban Heat Island (UHI), has been documented since the last century and is nowadays the most investigated issue of modern cities. UHI negatively impacts the quality of life of city dwellers at different levels, such as energy consumption for cooling buildings and correlated emissions, water consumption, human morbidity and mortality. In this context, it is essential to explore the different aspects of UHI, also for the purposes of its mitigation.

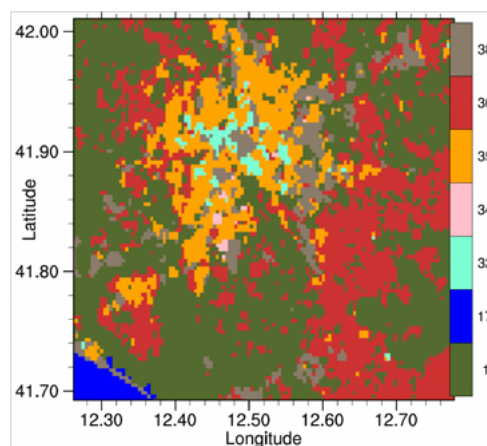
ENEA contributes to the study of this relevant issue through the development and analysis of numeric models such as the Weather Research and Forecasting (WRF) model, that play a key role as they compute thermodynamic fields with high spatial-temporal resolution and with continuous spatial coverage unreachable with weather stations networks. Furthermore, such models are useful to design and perform the so-called “what-if” scenarios, where the implementation of UHI mitigation techniques (e.g., highly reflective materials, enhanced urban greenery) is simulated.

The realistic reproduction of the texture is an open challenge in the field of numerical weather modeling of urban areas. It is especially challenging for the city of Rome that has been chosen as case study since the characteristics of the building stock are complex and stratified due to a history lasting close to three millennia. Recently, a WRF configuration with a horizontal resolution has been implemented for the metropolitan area of Rome (Italy) thanks to the inclusion of a dataset of Local Climate Zones provided by the WUDAPT database (<https://www.wudapt.org/>) which allows a detailed characterization of the urban texture. To obtain the appropriate resolution to characterize the urban climate at the neighborhood scale and correctly reproduce the spatial distribution of the temperature typical of the UHI phenomenon, numerical calculations are performed simultaneously on four computational domains nested using the “two-way” technique, i.e. the exchange of information between the domains is reciprocal, or bidirectional.

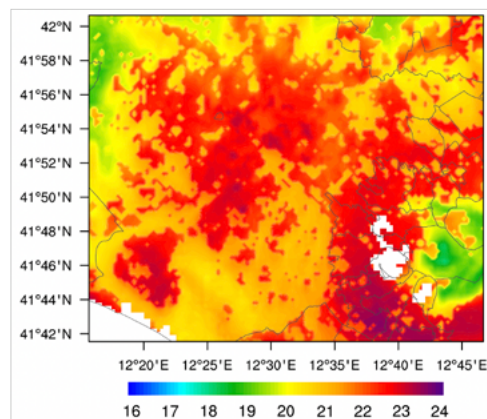
The output of this tool includes numerous weather variables with hourly frequency and spatial resolution up to 500 m and can be used in different types of applications where high spatial-temporal resolution weather data are required.



Geographical areas covered by the WRF computational domains.



Urban land use categories in the innermost domain of Figure 1. Index 1 corresponds to non-urban cells, index 17 corresponds to the sea, indices greater than 32 correspond to different Local Climate Zones.



Spatial distribution of temperature simulated by WRF at 06:00 LT in the innermost domain. All the quantities are averaged during the month of July 2020.

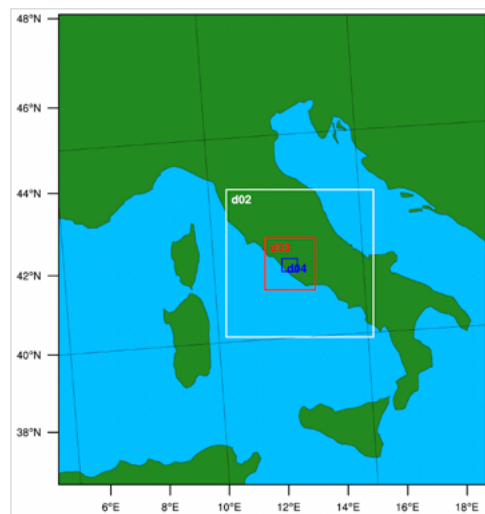
MODELLISTICA CLIMATICA A SCALA URBANA

Il surriscaldamento delle aree urbane rispetto alle zone rurali circostanti, noto come Isola Urbana di Calore (acronimo inglese UHI), è stato documentato già nel secolo scorso ed è tutt'oggi molto studiato, risultando la più investigata tra le problematiche delle città moderne. L'UHI impatta negativamente e da diversi punti di vista sulla qualità di vita degli abitanti delle città, ad esempio sui consumi energetici per il raffrescamento degli edifici e le relative emissioni, sul consumo idrico, su morbilità e mortalità. In questo contesto è fondamentale investigare l'UHI da diversi punti di vista, anche ai fini della sua mitigazione.

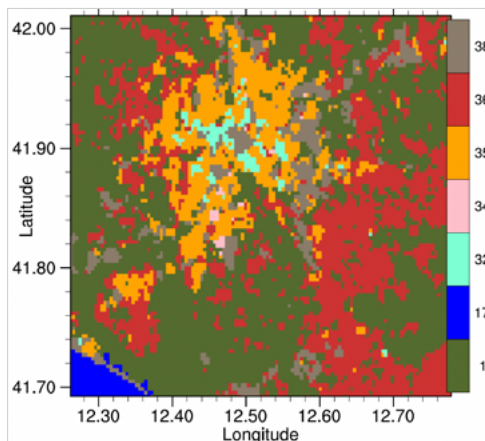
ENEA contribuisce allo studio di tale rilevante problematica attraverso lo sviluppo e l'analisi di modelli numerici come il Weather Research and Forecasting model (WRF) che hanno un ruolo fondamentale in quanto consentono di calcolare i campi di grandezze termodinamiche ad alta risoluzione spatio-temporale e con una copertura spaziale impossibile da raggiungere con le reti di stazioni meteorologiche. Questi modelli consentono anche la messa a punto e la realizzazione dei cosiddetti scenari "what-if", in cui viene simulata l'implementazione di una o più tecniche di mitigazione dell'UHI (es. materiali altamente riflettenti, aumento del verde urbano).

Nel campo della modellistica atmosferica, una importante sfida tuttora aperta è la riproduzione realistica del tessuto urbano. La città di Roma è stata scelta come caso studio in quanto il patrimonio edilizio presenta caratteristiche complesse e stratificate a causa della storia millenaria e pertanto tale sfida è particolarmente significativa. Recentemente, è stata sviluppata una configurazione di WRF ad alta risoluzione orizzontale basata sull'implementazione di un dataset di Zone Climatiche Locali fornito dal database WUDAPT (<https://www.wudapt.org/>), che consentono una caratterizzazione dettagliata del tessuto urbano nel dominio più interno. Al fine di ottenere la risoluzione adatta a caratterizzare il clima urbano a scala di quartiere e riprodurre correttamente la distribuzione spaziale della temperatura tipica del fenomeno dell'UHI, i calcoli numerici vengono effettuati contemporaneamente su quattro domini computazionali innestati con la tecnica "two-way", cioè lo scambio di informazione tra i domini è reciproco, o bidirezionale.

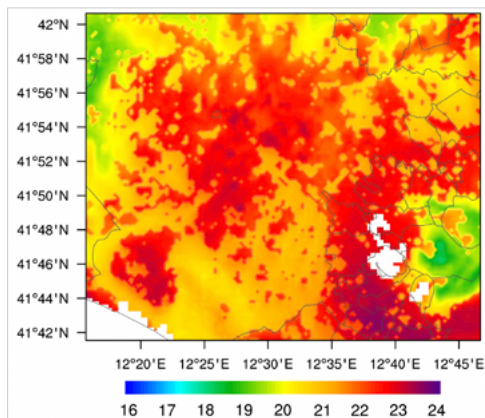
L'output di questo strumento include numerose variabili meteo con frequenza anche oraria e risoluzione spaziale fino a 500 m e può essere utilizzato in applicazioni di diverso tipo laddove sono richiesti dati meteo ad alta risoluzione spatio-temporale.



Aree geografiche coperte dai domini computazionali di WRF.



Categorie di uso del suolo urbano nel dominio più interno di Figura 1. l'indice 1 corrisponde a celle non urbane, l'indice 17 corrisponde al mare, gli indici maggiori di 32 indicano diverse Local Climate Zones.



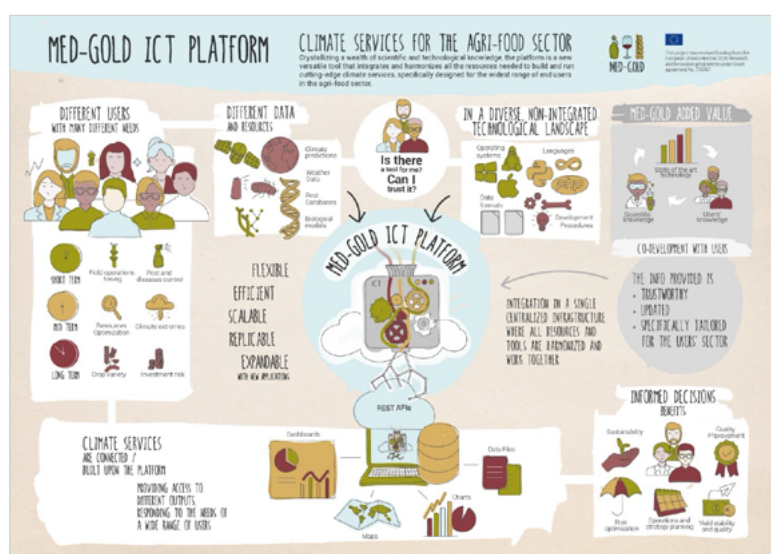
Distribuzione spaziale della temperatura alle 06:00 LT simulata da WRF nel dominio più interno. I dati sono stati mediati nel mese di luglio 2020.

CLIMATE SERVICES FOR THE MEDITERRANEAN REGION

Recently, climate variability and its impacts has received an increasing amount of interest within and well beyond the international climate science community, reaching policy makers, local administrations and industrial stakeholders. This has led to the development of several “climate services” that transform climate data and other climate-relevant information into products adapted to the specific needs of users and of general benefit to society. Climate services make it possible to offer a service with a very high potential economic and social value in support of decision-making processes and for the development of innovative solutions for all operators for whom it is essential to take climate and its changes into account.

ENEA has gained important experience in the development of climate services at the European level, coordinating, for instance, FP7 and H2020 research projects such as CLIM-RUN and MED-GOLD (recently selected as one of the most relevant contributions to the new EU Climate Adaptation Strategy) and through participation in several other recent H2020 research and development projects including S2S4E, SOCLIMACT, CRESCENDO, SECLIFIRM, CoCliCo, MOIRAI, RIVIERADE. ENEA also contributes to the evaluation and quality control activities of products from the European Earth Observation programme Copernicus, within the framework of Copernicus Climate Change.

At the national level, it has contributed to the MASE project “Mettiamoci in RIGA-Rafforzamento Integrato della Governance Ambientale”, has official representation in the JRU of EMSO-IT, in the Copernicus National User Forum (led by the Council Presidency) and participates in the work of the national Operational Climatology and Coastal Bands tables connected to it, as well as being an active member of the Italian Oceanographic Commission.



Workflow for a prototype of climate service for the agricultural sector in the Mediterranean region developed in the H2020 EU project MED-GOLD.

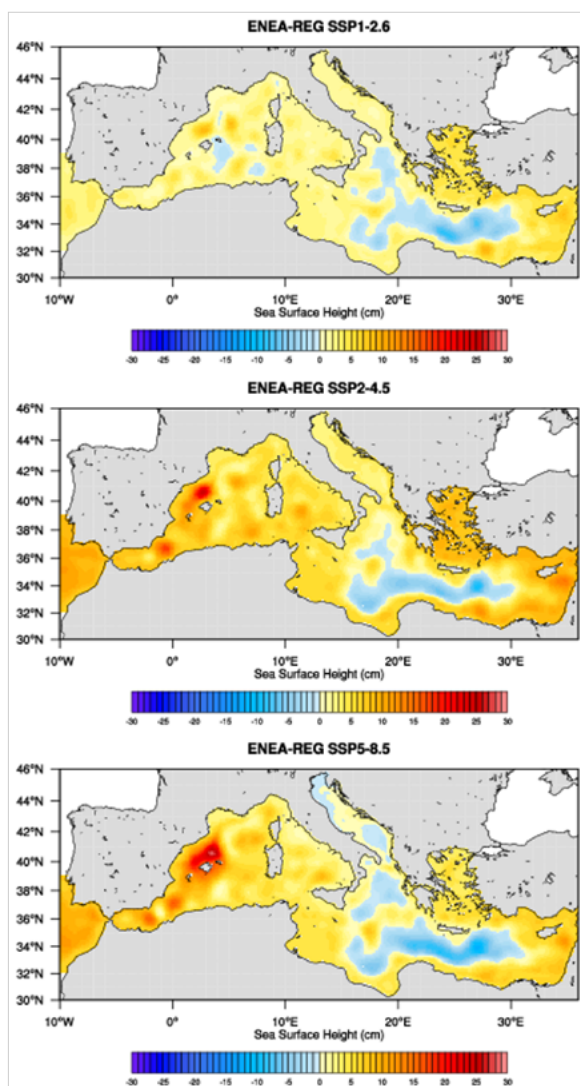
One of the main focuses of ENEA’s activities in the field of climate services is on the Mediterranean basin, characterised by the presence of a coastal population of millions. In this context, sea level variation has become one of the variables of greatest interest. Recently, several initiatives have been implemented at a national and European level to develop services aimed at providing relevant administrations and citizens with information focused on sea level rise and its impact. Particular attention in this context is devoted to user-friendly climate information on sea level rise and its impact on Mediterranean coastal areas.

The last ENEA projections of sea level rise in the Mediterranean (till 2100) made in this context were realized using two high-resolution models developed at ENEA: a Mediterranean Sea ocean model (MED16), forced by a state-of-the-art atmospheric downscaling, and a regional Earth System model (ENEA-REG), which includes the atmospheric, oceanic, and land components, together with the river supply.

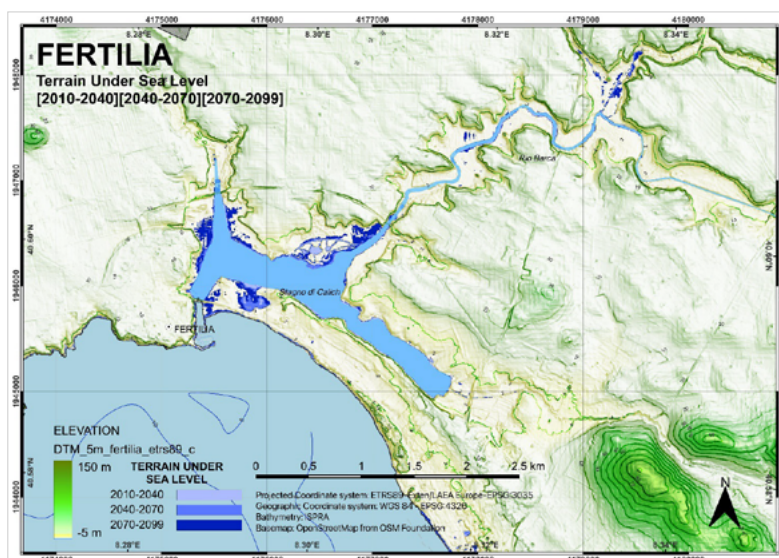
The results of these models are being used in an innovative platform for the individuation of coastal areas at risk of inundation that has recently been developed at ENEA. The platform, based on GIS, integrates the best digital models of the Italian coasts currently available, the high-resolution information on the sea level produced by our numerical models, and estimates of the vertical ground motion provided by the European Ground Motion Service (EGMS), a new service, at pan-European scale, that makes use of accurate, high-resolution satellite observations. The system is used to produce detailed coastal maps of inundation, at different time horizons. Until now, the platform has been

used to map some coastal plains, such as Alghero-Fertilia, in Sardinia, and Marina di Campo, in the Elba Island, in sites hosting port infrastructures at risk, and in areas of great socioeconomic relevance (Venice, Rome) for which explicit requests have been made by local administrations.

This example of climate service can be continually improved over time, using future developments planned for each of its components, and refinements of the methods by which sea-level information is transferred to land, for example, through the development of very high-resolution models of the dynamics in the coastal marine belt grafted onto the basin-scale models currently used.



Sea surface height computed averaging the last five years of XXI Century of three future climate scenarios respect to the average over the historical period 1995-2014 in ENEA-REG simulations. Only the circulation component is considered.



Future inundation map for the Fertilia region (SSP5-8.5 scenario), which also includes the effects of the geological components. The three different shades of blue indicate the progression of the flooded area during the 90 years covered by the simulation.

SERVIZI CLIMATICI PER L'AREA MEDITERRANEA

Negli ultimi anni l'interesse nei confronti della variabilità climatica e delle sue mutazioni su scala locale, si è allargato ben oltre la comunità scientifica, per coinvolgere in maniera sempre più diretta le amministrazioni, i decisori politici e gli stakeholder locali. Una conseguenza è lo sviluppo di "servizi climatici" che trasformano dati climatici e altre informazioni rilevanti relative al clima in prodotti adattati alle esigenze specifiche degli utenti, nonché di generale utilità per la società. I servizi climatici consentono di offrire un servizio con un potenziale valore economico e sociale molto elevato a supporto dei processi decisionali e per la messa a punto di soluzioni innovative per tutti gli operatori per i quali sia imprescindibile tenere conto del clima e dei suoi cambiamenti.

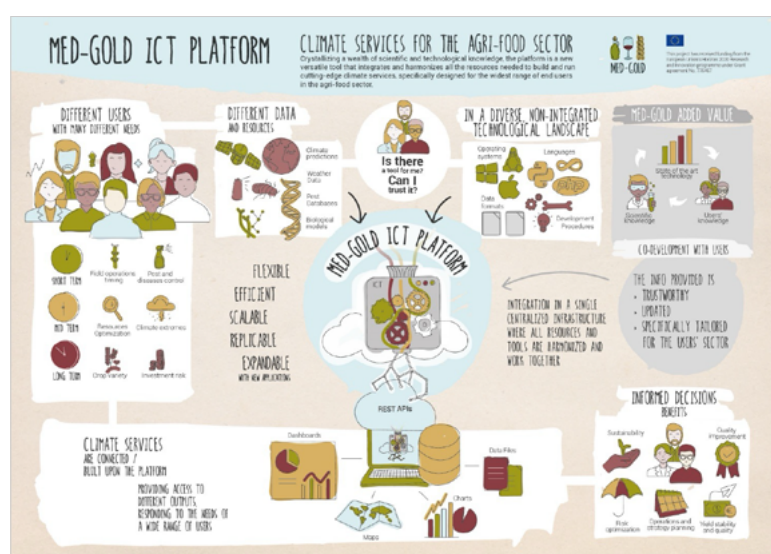
ENEA ha maturato un'importante esperienza nello sviluppo di servizi climatici a livello europeo, coordinando, ad esempio, progetti di ricerca FP7 e H2020 come CLIM-RUN e MED-GOLD (recentemente selezionato come uno dei più rilevanti contributi per la nuova EU Climate Adaptation Strategy) e attraverso la partecipazione a diversi altri progetti recenti di sviluppo e ricerca H2020 tra cui S2S4E, SOCLIMPACT, CRESCENDO, SECLI-FIRM, CoCliCo, MOIRAI, RIVIERADE. Contribuisce anche alle attività di valutazione e controllo di qualità dei prodotti dal programma europeo di Osservazione della Terra Copernicus, nell'ambito del Copernicus Climate Change.

A livello nazionale ha contribuito al progetto del MASE "Mettiamoci in RIGA- Rafforzamento Integrato della Governance Ambientale", ha una rappresentanza ufficiale nella JRU di EMSO-IT, nello User Forum Nazionale Copernicus (a guida della Presidenza del Consiglio) e partecipa ai lavori dei tavoli nazionali di Climatologia Operativa e Fasce Costiere ad esso collegati, oltre ad essere parte attiva nella Commissione Oceanografica Italiana.

Il principale focus delle attività dell'ENEA nell'ambito dei servizi climatici si concentra su bacino Mediterraneo, caratterizzato dalla presenza di una popolazione costiera di milioni di persone. In questo ambito, la variazione del livello del mare costituisce una delle variabili di maggiore interesse. Recentemente sono state implementate diverse iniziative a livello nazionale ed europeo per lo sviluppo di servizi volti a fornire alle amministrazioni competenti e alla cittadinanza informazioni focalizzate sull'innalzamento del mare e del suo impatto. Particolare attenzione in questo contesto è dedicata ad informazioni climatiche fruibile dall'utenza sull'innalzamento del livello del mare e sul suo impatto sulle aree costiere mediterranee.

Le ultime proiezioni ENEA di innalzamento del livello del mar Mediterraneo (fino al 2100) sono state realizzate con due modelli ad alta risoluzione sviluppati in ENEA: un modello oceanico del Mediterraneo (MED16), forzato da un "downscaling" atmosferico state-of-the-art, e un modello di tipo "Earth System" regionale (ENEA-REG), che descrive il sistema accoppiato atmosfera, oceano, terra, e rete fluviale.

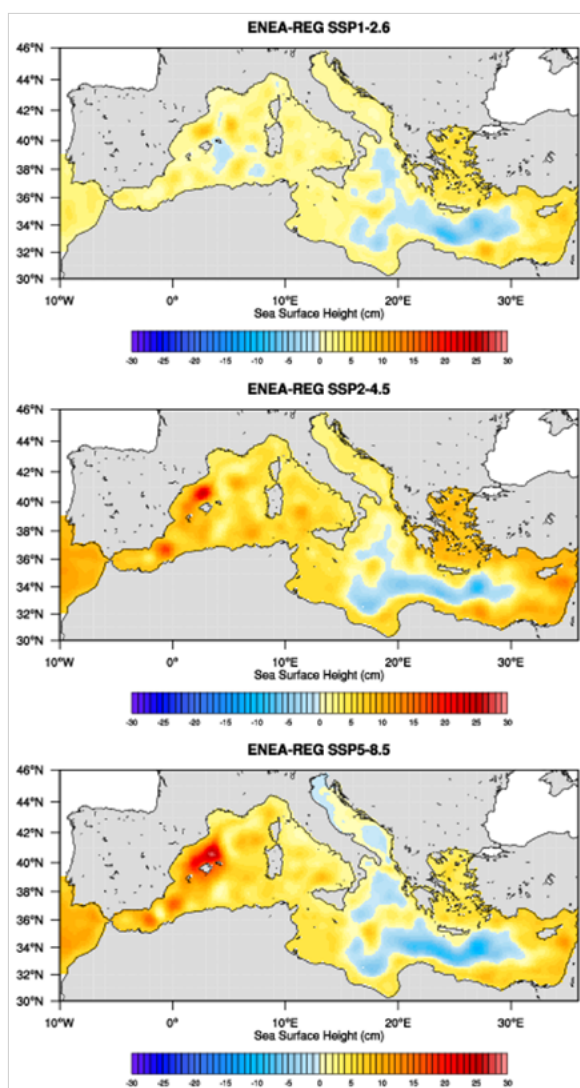
I risultati di questi modelli sono correntemente utilizzati in una piattaforma innovativa per l'individuazione di aree costiere a rischio di inondazione recentemente sviluppata in ENEA. La piattaforma, basata sul sistema GIS, integra i migliori modelli digitali delle coste italiane disponibili, le informazioni ad alta risoluzione sul livello del mare prodotte dai nostri modelli numerici, e le stime del movimento verticale del terreno fornite dallo European Ground Motion Service (EGMS), un nuovo servizio a scala pan-Europea che utilizza accurate osservazioni satellitari ad alta risoluzione spaziale. Il sistema permette di realizzare dettagliate mappe costiere di inondazione, a diversi orizzonti temporali.



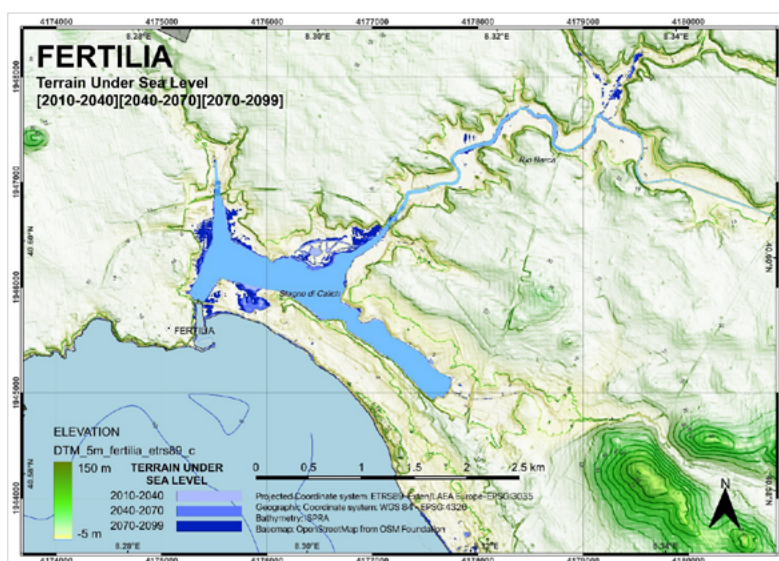
Flusso di lavoro per un prototipo di servizio climatico per il settore agricolo nella regione del Mediterraneo, sviluppato nell'ambito del progetto H2020 dell'UE MED-GOLD.

Fino ad ora la piattaforma è stata utilizzata per alcune pianure costiere, come quelle di Alghero-Fertilia, in Sardegna, e Marina di Campo, nell'Isola d'Elba, in siti che ospitano infrastrutture portuali a rischio, ed in aree di forte rilevanza socioeconomica (Venezia, Roma) per le quali sono pervenute specifiche richieste da parte delle amministrazioni locali interessate.

Questo servizio climatico potrà essere costantemente migliorato nel tempo, utilizzando gli sviluppi futuri previsti per ognuna delle sue componenti, e raffinamenti dei metodi con cui l'informazione sul livello del mare viene trasferita a terra, per esempio, attraverso lo sviluppo di modelli ad altissima risoluzione della dinamica nella fascia marina costiera innestati nei modelli a scala di bacino attualmente utilizzati.



Altezza della superficie del mare calcolata sulla media degli ultimi cinque anni del XXI secolo di tre scenari climatici futuri rispetto alla media del periodo storico 1995-2014 nelle simulazioni ENEA-REG. Viene considerata solo la componente di circolazione.

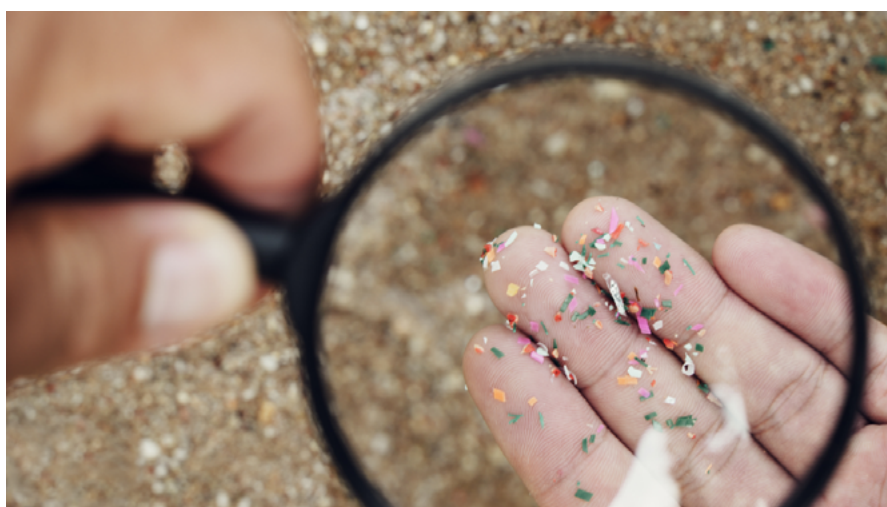


Mappa futura di inondazione nella regione di Fertilia (scenario SSP5-8.5), che tiene conto anche degli effetti delle componenti geologiche. I tre diversi toni di azzurro indicano il progredire dell'area inondata durante i 90 anni coperti dalla simulazione.

MICROPLASTICS, CLIMATE CHANGE AND ECOLOGICAL RISK: AN INTEGRATED ANALYSIS

The interconnection among the three major global environmental crises—climate change, biodiversity loss, and pollution—is generating deep and synergistic environmental impacts, representing one of the most urgent and complex challenges for the scientific community. In this context, emerging contaminants, particularly plastics and their degradation products, are assuming a central role. Their environmental ubiquity, coupled with the expected increase in production and release into the environment, requires a thorough scientific assessment.

Microplastics act not only as primary pollutants (both as micro/nanoparticles and as leached compounds), but also as vectors of other toxic substances through adsorption and release processes. Climate change significantly affects these dynamics, especially through rising temperatures that accelerate plastic degradation, promoting fragmentation and transformation into more reactive and potentially more toxic nanoparticles. Moreover, extreme weather events—such as heavy rainfall, prolonged droughts, floods, and ice melt—alter the transport, dispersion, and accumulation patterns of microplastics, facilitating their release into previously less-exposed ecosystems, including remote and vulnerable areas.



Their persistence and ability to disperse across various environmental compartments—water, soil, and air—enable long-distance transport, contributing to accumulation and potential biomagnification through food webs. Changes in environmental conditions induced by global warming—such as pH alteration (acidification), increased salinity, or reduced water availability—can modify the bioavailability and toxicity of microplastics and their associated contaminants. Furthermore, interactions with other environmental and climatic stressors can amplify their effects on exposed organisms, often under chronic and sublethal exposure conditions, significantly increasing ecological risk, particularly in fragile and anthropogenically pressured systems. To systematically address this issue, a multidisciplinary and integrated approach is adopted, simultaneously considering the environmental fate of contaminants, their bioaccessibility, toxicity, and interaction with other environmental stressors, including those related to climate change.

In this framework, activities are structured in several phases: from sampling and characterization of environmental matrices containing micro- and nanoplastics, to the assessment of ecotoxicological effects on model organisms, and finally the evaluation of potential risks to ecosystems. Experimental activities include the use of selective sampling systems (filters, passive samplers, controlled-flow pumps) and the use of virgin or commercial plastics subjected to controlled degradation processes simulating climate change-modified environmental conditions (e.g., increased temperature, enhanced UV radiation, pH and salinity variation).

The morphological and chemical characterization of particles is performed using Scanning Electron Microscopy (SEM), surface spectroscopy techniques (e.g., FTIR, Raman), and chemical analysis with high-sensitivity instruments such as ICP-MS and GC-MS. Particular attention is paid to characterizing leachates and generated nanoparticles due to their higher bioavailability and biological impact potential in systems under altered environmental conditions.

Ecotoxicological evaluation is based on a battery of tests conducted on organisms representing different trophic levels (e.g., algae, crustaceans, mollusks, fish), to analyze both acute and chronic effects, including physiological, behavioral, and molecular alterations. Including experimental conditions that simulate climate change effects allows for the identification of potential synergistic interactions between microplastics and changing environmental variables. However, the intrinsic complexity of environmental matrices and the multifactorial nature of microplastic contamination require an integrated analysis that goes beyond simple quantification. The so-called “cocktail

effect”—due to the simultaneous presence of multiple contaminants, including endocrine disruptors, heavy metals, and pesticides—can generate synergistic or antagonistic effects that are difficult to predict based on individual components. Only through ecotoxicological testing on real environmental samples and under experimental conditions that simulate climate change can these cumulative effects be reliably detected. The integration of physicochemical and biological data, together with the characterization of local environmental stressors (such as temperature, salinity, pH, and the presence of other pollutants), provides a more realistic picture of ecological risk. This assessment is essential to guide risk management and mitigation strategies, contributing to biodiversity protection and ecosystem conservation. The results obtained can support the development of guidelines, remediation interventions, and environmental monitoring measures. Key stakeholders involved include regulatory bodies, scientific institutions, public administrations, businesses, and local communities. Effective integration among these actors is crucial to translate scientific evidence into concrete and sustainable actions.

Instruments and Facilities:

- Casaccia Research Centre: Equipped for inorganic and organic analysis using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES), Mercury Analyzer (AMA), Gas Chromatography (GC-MS), and Ultra High-Performance Liquid Chromatography (UHPLC).
- Portici Research Site: Hosts research infrastructure including aquatic microcosm systems for simulating climate change scenarios to evaluate degradation processes and environmental impacts under variable pH, temperature, UV radiation, and salinity conditions.
- Model organism breeding and exposure are conducted using aquaria, climate chambers, and incubators. Ecotoxicological effects are measured using various tools, including Scanning Electron Microscopy (SEM), optical and fluorescence microscopes, stereomicroscopes, a spectrophotometer, and a bioluminescence inhibition system (Biolight Toxy).

MICROPLASTICHE, CAMBIAMENTO CLIMATICO E RISCHIO ECOLOGICO: UN'ANALISI INTEGRATA

L'interconnessione tra le tre principali crisi ambientali globali – cambiamento climatico, perdita di biodiversità e inquinamento – sta generando impatti ambientali profondi e sinergici, rappresentando una delle sfide più urgenti e complesse per la comunità scientifica. In questo contesto, i contaminanti di interesse emergente, in particolare le plastiche e i loro prodotti di degradazione, stanno assumendo un ruolo centrale. La loro ubiquità ambientale, unita all'aumento previsto della produzione e del rilascio nell'ambiente, impone la necessità di una valutazione scientifica approfondita.

Le microplastiche agiscono non solo come contaminanti primari (sia come micro/nanoparticelle che come composti lisciviati), ma anche come vettori di altre sostanze tossiche attraverso processi di adsorbimento e rilascio. I cambiamenti climatici influenzano significativamente questi processi, in particolare attraverso l'aumento della temperatura, che accelera la degradazione delle plastiche, favorendone la frammentazione e la trasformazione in nanoparticelle più reattive e potenzialmente più tossiche. Inoltre, condizioni climatiche estreme – come precipitazioni intense, siccità prolungate, inondazioni e lo



scioglimento dei ghiacci – modificano i pattern di trasporto, dispersione e accumulo delle microplastiche, facilitandone il rilascio in ecosistemi precedentemente meno esposti, inclusi quelli remoti e vulnerabili. La loro persistenza e capacità di dispersione nei diversi comparti ambientali – acqua, suolo, atmosfera – ne facilita il trasporto su lunghe distanze, contribuendo all'accumulo e alla possibile biomagnificazione lungo le reti trofiche. I cambiamenti nelle condizioni ambientali indotti dal riscaldamento globale, come l'alterazione del pH (acidificazione), l'aumento della salinità o la diminuzione della disponibilità idrica, possono modificare la biodisponibilità e la tossicità delle microplastiche e dei loro contaminanti associati. Inoltre, l'interazione con altri stressori ambientali e climatici può amplificare gli effetti sugli organismi esposti, spesso in condizioni di esposizione cronica e subletale, aumentando il rischio ecologico soprattutto nei sistemi fragili e già sottoposti a pressioni antropiche.

Per affrontare in modo sistemico questa problematica, è adottato un approccio multidisciplinare e integrato che considera simultaneamente il destino ambientale dei contaminanti, la loro bioaccessibilità, la tossicità e l'interazione con altri stressori ambientali, inclusi quelli derivanti dai cambiamenti climatici. In questo ambito, le attività si articolano attraverso diverse fasi: dalla raccolta e caratterizzazione dei campioni ambientali contenenti micro e nanoplastiche, alla valutazione degli effetti ecotossicologici su organismi modello, fino alla stima dei potenziali rischi per gli ecosistemi. Le attività sperimentali includono l'uso di sistemi di campionamento selettivi (filtri, campionatori passivi, pompe a flusso controllato) e l'impiego di plastiche vergini o commerciali sottoposte a processi controllati di degradazione simulando condizioni ambientali modificate da scenari di cambiamento climatico (ad esempio aumento della temperatura, intensificazione dei raggi UV, variazioni di pH e salinità). La caratterizzazione morfologica e chimica delle particelle è effettuata tramite microscopia elettronica a scansione (SEM), tecniche di spettroscopia di superficie (es. FTIR, Raman) e analisi chimica con strumenti ad alta sensibilità come ICP-MS e GC-MS. Particolare attenzione è rivolta alla caratterizzazione dei lisciviati e delle nanoparticelle generate, data la loro maggiore biodisponibilità e il potenziale impatto biologico nei sistemi esposti a condizioni ambientali alterate. La valutazione ecotossicologica si basa su batterie di test condotti su organismi rappresentativi di diversi livelli trofici (es. alghe, crostacei, molluschi, pesci), al fine di analizzare sia effetti acuti che cronici, comprese alterazioni fisiologiche, comportamentali e molecolari. L'inclusione di condizioni sperimentali che simulano gli effetti del cambiamento climatico consente

di identificare eventuali interazioni sinergiche tra microplastiche e variabili ambientali in mutamento. Tuttavia, la complessità intrinseca delle matrici ambientali e la natura multifattoriale della contaminazione da microplastiche richiedono un'analisi integrata che vada oltre la semplice quantificazione. Il cosiddetto "effetto cocktail" – dovuto alla presenza simultanea di più contaminanti, inclusi interferenti endocrini, metalli pesanti, pesticidi – può generare effetti sinergici o antagonisti difficilmente prevedibili sulla base dei singoli componenti. Solo mediante test ecotossicologici su campioni ambientali reali e in condizioni sperimentali che simulano i cambiamenti climatici è possibile rilevare in modo affidabile questi effetti cumulativi. L'integrazione dei dati chimico-fisici e biologici, congiuntamente alla caratterizzazione degli stressori ambientali locali (come temperatura, salinità, pH e presenza di altri inquinanti), consente di delineare un quadro più realistico del rischio ecologico. Tale valutazione è fondamentale per orientare strategie di gestione e mitigazione, contribuendo alla tutela della biodiversità e alla conservazione degli ecosistemi. I risultati ottenuti possono supportare la definizione di linee guida, interventi di bonifica e misure di monitoraggio ambientale. I principali stakeholders coinvolti includono enti regolatori, istituzioni scientifiche, amministrazioni pubbliche, aziende e comunità locali. Un'integrazione efficace tra questi attori è essenziale per tradurre le evidenze scientifiche in azioni concrete e sostenibili.

Strumenti:

- Presso la sede di Casaccia vengono effettuate analisi inorganiche e organiche tramite Spettrometria di Massa con Plasma ad Accoppiamento Induttivo (ICP-MS), Spettrometria di Emissione Ottica con Plasma ad Accoppiamento Induttivo (ICP-OES), Analizzatore di mercurio (AMA), Cromatografia gassosa (GC-MS), Cromatografia Liquida ad Ultra Elevata Prestazione (UHPLC)
- Presso la Sede di Portici è disponibile una infrastruttura di ricerca costituita da sistemi di microcosmi acquatici attrezzati per la simulazione di scenari di cambiamento climatico per la valutazione dei processi di degradazione ed impatto in relazione e variazioni di pH, T, Radiazione UV e Salinità.
- L'allevamento ed esposizione degli organismi modello prevede l'utilizzo di acquari, camere climatiche, incubatori. Gli effetti ecotossicologici vengono misurati tramite l'utilizzo di Microscopi (SEM, Microscopio ottico ed in fluorescenza e stereomicroscopi), di uno spettrofotometro ed un sistema per la misurazione dell'inibizione della bioluminescenza (Bioluminescence bioassay).

SMART BAY S. TERESA UNDERWATER OBSERVATORY

Since 2021, ENEA, CNR, and INGV have established "Smart Bay S. Teresa," a cooperation platform between research institutions working in the Gulf of La Spezia area, administrators (Municipality of Lerici), and small and medium enterprises (Scuola di Mare and Cooperativa di Mitilicoltori Associati). "Smart Bay S. Teresa" is a natural laboratory for research, technology, sustainable tourism, and shellfish farming, where stakeholders collaborate to create a Nature-Human ecosystem model to counteract the effects of climate change (<https://sostenibilita.enea.it/news/nasce-liguria-prima-smart-bay-italiana-promossa-enea-studio-cambiamento-climatico>).

Among various projects, the Smart Bay S. Teresa underwater observatory, realized thanks to PNRR funds (PNRR-IR "EMBRC-UP - Unlocking the Potential for health and Food from the seas" and PNRR Ecosystem of Innovation Liguria Region "RAISE - Robotics and AI for Socio-economic Empowerment"), represents an example of highly technological infrastructure for studying the marine environment. The observatory is a research infrastructure in the Eastern Ligurian Sea dedicated to measuring parameters relevant to climate and studies on responses to climate change (e.g., global warming and acidification) by calcifying marine organisms that form underwater architectures.



S. Teresa bay (Lerici).

The infrastructure, operational since July 2024, is coordinated and managed by the staff of ENEA's Marine Environment Centre S. Teresa belonging to Biodiversity and Ecosystems Laboratory. The data acquisition stations, positioned between the Regional Natural Park of Porto Venere and the Islands and the Port of La Spezia, are equipped with communication systems based on Internet of Underwater Things (IoUT) technology. Smart Bay S. Teresa is an integrated observatory currently composed of 10 nodes, all equipped with sensors for measuring sea surface temperature. In addition to temperature, 5 stations are also instrumented with:

- n. 1 ProOceanus CO₂-Pro CV sensor that measures the partial pressure of CO₂ gas dissolved in water using infrared detection, for monitoring carbon storage and CO₂ fluxes at depth
- n. 4 YSI EXO 2 model multiparametric probes that provide real-time data on water quality with measurements on seawater temperature, conductivity, pH, dissolved oxygen, turbidity, and Chlorophyll
- n. 2 multiparametric probes SeapHOx (total scale), seawater temperature, conductivity, pH, dissolved oxygen and Chlorophyll
- n. 5 Z-Pulse Doppler current meters based on the acoustic Doppler principle, for measuring current speed and direction in the sea.

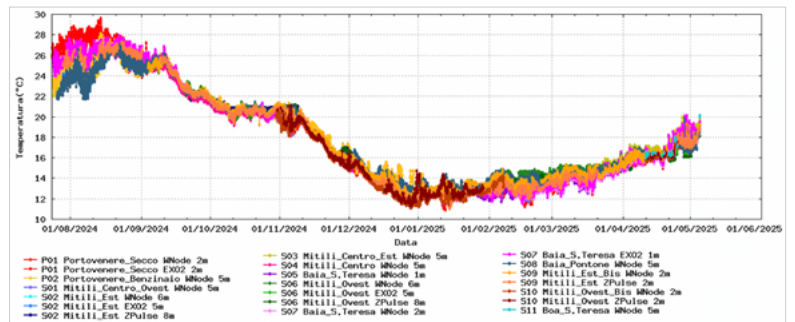
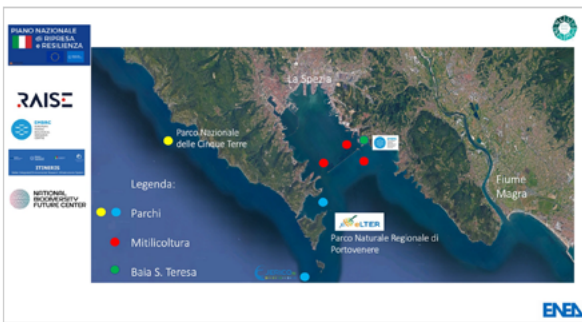
Furthermore, the observatory is included in the European Research Infrastructure EMBRC (European Marine Biological Resource Centre, of which the S. Teresa research center is part <https://embrc.it/en/agenzia-nazionale-per-le-nuove-tecnologie-lenergia-e-lo-sviluppo-economico-sostenibile-en/>) and in the LTER long-term ecological research network (being located within the Eastern Ligurian Sea site managed by ENEA <https://deims.org/56a6b13f-7c03-4bfa-ad4f-5f7e0f8189ca>).

Through IoUT network, the physico chemical data (temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, turbidity, chlorophyll, current, pCO₂) are acquired and transmitted with a frequency of 1 data point per hour, thus validated with analytical approaches (potentiometric titrations for total alkalinity measurements and the carbonate environment determination, pH spectrophotometric, Winkler titration for oxygen measurements, nutrient analysis using flow colorimetric techniques to determine phosphate, orthophosphate, nitrite, nitrate and silicate concentrations) and weekly and monthly measurement campaigns conducted by ENEA using a SeaBird SBE19plus V2 CTD multiparametric

probe with oxygen sensors SBE43 and SBE63 and Optode optical sensor for oxygen measurement. The data collected by the observatory, once subjected to quality control, are freely released under CC-BY mode and made available to citizens, entrepreneurs (e.g., mussel farmers), scientists, and local administrations, providing support for decision-making processes and early warning systems.

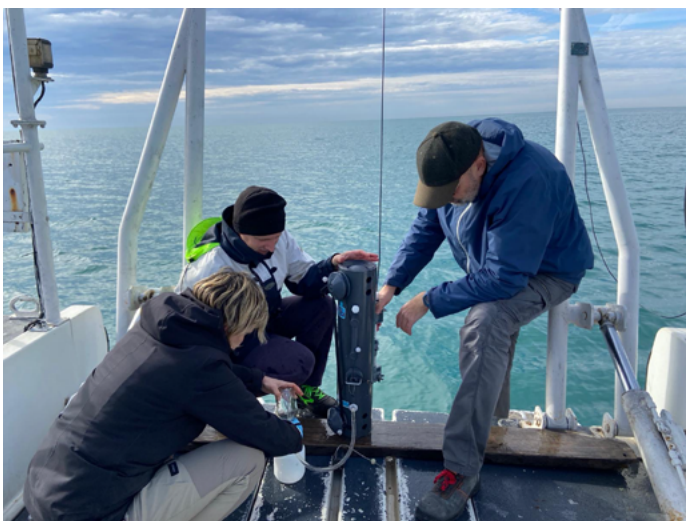
The data derived from the S. Teresa Underwater Smart Bay Observatory also finds applications in the context of recent developments in Artificial Intelligence, Machine Learning (ML), and Deep Learning, for studying the quality and correction of acquired data. Thanks to a collaboration with the National Institute of Metrological Research (INRiM), for example, the observatory's dissolved oxygen data are used to develop a data cleaning and reconstruction strategy based on ML models, which will allow evaluating the acquired data and making practically real-time predictions on dissolved oxygen conditions, an essential parameter for the survival of marine ecosystems and particularly for shellfish farming.

The goal is to make knowledge of the Gulf of Spezia more accessible to everyone, with the aim of identifying more effective strategies for restoring marine and coastal habitats, promoting a sustainable blue economy, and mitigating the effects of climate change.



Location scheme of the Underwater Smart Bay S. Teresa Observatory planned by 2026.

Real-time temperature data graph available for the 11 nodes.



Monthly sampling by boat.



Animal marine forests in the S. Teresa bay (Lerici). Credits: E. Mancuso.

L'OSSERVATORIO SOTTOMARINO DI SMART BAY DI SANTA TERESA

Dal 2021, ENEA, CNR e INGV hanno istituito "Smart Bay S. Teresa", ossia una piattaforma di cooperazione tra enti di ricerca che lavorano nell'area del Golfo di La Spezia, amministratori (Comune di Lerici) e piccole e medie imprese (Scuola di Mare e Cooperativa di Mitilicoltori Associati). "Smart Bay S. Teresa" è un laboratorio naturale di ricerca, tecnologia, turismo sostenibile e molluschicoltura, in cui gli attori collaborano per creare un modello di ecosistema Natura - Uomo per contrastare gli effetti del cambiamento climatico (<https://sostenibilita.enea.it/news/nasce-liguria-prima-smart-bay-italiana-promossa-enea-studio-cambiamento-climatico>).

Tra i diversi progetti, l'osservatorio sottomarino di Smart Bay S. Teresa, realizzato grazie ai fondi PNRR (PNRR-IR "EMBRC-UP - Unlocking the Potential for health and Food from the seas" e PNRR Ecosistema dell'Innovazione Regione Liguria "RAISE - Robotics and AI for Socio-economic Empowerment"), rappresenta un esempio di infrastruttura altamente tecnologica per lo studio dell'ambiente marino. L'osservatorio è una infrastruttura di ricerca nel Mar Ligure Orientale dedicata alla misura di parametri di rilevanza per il clima e per gli studi sulle risposte al cambiamento climatico (es. riscaldamento globale e acidificazione) da parte di organismi marini calcificanti che formano architetture sommerse.



Baia di Santa Teresa (Lerici).

L'infrastruttura, operativa da luglio 2024, è coordinata e gestita dal personale del Centro Ricerche Ambiente Marino S. Teresa del Laboratorio Biodiversità ed Ecosistemi dell'ENEA. Le stazioni di acquisizione dati, posizionate tra il Parco Naturale Regionale di Porto Venere e delle Isole e il Porto di La Spezia, sono dotate di sistemi di comunicazione basati sulla tecnologia dell'Internet of Underwater Things (IoUT). L'osservatorio sottomarino Smart Bay S. Teresa è composto ad oggi da 10 nodi, tutti dotati di sensori di misura per la temperatura superficiale del mare. Oltre alla temperatura, 5 stazioni sono strumentate anche con:

- n. 1 sensore ProOceanus CO₂-Pro CV che misura la pressione parziale del gas CO₂ disciolto in acqua utilizzando il rilevamento a infrarossi, per il monitoraggio dello stoccaggio di carbonio e dei flussi di CO₂ in profondità
- n. 2 sonde multiparametriche SeapHOx che misurano pH (scala totale), temperatura dell'acqua marina, conducibilità, ossigeno disciolto, clorofilla
- n. 4 sonde multiparametriche modello YSI EXO 2 che misurano temperatura dell'acqua marina, conducibilità, pH, ossigeno disciolto, torbidità e Clorofilla
- n. 5 correntometri Z-Pulse basati sul principio acustico Doppler che misurano la velocità e la direzione della corrente in mare.

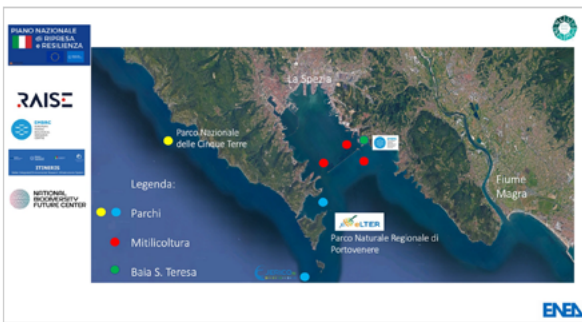
Inoltre, l'osservatorio è incluso nell'Infrastruttura di Ricerca Europea EMBRC (Centro Europeo per le Risorse Biologiche Marine di cui fa parte il centro di ricerca di S. Teresa <https://embrc.it/en/agenzia-nazionale-per-le-nuove-tecnologie-lenergia-e-lo-sviluppo-economico-sostenibile-en/>) e nel network di ricerca ecologica a lungo termine LTER (trovandosi all'interno del sito del Mar Ligure Orientale gestito da ENEA <https://deims.org/56a6b13f-7c03-4bfa-ad4f-5f7e0f8189ca>).

Tramite la rete IoUT, i dati fisico chimici (temperatura, ossigeno disciolto, pH, conducibilità, torbidità, clorofilla, corrente, pCO₂) sono acquistati e trasmessi con una frequenza di 1 dato l'ora, quindi validati con approcci analitici (titolazioni potenziometriche per misure di alcalinità totale e sistema di carbonati, pH spettrofotometrico, titolazioni con metodo Winkler per misure di ossigeno, analisi di nutrienti tramite tecniche colorimetriche a flusso per determinare le concentrazioni di fosfati, ortofosfati, nitriti, nitrati e silicati) e campagne di misura settimanali e mensili condotti da ENEA tramite una sonda multiparametrica SeaBird SBE19plus V2 CTD con sensori di ossigeno SBE43 e SBE63 e sensore

ottico Optode per la misura dell'ossigeno. I dati raccolti dall'osservatorio, una volta sottoposti a controllo di qualità vengono rilasciati liberamente in modalità CC-BY e messi a disposizione a cittadini, imprenditori (es. mitilicoltori), scienziati e amministrazioni locali, fornendo supporto ai processi decisionali e sistemi di allerta precoce.

I dati derivati dall'Osservatorio Underwater Smart Bay di S. Teresa trovano anche applicazioni nel contesto dei recenti sviluppi nell'Intelligenza Artificiale, Machine Learning (ML) e Deep Learning, per lo studio della qualità e la correzione dei dati acquisiti. Grazie a una collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM), ad esempio, i dati sull'ossigeno disciolto dell'osservatorio vengono utilizzati per lo sviluppo di una strategia di pulizia e ricostruzione dei dati basata su modelli ML, che permetterà di valutare la qualità dei dati acquisiti e fare previsioni praticamente in tempo reale sulle condizioni dell'ossigeno disciolto, parametro essenziale per la sopravvivenza degli ecosistemi marini e in particolare per la molluschicoltura.

L'obiettivo è di rendere la conoscenza del Golfo di Spezia più accessibile a tutti, con l'obiettivo di identificare strategie più efficaci per il ripristino di habitat marini e costieri, promuovere un'economia blu sostenibile e mitigare gli effetti del cambiamento climatico.



Schema di posizionamento delle stazioni dell'Underwater Smart Bay S. Teresa Observatory previste entro 2026.

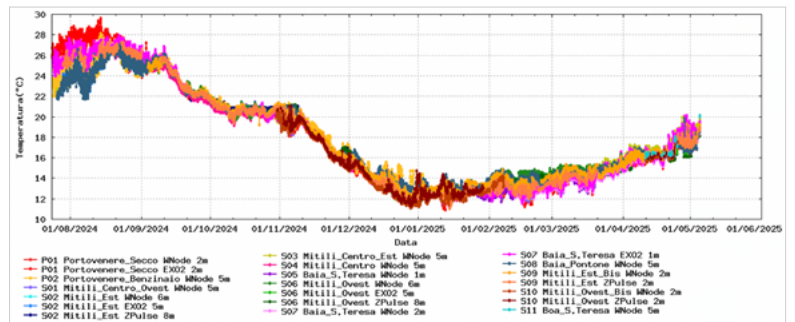
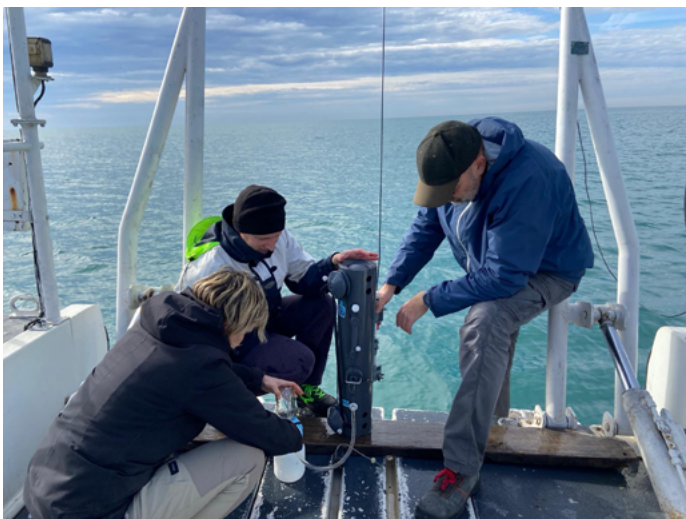


Grafico dei dati di temperatura in tempo reale disponibili per gli 11 nodi.



Campionamento mensile da imbarcazione.



Foreste marine animali presenti nella baia di S. Teresa (Lerici). Credits: E. Mancuso.

SCIENTIFIC COMPUTING AT ENEA: THE CRESCO AND ENEAGRID SYSTEMS

Numerical implementation of models simulating atmospheric, oceanic, and land surface dynamics, key components in the study of climate change and air quality, is performed using the scientific computing systems managed by ENEA. Within this framework lies ENEAGRID (<https://www.eneagrid.enea.it>), a geographically distributed computational grid across various ENEA centers, integrated with the high-performance computing (HPC) systems of the CRESCO family (<https://www.eneagrid.enea.it/CRESCOportal>).

ENEAGRID represents a strategic infrastructure for the reliable daily generation and distribution of climate and air quality forecasts. It supports international and European flagship initiatives such as CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), which provides operational information on atmospheric composition at both global and regional scales, and Med-CORDEX (Mediterranean Coordinated Regional Downscaling Experiment), which focuses on high-resolution climate simulations in the Mediterranean basin.

Thanks to its advanced software framework, ENEAGRID enables users to access an integrated virtual environment aggregating distributed computing resources across ENEA's research centers in Trisaia, Brindisi, Portici, Frascati, Casaccia, and Bologna. This setup supports complex simulations at both national and international levels.

Over time, the increasing complexity of simulations and the enhanced capabilities of scientific computing systems made it necessary to establish a dedicated structure for their technical and operational management. As a result, ENEA created a specialized laboratory for the installation, configuration, maintenance, and continuous upgrading of its HPC infrastructure. This laboratory operates in close collaboration with ENEA's research teams, providing strategic and technical support for numerical modeling activities.

The HPC systems currently in production and used daily for climate, marine, and environmental modeling include CRESCO6 and CRESCO7 (Portici), CRESCO4F (Frascati), and CRESCO4C (Casaccia). The infrastructure will soon be expanded with the deployment of CRESCO8, a next-generation system also located in Portici, designed to increase computational power and operational flexibility.

The following sections describe the technical specifications and scientific applications of each system.

CRESCO 6

Hosted in the CED1 data hall of ENEA's Portici Research Center, CRESCO 6 was installed in two phases between spring 2018 and spring 2019. It consists of 424 Lenovo ThinkSystem SD520 compute nodes, each equipped with two 48-core Intel(R) Xeon(R) Platinum 8160 processors (2.10 GHz), 192 GB RAM, a 100 Gb/s Intel Omni-Path interconnect, two GbE interfaces, and BMC/IPMI 1.8 remote management capabilities. Overall, the cluster offers 20,352 cores, connected via a high-bandwidth, low-latency Intel Omni-Path 100 Gb/s network. The system reaches a peak performance of 1.4 Pflops, measured using the HPL (High Performance Linpack) benchmark, equivalent to 1.4 quadrillion floating-point operations per second. In 2019, CRESCO 6 ranked 420th on the global Top500 list of the most powerful supercomputers.

Storage includes approximately 3.8 petabytes distributed over two parallel GPFS file systems: one dedicated to simulation runs, the other to long-term data storage, with regular backups ensuring data integrity.

CRESCO 7

The CRESCO 7 supercomputer is located in the CED2 data hall at the ENEA Research Center in Portici. It was installed in spring 2024 and made available to users during the summer of the same year.

The system is composed of 144 Lenovo ThinkSystem SD520 compute nodes, each configured with two 48-core Intel(R) Xeon(R) Platinum 8160 processors running at 2.10 GHz and equipped with 192 GB of RAM. Each node also features a 100 Gb/s Mellanox Infiniband EDR interface, two GbE interfaces, and BMC/IPMI 1.8 support for remote console



ENEAGRID - Interconnected ENEA Centres and Distribution of Resources.



The CRESCO 6 Supercomputer.

management. In total, the cluster provides 6,912 cores, interconnected via a high-bandwidth, low-latency Infiniband Mellanox EDR 100 Gb/s network. Its computing performance, measured using the HPL (High Performance Linpack) benchmark, reaches approximately 0.5 Pflops. Storage is handled by a 1 PB parallel LUSTRE file system, accessible through the same low-latency network.

Compared to CRESCO 6, the two architectures differ mainly in the type of interconnection network. Although CRESCO 7 has fewer nodes and lower peak computing power, it plays a strategic role in the development of the ENEAGRID ecosystem. In fact, CRESCO 7 is the first cluster in the family to adopt a fully open-source software infrastructure, replacing the IBM-distributed LSF resource manager and GPFS file system with the open-source alternatives SLURM and LUSTRE.

This technological shift proved essential for the deployment of the next high-performance system in the family, CRESCO 8, which is expected to be released to users before the summer break of 2025.

CRESCO 8

The CRESCO 8 cluster, installed in the CED3 data hall of the ENEA Research Center in Portici, represents the latest generation of high-performance computing systems in the CRESCO family. It is structured into three distinct sections, each optimized for specific computational needs.

The conventional (CPU) section includes 758 nodes, providing a total of 97,024 cores. Each node is a Lenovo ThinkSystem SD650 V3 server equipped with two Intel Xeon Platinum 8592+ processors with 128 cores (3.9 GHz) and 512 GB of RAM.

The accelerated (GPU) section consists of 15 nodes with a total of 60 GPUs. Each server, Lenovo ThinkSystem SD650 V3-I model, features two Intel Xeon Platinum 8592+ CPUs with 128 cores (3.9 GHz), 512 GB of RAM, and four Intel Data Center Max 1550 GPUs (code name Ponte Vecchio).

The high-bandwidth memory (HBM) section includes 16 nodes with a total memory capacity of 18,432 GB. Each node is a Lenovo ThinkSystem SD650 V3 server configured with two Intel Xeon CPU Max 9480 processors with 112 cores (3.5 GHz) and 1,152 GB of RAM.

All nodes are interconnected via a Mellanox InfiniBand NDR network with a bandwidth of 200 Gb/s and latency below 1 μ s, arranged in a 2-tier fat-tree topology with 2:1 blocking. Through this network, the system connects to a DDN ExaScaler 400x2 storage platform offering 10 PB of storage managed via a LUSTRE file system.

Following successful testing, the system is currently in operational validation and will be made available to users during summer 2025.

CRESCO 4F

The CRESCO 4F supercomputer is hosted in the CED data hall of the ENEA Research Center in Frascati and was installed in spring 2020, following the decommissioning of the CRESCO4 cluster in Portici. Its primary purpose is to ensure operational redundancy for air quality forecasting procedures, while also providing high reliability in the data production chain for the CAMS initiative.

The system consists of 64 servers, each equipped with two 8-core sockets based on Intel E5-2670 processors running at 2.6 GHz, and a total of 64 GB of RAM (equivalent to 4 GB per core). Each node includes a 500 GB SATA II disk, one Infiniband QDR interface at 40 Gb/s (with 32 Gb/s effective data rate), two GbE interfaces, and a BMC/IPMI 1.8 module with remote console management software.

Overall, the system provides 1,024 cores interconnected through a low-latency 4xQDR Infiniband network at 40 Gb/s, managed by a Qlogic 12800 switch. The supercomputer is also equipped with a GPFS parallel file system to support computation and data storage operations.

CRESCO 4C

The CRESCO 4C supercomputer is hosted in the CED data hall of the ENEA Research Center in Casaccia and was installed in spring 2020, following the decommissioning of the CRESCO4 cluster in Portici.

The system consists of 32 servers, each equipped with two 8-core sockets using Intel E5-2670 processors running at 2.6 GHz and 64 GB of RAM, equivalent to 4 GB per core and capable of executing up to 8 instructions per clock cycle. Each node also includes a 500 GB SATA II disk, a 40 Gb/s Infiniband QDR interface (with an effective data transfer rate of 32 Gb/s), two GbE interfaces, and BMC/IPMI 1.8 support with remote console management software.



The CRESCO 8 Supercomputer.

Overall, CRESCO 4C provides 512 cores, interconnected via a low-latency 4xQDR Infiniband network at 40 Gb/s, managed by a Qlogic 12800 switch.

Modeling Activities for Climate and Air Quality

The CRESCO family of supercomputers forms the backbone of simulation activities carried out by ENEA researchers working in the fields of climate and air quality. Every day these systems perform complex numerical runs, leveraging parallel computing to deliver accurate and timely results that support scientific research, environmental planning, and public policy.

The main numerical models in use include:

- **WRF (Weather Research and Forecasting Model):** a high-resolution atmospheric model used for weather forecasting and the study of regional and urban climate processes, developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR) [<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>].
- **FARM (Flexible Air quality Regional Model):** developed by ARIANET, this model is specifically designed for urban and regional air quality simulations, with a focus on pollutant dispersion and exceedance events [<https://www.aria-net.it/en/prodotti-2/farm/>].
- **MITgcm (MIT General Circulation Model):** a high-performance oceanic and atmospheric model capable of simulating the geophysical dynamics of marine basins and the atmosphere with a fully 3D, non-hydrostatic approach [<https://mitgcm.readthedocs.io/en/latest/>].
- **WWIII (WaveWatch III):** a third-generation spectral model developed by NOAA, used to simulate wave propagation and interaction on global and regional scales. It is a key tool for metocean modeling and coastal applications [<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>].

These models are optimized for efficient execution on parallel architectures and are compiled directly on CRESCO systems. System administrators provide modular programming environments through the Modules software, allowing users to easily configure their computational workspace.

To maximize performance on multi-core and multi-node architectures, models are typically compiled using either OpenMPI or IntelMPI, the latter offering enhanced integration with Intel processors and more efficient inter-node communication.

During compilation, all models require integration of parallel scientific libraries, essential for managing structured, multidimensional data. In particular, parallel versions of HDF5 (High-performance Data Format) and NetCDF (Network Common Data Form) are critical for reading and writing the large-scale datasets used during simulations.

Automated operational chains developed for several of ENEA's strategic projects play a particularly important role. These workflows produce daily high-resolution forecasts of climate and air quality on both national and pan-European scales. The resulting simulations are used by local authorities, health agencies, environmental operators, and European stakeholders to support evidence-based decision-making.

One of the key strengths of the CRESCO infrastructure is its distributed redundancy. The CRESCO4F and CRESCO4C clusters, located at the Frascati and Casaccia research centers respectively, enable full replication of the modeling workflow. This ensures operational continuity in case of downtime or infrastructure issues at the main Portici facility. Such a distributed architecture guarantees the constant availability of at least one valid set of results, enhancing the overall reliability of the scientific services delivered by ENEA.

IL CALCOLO SCIENTIFICO IN ENEA, I SISTEMI CRESCO ED ENEAGRID

La risoluzione numerica dei modelli che simulano le dinamiche atmosferiche, oceaniche e della superficie terrestre, elementi centrali per lo studio dei cambiamenti climatici e della qualità dell'aria, è affidata ai sistemi di calcolo scientifico gestiti dall'ENEA.

In questo contesto si inserisce ENEAGRID (<https://www.eneagrid.enea.it>), la griglia computazionale geograficamente distribuita tra diversi centri ENEA, integrata con i sistemi di calcolo ad alte prestazioni della famiglia CRESCO (<https://www.eneagrid.enea.it/CRESCOportal>).

ENEAGRID rappresenta un'infrastruttura strategica per l'elaborazione e la distribuzione quotidiana, con elevata affidabilità, di dati previsionali su clima e qualità dell'aria, impiegati in iniziative internazionali ed europei di riferimento come il servizio CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service), che fornisce informazioni operative sulla composizione dell'atmosfera a livello globale e regionale, e Med-CORDEX (Mediterranean Coordinated Regional Downscaling Experiment), dedicata alla simulazione ad alta risoluzione del clima nel bacino del Mediterraneo.

Grazie a una struttura software avanzata, ENEAGRID consente di unificare in un unico ambiente virtuale le risorse di calcolo distribuite presso i centri ENEA di Trisaia, Brindisi, Portici, Frascati, Casaccia e Bologna, offrendo agli utenti una piattaforma integrata per l'esecuzione di simulazioni complesse su scala nazionale e internazionale.

Nel tempo la crescente complessità delle simulazioni e l'ampliamento delle potenzialità offerte dai sistemi di calcolo scientifico hanno reso necessario istituire una struttura dedicata alla loro gestione tecnica ed evolutiva. È nato così un laboratorio specializzato nell'installazione, nella configurazione, nella manutenzione e nell'aggiornamento continuo delle infrastrutture HPC (High Performance Computing) di ENEA. Questo laboratorio opera in stretta sinergia con i gruppi di ricerca, fornendo supporto strategico e operativo alle attività di modellistica numerica.

I sistemi attualmente in produzione, utilizzati quotidianamente per simulazioni atmosferiche, marine e ambientali, comprendono i supercalcolatori CRESCO6 e CRESCO7, installati presso il centro ENEA di Portici, CRESCO4F presso la sede di Frascati e CRESCO4C presso quella di Casaccia.

A breve l'infrastruttura sarà ulteriormente potenziata con l'entrata in funzione di CRESCO8, il nuovo sistema HPC anch'esso installato nel centro di Portici, progettato per ampliare capacità computazionale e flessibilità operativa. Nei paragrafi seguenti vengono presentate nel dettaglio le caratteristiche tecniche dei diversi sistemi e le principali attività scientifiche che vi vengono svolte.

CRESCO 6

Il supercalcolatore CRESCO 6 è ospitato nella sala CED1 del Centro di Ricerche ENEA di Portici ed è stato installato in due fasi successive, tra la primavera del 2018 e quella del 2019.

Il sistema è composto da 424 nodi di calcolo Lenovo ThinkSystem SD520, ciascuno dotato di due socket da 48 core con processori Intel(R) Xeon(R) Platinum 8160 (2.10 GHz), 192 GB di memoria RAM, un'interfaccia Intel Omni-Path a 100 Gb/s, due interfacce GbE, ed un supporto BMC/IPMI 1.8 e software per la gestione remota della console. Nel complesso, il cluster mette a disposizione 20.352 core, interconnessi tramite una rete ad alta larghezza di banda e bassa latenza basata su tecnologia Intel Omni-Path a 100 Gb/s. Nella sua configurazione definitiva, il sistema raggiunge una potenza di calcolo pari a 1.4 Pflops, misurata attraverso il benchmark di riferimento HPL (High Performance Linpack).

In termini pratici, ciò equivale alla capacità di eseguire un milione e quattrocentomila miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo. Grazie a queste prestazioni, CRESCO 6 ha raggiunto nel 2019 la posizione numero 420 della Top



ENEAGRID – Centri ENEA interconnessi e distribuzione delle risorse.



Il supercalcolatore CRESCO 6.

500, la classifica mondiale dei supercomputer più potenti. Il sistema dispone di uno spazio di archiviazione di circa 3.8 petabyte, accessibile tramite la rete a bassa latenza. Lo storage è organizzato in due file system paralleli GPFS: uno dedicato all'esecuzione delle simulazioni, l'altro alla conservazione dei dati. Quest'ultima area è sottoposta a backup periodico, a garanzia della sicurezza e integrità dei dati degli utenti.

CRESCO 7

Il supercalcolatore CRESCO 7 è situato nella sala CED2 del Centro di Ricerche ENEA di Portici. È stato installato nella primavera del 2024 ed è stato reso disponibile agli utenti durante l'estate dello stesso anno.

Il sistema è composto da 144 nodi di calcolo Lenovo ThinkSystem SD520, ciascuno configurato con due socket da 48 core con processori Intel(R) Xeon(R) Platinum 8160 a 2.10 GHz e 192 GB di memoria RAM. Ogni nodo è inoltre dotato di un'interfaccia Infiniband Mellanox EDR a 100 Gb/s, due interfacce GbE, e supporto BMC/IPMI 1.8 con software per la gestione remota della console.

Nel complesso, il cluster mette a disposizione 6.912 core, collegati tra loro tramite una rete ad alta banda e bassa latenza basata su tecnologia Infiniband Mellanox EDR a 100 Gb/s. La potenza di calcolo, misurata mediante il benchmark HPL (High Performance Linpack), è pari a circa 0.5 Pflops. Lo storage è garantito da un file system parallelo LUSTRE da 1 PB, accessibile tramite la stessa rete a bassa latenza. Dal confronto con CRESCO 6 emerge che le due architetture differiscono principalmente per il tipo di rete di interconnessione. Anche se CRESCO 7 dispone di un numero inferiore di nodi e una potenza computazionale più contenuta, il sistema ha un ruolo strategico nello sviluppo dell'ecosistema ENEAGRID. Infatti, CRESCO 7 è il primo cluster della famiglia ad adottare un'infrastruttura software interamente open source, sostituendo il gestore di risorse LSF e il file system GPFS (entrambi distribuiti da IBM) con le alternative gratuite SLURM e LUSTRE.

Questa scelta tecnologica è stata determinante per l'implementazione del successivo supercalcolatore ad alte prestazioni, CRESCO 8, il cui rilascio agli utenti è previsto prima della pausa estiva del 2025.

CRESCO 8

Il cluster CRESCO 8, installato presso il CED 3 del Centro di Ricerche ENEA di Portici, rappresenta l'ultima generazione dei sistemi di calcolo ad alte prestazioni della famiglia CRESCO. È articolato in tre sezioni distinte, ognuna ottimizzata per specifiche esigenze computazionali. La sezione convenzionale (CPU) è costituita da 758 nodi, per un totale di 97.024 core. Ogni nodo è un server Lenovo ThinkSystem SD650 V3, equipaggiato con due processori Intel Xeon Platinum 8592+ da 128 core, con frequenza di 3.9 GHz, e 512 GB di memoria RAM.

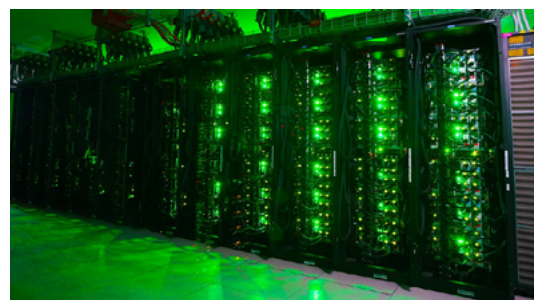
La sezione accelerata (GPU) comprende 15 nodi dotati complessivamente di 60 GPU. Ogni server, modello Lenovo ThinkSystem SD650 V3-I, integra due processori Intel Xeon Platinum 8592+ da 128 core a 3.9 GHz, 512 GB di RAM e quattro GPU Intel Data Center Max 1550 (nome in codice Ponte Vecchio). La sezione ad alta banda e memoria (HBM) è composta da 16 nodi, con una dotazione complessiva di 18.432 GB di RAM. Ciascun nodo è un Lenovo ThinkSystem SD650 V3 configurato con due processori Intel Xeon CPU Max 9480 da 112 core, con frequenza di 3.5 GHz, e 1.152 GB di memoria RAM.

Tutti i nodi sono collegati tra loro attraverso una rete InfiniBand NDR Mellanox, con banda passante pari a 200 Gb/s e latenza inferiore a 1 μ s, organizzata secondo una topologia fat-tree a due livelli con blocco 2:1. Attraverso questa rete, il sistema è interconnesso con un DDN ExaScaler 400x2, che fornisce uno spazio di archiviazione di 10 PB gestito tramite file system LUSTRE.

Dopo il collaudo con esito positivo, il sistema è in fase di test operativo, e sarà rilasciato all'utenza nell'estate 2025.

CRESCO 4F

Il supercalcolatore CRESCO 4F è ospitato nella sala CED del Centro di Ricerche ENEA di Frascati ed è stato installato nella primavera del 2020, a seguito della dismissione del cluster CRESCO4 di Portici. Il suo scopo principale è garantire la ridondanza operativa delle procedure previsionali sulla qualità dell'aria, assicurando al contempo un'elevata affidabilità nella produzione dei dati per il progetto CAMS2_40. Il sistema è costituito da 64 server, ciascuno equipaggiato con due socket da 8 core, basati su processori Intel E5-2670 a 2.6 GHz, con 64 GB di RAM complessiva, equivalente a 4 GB per core. Ogni nodo dispone di un disco SATA II da 500 GB, di un'interfaccia Infiniband QDR a 40 Gb/s (con 32 Gb/s effettivi per il trasferimento dati), di due interfacce GbE e di un modulo BMC/IPMI 1.8 con software per la gestione remota della console.



Il supercalcolatore CRESCO 8.

Nel complesso, il sistema mette a disposizione 1.024 core, collegati tra loro attraverso una rete a bassa latenza basata su tecnologia Infiniband 4xQDR a 40 Gb/s, gestita da uno switch Qlogic 12800. Il supercalcolatore è inoltre dotato di un file system parallelo GPFS, a supporto delle attività di calcolo e archiviazione.

CRESCO 4C

Il supercalcolatore CRESCO 4C è ospitato nella sala CED del Centro di Ricerche ENEA di Casaccia ed è stato installato nella primavera del 2020, a seguito della dismissione del cluster CRESCO4 di Portici.

Il sistema è costituito da 32 server, ciascuno dotato di due socket da 8 core, con processori Intel E5-2670 a 2.6 GHz, e 64 GB di RAM, pari a 4 GB per core, in grado di eseguire fino a 8 istruzioni per ciclo di clock. Ogni nodo dispone inoltre di un disco SATA II da 500 GB, di un'interfaccia Infiniband QDR a 40 Gb/s (con una velocità effettiva di 32 Gb/s per il trasferimento dati), di due interfacce GbE e del supporto BMC/IPMI 1.8 con software per la gestione remota della console. Nel complesso, CRESCO 4C offre 512 core, interconnessi tramite una rete a bassa latenza basata su tecnologia Infiniband 4xQDR a 40 Gb/s, gestita da uno switch Qlogic 12800.

Le attività di modellistica per clima e qualità dell'aria.

I sistemi di supercalcolo della famiglia CRESCO rappresentano la spina dorsale delle attività di simulazione svolte dai ricercatori ENEA impegnati nei settori del clima e della qualità dell'aria. Ogni giorno, questi sistemi eseguono run numerici ad alta complessità, sfruttando l'elaborazione parallela per garantire risultati accurati e tempestivi a supporto della ricerca scientifica, della pianificazione ambientale e delle politiche pubbliche.

I principali modelli numerici utilizzati includono:

- **WRF (Weather Research and Forecasting Model)**, un modello atmosferico ad alta risoluzione impiegato per la previsione meteo e lo studio dei processi climatici regionali e urbani, sviluppato dal National Center for Atmospheric Research (NCAR) [<https://www.mmm.ucar.edu/models/wrf>].
- **FARM (Flexible Air quality Regional Model)**, sviluppato da ARIANET, specificamente pensato per la modellazione della qualità dell'aria su scala urbana e regionale, con particolare attenzione alla dispersione di inquinanti e agli episodi di superamento dei limiti [<https://www.aria-net.it/en/prodotti-2/farm/>].
- **MITgcm (MIT General Circulation Model)**, un modello oceanografico e atmosferico ad alte prestazioni, in grado di simulare le dinamiche geofisiche dei bacini marini e dell'atmosfera con approccio fully 3D e risoluzione non idrostatica [<https://mitgcm.readthedocs.io/en/latest/>].
- **WWIII (WaveWatch III)**, modello spettrale di terza generazione sviluppato dalla NOAA, utilizzato per la simulazione della propagazione e dell'interazione delle onde marine su scala globale e regionale, essenziale per la modellistica meteo-marina e le applicazioni costiere [<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/wavewatch/>].

Questi codici sono progettati per un'esecuzione efficiente su architetture parallele e vengono compilati direttamente nei sistemi CRESCO. Gli amministratori di sistema mettono a disposizione ambienti di programmazione modulabili tramite il software Modules, che consente agli utenti di configurare con facilità l'ambiente di lavoro computazionale. Per ottimizzare le prestazioni su architetture multi-core e multi-nodo, la compilazione avviene generalmente utilizzando OpenMPI, oppure IntelMPI, che offre un'integrazione avanzata con i processori Intel e consente una gestione più efficiente della comunicazione tra i nodi.

In fase di compilazione, tutti i modelli richiedono l'integrazione di librerie scientifiche in versione parallela, fondamentali per la gestione dei dati in formato strutturato e multidimensionale. In particolare, le librerie HDF5 parallele (High-performance Data Format) e NetCDF parallele (Network Common Data Form) risultano essenziali per la lettura e scrittura dei grandi dataset utilizzati durante le simulazioni.

Un ruolo di particolare rilievo è svolto dalle catene operative automatizzate sviluppate per alcuni progetti strategici dell'Ente che producono giornalmente previsioni ad alta risoluzione su clima e qualità dell'aria in ambito nazionale e paneuropeo. Le simulazioni generate vengono utilizzate da enti locali, autorità sanitarie, operatori ambientali e stakeholder europei per prendere decisioni informate.

Un punto di forza del sistema CRESCO è la sua ridondanza distribuita: i cluster CRESCO4F e CRESCO4C, situati rispettivamente nei centri di Frascati e Casaccia, permettono di replicare l'intero workflow modellistico, garantendo continuità operativa anche in caso di interruzioni o problemi infrastrutturali nei sistemi principali di Portici. Questo assetto distribuito consente di assicurare la disponibilità costante di almeno una versione valida dei risultati, rafforzando l'affidabilità complessiva del servizio scientifico offerto da ENEA.



www.enea.it