



**ENEA**

Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente

## **DOSSIER**

# **ENEA PER LO STUDIO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E DEI LORO EFFETTI**

Workshop

**ENEA PER LO STUDIO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI  
E DEI LORO EFFETTI**

20 marzo 2007

Roma

*Ambiente.  
Energia  
Innovazione*



ENTE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E L'AMBIENTE

## **DOSSIER**

# **ENEA PER LO STUDIO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E DEI LORO EFFETTI**

Workshop

**ENEA PER LO STUDIO DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI  
E DEI LORO EFFETTI**

20 marzo 2007  
Roma

**Autori**

F. Antonioli, V. Artale, C.A. Campiotti, S. Cocito, R. Delfanti, N. Colonna, B. Della Rocca, G. Delmonaco, G. Di Sarra, M. Frezzotti, C. Giraudi, M. Iannetta, C. Margottini, S. Marullo, P. Menegoni, B. Narcisi, A. Peirano, P. Picco, P. M. Ruti, M. Sciortino, M. V. Struglia, E. Valpreda, V. Verrubbi.

**Coordinamento**

M. Garozzo

## Prefazione

Il 2006 è stato l'anno in cui il dibattito sul riscaldamento globale ha visto una forte convergenza di posizioni sull'influenza dell'uomo nell'alterazione del sistema climatico. Ora l'attenzione si sposta su ciò che il riscaldamento globale significa per il mondo: fino al 20% del prodotto lordo mondiale perso e 200 milioni di profughi. Sono le due cifre che riassumono lo scenario del futuro climatico dipinto da un ex dirigente della Banca Mondiale, l'economista Nicholas Stern.

L'ENEA, attraverso le esperienze maturate nel corso degli ultimi 20 anni ed i risultati conseguiti nell'ambito di progetti di ricerca integrati e fortemente multidisciplinari, è in grado di dettagliare i cambiamenti in atto, in particolare nel Mediterraneo e in Italia, mettendo in evidenza le attuali tendenze, gli scenari futuri, gli impatti registrati.

La sfida che si vuole raccogliere è quella di valutare gli effetti socio-economici ed ambientali del cambiamento climatico in Italia, in un quadro più ampio ed articolato di conoscenze finalizzate alla promozione ed attuazione di politiche per lo sviluppo sostenibile.

Occorre, per questo, agire sia sulle cause del cambiamento climatico che sugli effetti, che sempre di più mettono a rischio il nostro territorio (aree costiere, dissesto idrogeologico, desertificazione, perdita di biodiversità), attraverso strategie e politiche di mitigazione e di adattamento.

L'impegno ENEA è forte su entrambi i fronti, per la componente "mitigazione" l'attenzione è rivolta soprattutto agli aspetti tecnologici legati alle fonti rinnovabili, alla riduzione delle emissioni e al miglioramento dell'efficienza energetica; per la componente "adattamento" l'attività è focalizzata su monitoraggio, studio della variabilità climatica in vari contesti ambientali, simulazioni/scenari e valutazioni degli impatti.

In questo documento viene affrontato il problema dell'adattamento ai cambiamenti climatici per minimizzare le conseguenze negative prevedibili, prevenire i possibili danni e combattere le emergenze future. Vengono trattati gli aspetti legati alle evidenze del cambiamento climatico in atto, alle modificazioni delle dinamiche ambientali indotte e ai relativi impatti sul territorio, attraverso l'integrazione di osservazioni, modelli e tecnologie innovative.

*L'approccio ENEA*, in cui nel documento si riportano degli esempi rappresentativi, propone l'applicazione di concetti di trasversalità ed integrazione tra molti ambiti disciplinari per mettere in campo una strategia di *adattamento flessibile*, attraverso la messa a punto di una "filiera coerente di conoscenze", in grado di modulare le risposte sulla base delle diverse evidenze ed esigenze che si manifestano sul territorio.





## INDICE

<b>1. Evidenze, studio ed analisi dei Cambiamenti Climatici</b>	<b>7</b>
1.1 Osservazioni paleoclimatiche e serie strumentali storiche	7
1.2 CO <sub>2</sub> e altre forzanti atmosferiche	8
1.3 Incremento della temperatura e l'aumento della frequenza dei fenomeni meteorologici intensi	14
1.4 Il declino della criosfera e la risalita del livello del mare	15
1.5 Paleoclima del Mediterraneo	16
1.6 Monitoraggio del Mar Mediterraneo	21
1.7 Monitoraggio delle Foreste	34
1.8 Proiezioni e scenari climatici	36
<b>2. Valutazione degli impatti dei Cambiamenti Climatici</b>	<b>45</b>
2.1 Desertificazione	45
2.2 Agricoltura	49
2.3 Dissesto idrogeologico	54
2.4 Aree costiere a rischio	57
2.5 Biodiversità	64
2.6 La strategia ENEA di Adattamento flessibile ai Cambiamenti Climatici	68
<b>3. Strumenti tecnologici per le valutazioni d'impatto e la governance</b>	<b>69</b>
<b>4. Conseguenze economiche dei cambiamenti climatici: casi di studio ENEA</b>	<b>73</b>
4.1 La Piana di Fondi	73
4.2 La Regione Abruzzo	74
<b>Conclusioni</b>	<b>79</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>80</b>



## 1. EVIDENZE, STUDIO ED ANALISI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

*"L'umanità, utilizzando in breve tempo i combustibili fossili che si sono accumulati in milioni di anni, si sta imbarcando in un esperimento geofisico irreversibile a larga scala." (Revelle e Suess, 1957)*

Il clima del pianeta è cambiato molte volte durante la sua storia geologica in conseguenza di fattori naturali quali la variazione periodica dei parametri orbitali e dell'attività solare, la migrazione dei continenti, lo sviluppo di calotte polari e le variazioni della composizione dell'atmosfera. Il clima ha sempre esercitato una notevole influenza sulle attività umane, ma questo rapporto sta rapidamente cambiando.

La comunità scientifica internazionale ritiene infatti che le attività umane rappresentino un nuovo forzante del clima.

L'influenza dell'uomo sul clima avviene attraverso la perturbazione dei complessi processi di interazione fra la radiazione solare, la biosfera, l'atmosfera, e l'idrosfera, i quali regolano l'andamento naturale del clima. Le principali alterazioni indotte dall'uomo riguardano la variazione della composizione dell'atmosfera, in particolare l'immissione di "gas ad effetto serra" e di particelle di aerosol, ed i cambiamenti dell'utilizzo del suolo anche legati alla deforestazione. Queste modificazioni influenzano gli equilibri naturali e quindi anche la temperatura del pianeta.

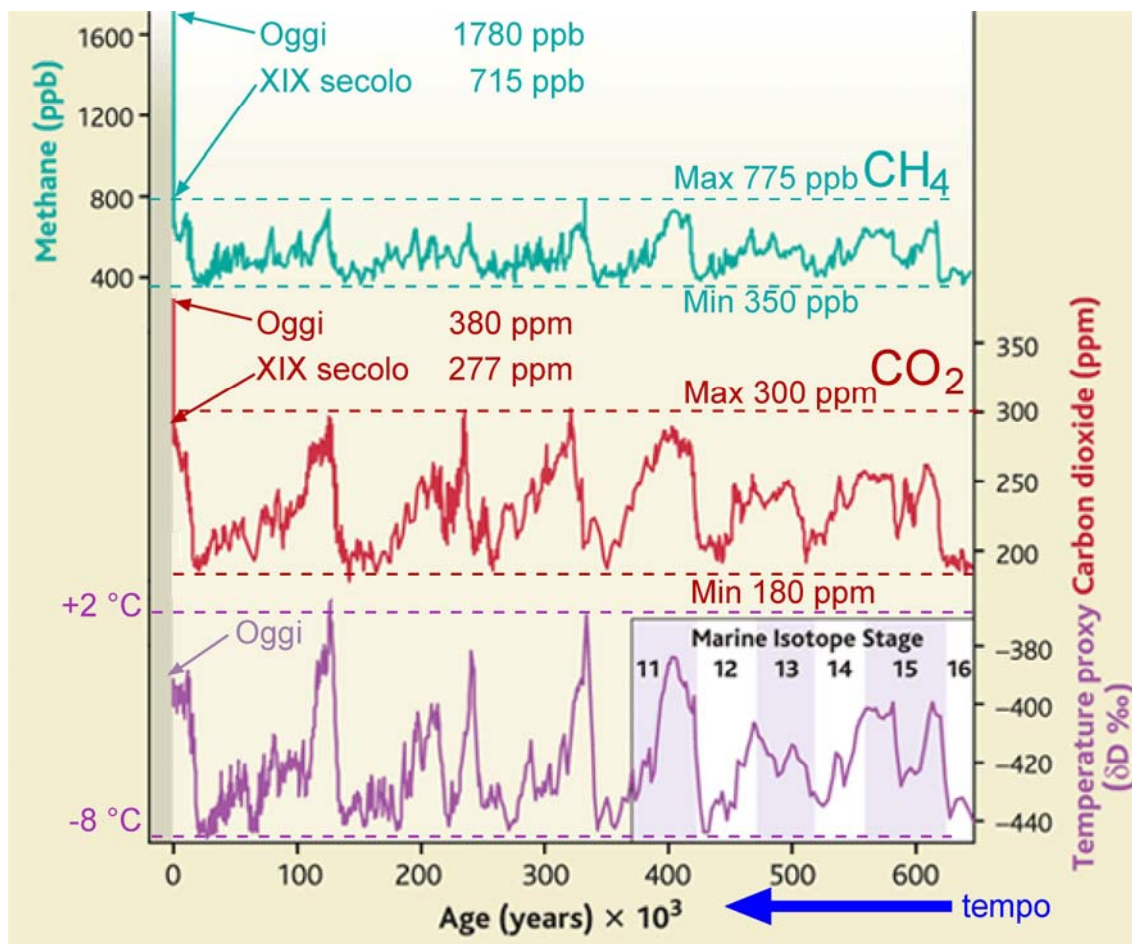
Nella registrazione paleoclimatica delle carote di ghiaccio le concentrazioni di gas serra (anidride carbonica e metano) hanno fluttuato sostanzialmente in fase con la temperatura. Negli ultimi 800 mila anni l'evoluzione naturale della temperatura sembra essere guidata dal forzante astronomico e l'anidride carbonica agisce da amplificatore di tale azione. Le variazioni naturali di anidride carbonica sono probabilmente condizionate dall'Oceano Meridionale, quelle del metano dall'estensione delle aree umide nelle regioni intertropicali e dell'emisfero nord.

Negli ultimi duecento anni, con l'inizio della rivoluzione industriale, si è verificato un notevole incremento nelle concentrazioni atmosferiche di polveri dovute all'attività antropica e di "gas ad effetto serra", quali anidride carbonica, metano, protossido di azoto ecc.

### 1.1 Osservazioni paleoclimatiche e serie strumentali storiche

Per gli ultimi decenni, la variazione in atmosfera della concentrazione dell'anidride carbonica è documentata dalle misure dirette effettuate a partire dal 1957 nella stazione di Manua Loa (Hawai, USA), e successivamente dalla rete mondiale del Global Atmosphere Watch (per l'Italia le stazioni di Lampedusa dell'ENEA, Plateau Rosa del CESI Ricerca, Monte Cimone dell'Aeronautica Militare). Le bolle d'aria racchiuse negli strati di ghiaccio dell'Antartide (20 anni di ricerche italiane dirette dall'ENEA) rappresentano l'unica testimonianza disponibile della concentrazione di gas serra precedentemente alla metà del XX secolo, e permettono di individuare il brusco aumento di tali gas nell'atmosfera. In particolare, nel XIX secolo i contenuti di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) e metano ( $\text{CH}_4$ ) erano rispettivamente di 277 ppm (*parti per milione*) e di 715 ppb (*parti per miliardo*; fig. 1), mentre l'attuale contenuto di anidride carbonica è di 380 ppm, con un incremento del 35% rispetto al XIX secolo. Il contenuto di metano è di 1780 ppb, +130% rispetto al XIX secolo. Nel periodo pre-industriale i contenuti di anidride carbonica e metano erano simili a quelli misurati nelle fasi geologiche calde (Interglaciali). Negli ultimi 820.000 anni la concentrazione di anidride carbonica è variata da un minimo di circa 180 ppm nelle fasi più fredde (Glaciali, con temperature inferiori alle attuali di 10-15°C) a un massimo di 300 ppm in quelle più calde (anche con temperature superiori alle attuali di 2-3°C). Analogamente il metano è variato da 350 ppb a 775 ppb. L'incremento antropico osservato negli ultimi 200 anni è simile a quello rilevato nei dati paleoclimatici fra un glaciale ed un interglaciale per l'anidride carbonica (100 ppm) e nettamente superiore (1000 ppb) per il metano. Accanto all'aumento di anidride carbonica e metano negli ultimi 200 anni si è registrata una crescita del 18% nella concentrazione di protossido di azoto. Le concentrazioni attuali di anidride carbonica e metano in atmosfera sono le più alte mai registrate negli ultimi 820.000 anni e stanno crescendo con velocità eccezionali, cento volte superiori a quelle dell'epoca pre-industriale.

Figura 1 - Andamento dei gas ad effetto serra (metano  $\text{CH}_4$ , anidride carbonica  $\text{CO}_2$ ) e del deuterio ( $\delta\text{D}$ , rappresentativo della temperatura dell'aria) nella carota di ghiaccio di EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) Concordia (modificato da Brook, 2006) negli ultimi 650.000 anni. L'età geologica aumenta da sinistra (periodo odierno) verso destra (periodi più antichi). Al progetto EPICA partecipano 10 nazioni europee, con finanziamenti nazionali e della Comunità Europea. La partecipazione italiana è rappresentata da ricercatori delle Università, dell'ENEA e dell'INGV. L'ENEA ha assicurato il coordinamento logistico e tecnologico alle attività di perforazione. Le ricerche italiane sono svolte nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerca in Antartide (PNRA), finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca

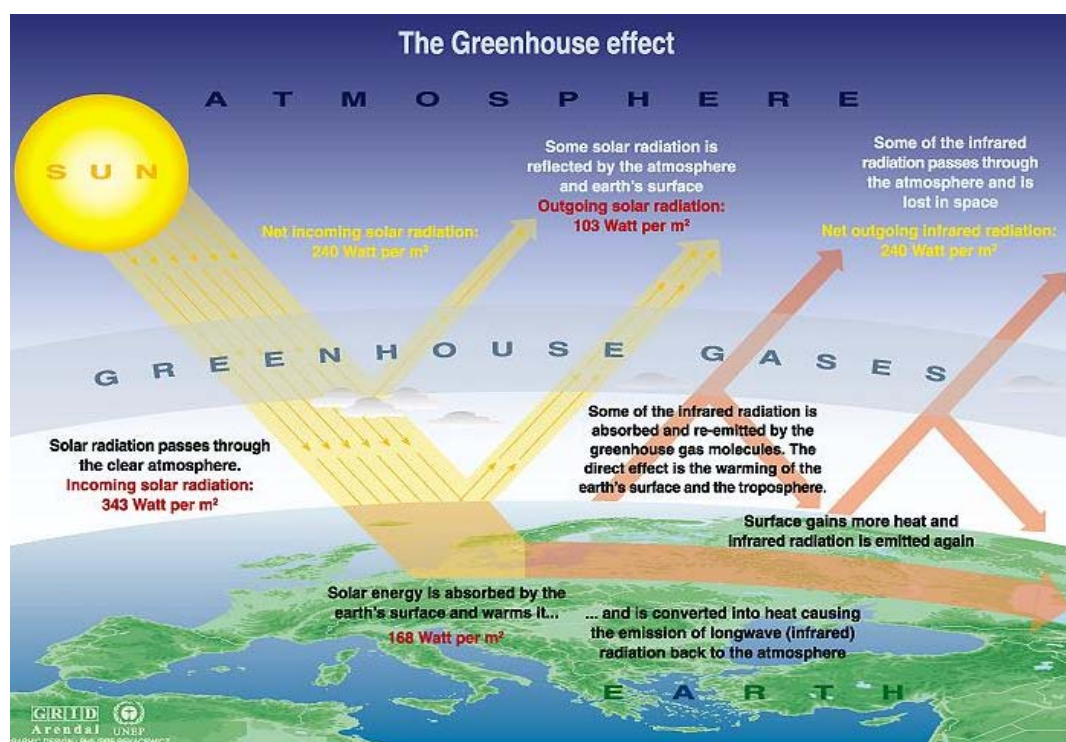


## 1.2 $\text{CO}_2$ e altri forzanti atmosferici

L'evoluzione del clima in Italia è largamente influenzata dalla presenza del Mediterraneo, che costituisce il più grande bacino chiuso del pianeta. Il clima della regione è fortemente condizionato dai forti contrasti esistenti tra il mare, la sponda meridionale, e la sponda settentrionale del bacino, e dalla complessità della morfologia delle coste e dell'orografia. Dal punto di vista della circolazione atmosferica, la regione Mediterranea e l'Italia si trovano, d'estate, in genere sotto l'influenza di masse d'aria di origine tropicale, e d'inverno prevalentemente sotto l'influenza di masse d'aria occidentali. La variabilità dei regimi di circolazione e le interazioni con un sistema così complesso rendono il Mediterraneo una regione particolarmente vulnerabile ai cambiamenti del clima, e sensibile sia ai processi globali che ai fenomeni su scala regionale e locale.

I principali forzanti atmosferici (gas ad effetto serra, aerosol etc.) che regolano il clima intervengono nel bilancio energetico del pianeta attraverso interazioni con la radiazione solare e la radiazione infrarossa (o terrestre). L'effetto prodotto sul clima da una variazione della concentrazione di un forzante viene quantificato stimando il cambiamento indotto nel flusso di energia sotto forma di radiazione (solare e terrestre) alla quota della tropopausa (circa 15 km alle nostre latitudini). Questa

grandezza viene definita "effetto radiativo" (*radiative forcing*), ed è rappresentativa degli effetti "istantanei" prodotti dalla variazione del forzante; non tiene conto cioè di effetti indiretti che si sviluppano su tempi medio-lunghi, e dei meccanismi di reazione (o *feedback*). In prima approssimazione, la variazione di temperatura media globale è proporzionale all'effetto radiativo. L'effetto serra è l'aumento di temperatura indotto dalla variazione del flusso di radiazione terrestre, a sua volta dovuto all'aumento nella concentrazione dei gas che assorbono la radiazione terrestre, o gas ad effetto serra. Alcuni meccanismi di reazione giocano un ruolo fondamentale nel determinare quale sia la sensibilità del clima rispetto alla variazione di composizione dell'atmosfera. Il più importante di questi meccanismi è il *feedback* del vapor d'acqua. Il vapor d'acqua intrappola una frazione di radiazione infrarossa maggiore rispetto ad ogni altro gas atmosferico, e la sua concentrazione in atmosfera dipende dalla temperatura. Il meccanismo di reazione si basa sul fatto che un aumento di temperatura produce un incremento della quantità atmosferica di vapor d'acqua, che a sua volta contribuisce significativamente all'effetto serra. La nostra capacità di prevedere l'evoluzione futura del clima ed i suoi effetti dipende criticamente dal grado di comprensione dell'evoluzione attuale e dei fenomeni fisici, chimici e radiativi che intervengono. Sono quindi necessarie misure accurate e continuative dell'evoluzione dei parametri climatici (temperatura, precipitazione, etc.), della composizione e struttura dell'atmosfera e dei flussi di radiazione solare e infrarossa, riportati nello schema seguente.



È inoltre fondamentale studiare nel dettaglio i processi fisici, chimici e radiativi ancora non ben compresi. Per questo scopo è necessaria la realizzazione di esperimenti dedicati.

La distribuzione dei principali forzanti atmosferici in Italia e nella regione Mediterranea risente della complessità sopra descritta: essa dipende da processi globali, dalla presenza di zone di emissione e/o di rimozione, dalla loro distribuzione ed evoluzione nel tempo, dalle trasformazioni chimiche che avvengono in atmosfera, e dai processi di trasporto su varie scale spaziali. Il Mediterraneo è caratterizzato dall'alternarsi di regimi differenti, anche nella composizione dell'atmosfera. Queste differenze di composizione si riflettono anche in differenti comportamenti del bilancio della radiazione. Per ottenere informazioni di valore generale sul comportamento dei forzanti del clima e sui loro effetti è quindi necessario individuare dei siti con caratteristiche particolari, non direttamente



influenzati da sorgenti locali. Vengono quindi utilizzate stazioni di misura ad alta quota, o in regioni remote (ad es. piccole isole).

A livello nazionale, misure sistematiche di  $\text{CO}_2$  ed altri gas ad effetto serra vengono quindi effettuate presso le stazioni di alta quota di Plateau Rosa (ENEA-CESI Ricerca), che si trova a 3500 m di quota sulle Alpi occidentali, e di Monte Cimone (Aeronautica Militare, CNR ed Università di Urbino), a 2160 m di quota nell'Appennino tosko-emiliano, e presso la stazione sull'isola di Lampedusa (ENEA), nel settore meridionale del Mediterraneo centrale. Le stazioni di Lampedusa, Plateau Rosa e Monte Cimone sono inserite in reti internazionali di misura (*Global Atmosphere Watch*, dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale), e costituiscono la Rete Nazionale per la Misura dei Gas ad Effetto Serra (*Green-net*). Figura 2 mostra l'evoluzione del contenuto atmosferico di  $\text{CO}_2$  misurato presso le tre stazioni. Recentemente l'ENEA ha attivato anche misure continuative sulle Madonie, in Sicilia, a oltre 1500 m di quota.

A Lampedusa è operativa una Stazione di Osservazioni Climatiche dell'ENEA, dove vengono effettuati studi, oltre che sulla evoluzione di  $\text{CO}_2$ , sui cambiamenti della composizione dell'atmosfera e sugli effetti da essi prodotti sul bilancio della radiazione. Lampedusa è una isola di piccole dimensioni, relativamente lontana da sorgenti di inquinanti di rilievo; i valori misurati a Lampedusa sono pertanto rappresentativi di una vasta regione del Mediterraneo. Figura 3 mostra, attraverso osservazioni effettuate a Lampedusa, l'evoluzione del contenuto atmosferico di vari componenti dell'atmosfera che giocano un ruolo importante nei processi che regolano il clima. Il loro contenuto in atmosfera è influenzato direttamente o indirettamente dalle attività umane. A parte il vapor d'acqua e le nubi (anch'essi studiati a Lampedusa), tutti i principali costituenti atmosferici di rilevanza per il clima sono riportati in figura 3. Tutti i composti riportati nella figura, ad eccezione degli aerosol, sono gas che assorbono radiazione infrarossa e contribuiscono all'effetto serra.

Figura 2 - Evoluzione del contenuto atmosferico di  $\text{CO}_2$  misurato presso le tre stazioni nazionali di Lampedusa (35.5°N, 12.6°E) e Plateau Rosa (45.9°N, 7.7°E) dell'ENEA, Monte Cimone (44.2°N, 10.7°E) dell'Aeronautica Militare (Apadula et al., 2005)

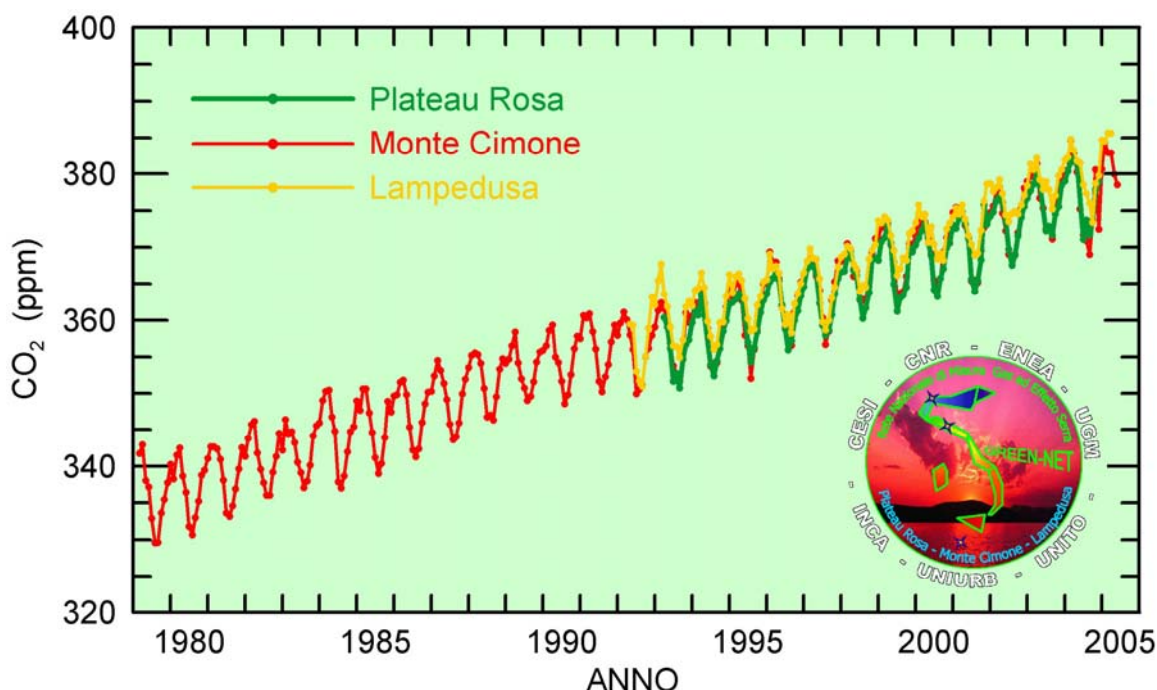
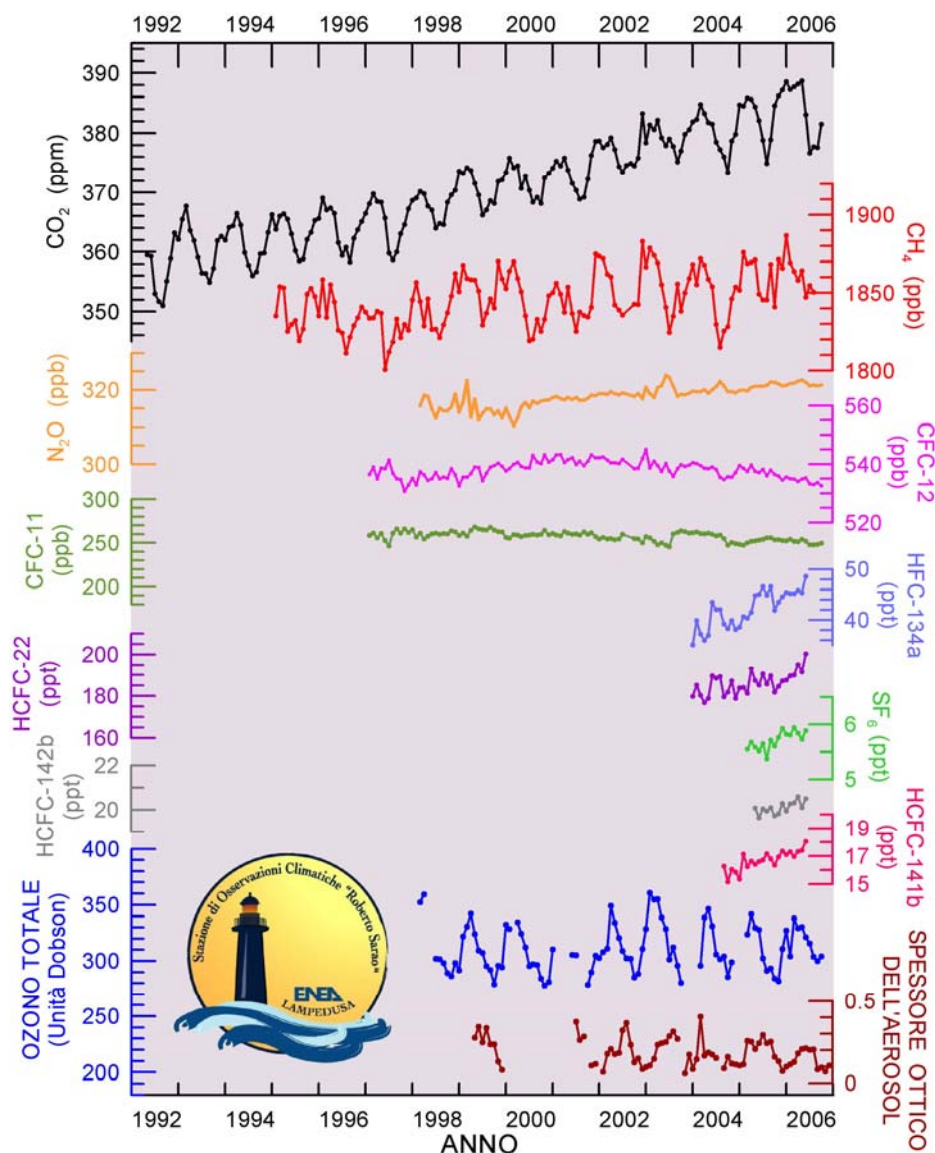


Figura 3 - Evoluzione delle medie mensili di alcuni componenti dell'atmosfera misurati alla Stazione di Osservazioni Climatiche di Lampedusa (35.5°N, 12.6°E; Artuso et al., 2007; Chamard et al., 2003; di Sarra et al., 2002; Meloni et al., 2007; Pace et al., 2006; <http://www.palermo.enea.it/lampedusa>), nel Mar Mediterraneo. Questi componenti giocano un ruolo importante nella regolazione del clima



I primi due gas in alto in figura 3 costituiscono i componenti atmosferici principali che partecipano al ciclo del carbonio. L'effetto radiativo indotto dall'aumento di CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> verificatosi negli ultimi 250 anni costituisce rispettivamente circa il 60 e il 18% dell'effetto totale prodotto dai gas ad effetto serra. La concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> è il risultato di complessi scambi tra l'atmosfera, la vegetazione e l'oceano. Agli scambi naturali di CO<sub>2</sub> si aggiunge il contributo delle emissioni antropiche, essenzialmente guidato dall'uso dei combustibili fossili e degli incendi di biomassa legati alle attività umane. Circa il 40% del quantitativo di CO<sub>2</sub> emesso dalle attività umane ogni anno viene assorbito da vegetazione e oceani, mentre il restante 60% rimane in atmosfera. Questa frazione è quella che produce l'aumento progressivo che appare in figura 3. Il ciclo stagionale è dovuto al ciclo di fotosintesi e respirazione della vegetazione. La variabilità a periodi più brevi è dovuta all'alternarsi di diverse masse d'aria, la cui concentrazione di CO<sub>2</sub> dipende principalmente dalla presenza di sorgenti e/o pozzi (sink) nella regione di origine. A Lampedusa è molto interessante osservare l'alternarsi di masse d'aria di origine Europea, le cui concentrazioni sono modulate dalla presenza di importanti sorgenti e pozzi

(emissioni antropiche e forestale), e di origine Africana. Il contenuto atmosferico di  $\text{CO}_2$  mostra una crescita di circa 1.7 ppm/anno, il valore più alto mai osservato da quando si effettuano questo tipo di misure (1957). L'aumento di concentrazione è stato particolarmente elevato negli anni 1997-98, nel 2001-2002, e nel 2005.

La crescita media del metano a Lampedusa sul periodo esaminato (1995-2005) è di circa 2 ppb/anno. A partire dagli '80 si è osservato un rallentamento, rispetto agli anni precedenti, nella crescita globale di tale gas. Questo rallentamento è continuato negli anni '90. L'evoluzione della concentrazione del metano in atmosfera è il risultato di numerosi processi, tra i quali la emissione da parte di organismi anaerobici, legata alla estensione delle zone umide (ed al clima), l'allevamento del bestiame, il trattamento dei rifiuti, la coltivazione di riso, l'uso dei combustibili fossili, gli incendi. I dati nel Mediterraneo e in Italia sono influenzati anche dalle emissioni che avvengono in Europa dell'est ed in Algeria dalle perdite dalle zone di estrazione ed alle linee di trasporto di gas e petrolio.

La crescita del protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) è dovuta principalmente alle emissioni antropiche legate all'uso dei combustibili fossili e dei fertilizzanti in agricoltura, e agli incendi di biomassa. Il protossido di azoto contribuisce per circa il 6% all'effetto radiativo dei gas ad effetto serra. Le emissioni di  $\text{N}_2\text{O}$ , insieme a quelle di idrofluorocarburi, perfluorocarburi, e  $\text{SF}_6$ , sono regolamentate dal Protocollo di Kyoto.

I clorofluorocarburi CFC-11 e CFC-12 sono i gas più abbondanti tra i composti di origine antropica del cloro, le cui emissioni sono regolate dal Protocollo di Montreal. La crescita di CFC-11 e CFC-12, che contribuiscono all'effetto radiativo dei gas-serra per circa l'8%, ha rallentato negli anni '90. Negli ultimi anni la concentrazione di CFC-11 e 12 ha iniziato a scendere, dopo la drastica riduzione di emissioni successiva al Protocollo di Montreal.

Gli altri cinque gas alogenati che compaiono in figura 3 (HCFC-22, HCFC-141b, HCFC-142b, HFC-134a, ed  $\text{SF}_6$ ) sono presenti nell'atmosfera in frazioni molto ridotte (1 ppt = 1 molecola dello specifico gas per ogni  $10^{12}$  molecole di aria). Nonostante l'esistenza dei Protocolli di Montreal e di Kyoto la concentrazione di questi gas in atmosfera sta aumentando velocemente. Questa crescita è principalmente legata alle emissioni industriali, o al loro utilizzo in sostituzione dei CFC.

I cambiamenti di concentrazione di ozono atmosferico sono un ulteriore esempio degli effetti indiretti dell'azione dell'uomo. Si osserva una riduzione progressiva (rapida negli anni '80 e '90, dal 1995 in lento recupero) dell'ozono in stratosfera, legata alla distruzione ad opera dei composti del cloro di origine antropica, ed un incremento a bassa quota, dovuto a formazione in zone inquinate, principalmente nei mesi estivi. Figura 3 mostra l'evoluzione dell'ozono totale, con un tipico ciclo annuale ed una ampia variabilità, soprattutto nei mesi invernali. Quest'ultima è dovuta principalmente a processi di trasporto in stratosfera. L'andamento su lungo periodo è il risultato della combinazione di variazioni di segno opposto a bassa ed alta quota. Poiché il contenuto totale mostra una diminuzione negli ultimi 25 anni, l'effetto complessivo è quello di controbilanciare, seppure in piccola parte, l'effetto di riscaldamento associato all'incremento degli altri gas ad effetto serra.

Le maggiori incertezze nella stima degli effetti sul bilancio della radiazione riguardano il ruolo del particolato atmosferico, o aerosol, e delle nubi. Gli aerosol giocano un importante ruolo diretto sul bilancio radiativo, interagendo sia con la radiazione solare che terrestre. Inoltre, essi costituiscono i nuclei sui quali si sviluppano le nubi, e sono in grado di influenzarne largamente le proprietà ottiche e radiative. Attraverso questo meccanismo, gli aerosol intervengono anche in modo indiretto nel bilancio della radiazione. Le incertezze legate sia al ruolo diretto che al ruolo indiretto degli aerosol sono molto significative, a causa della grande variabilità delle loro proprietà. In Italia e nel Mediterraneo centrale sono presenti diverse classi di particelle, che si formano grazie alla varietà nelle caratteristiche delle regioni che circondano il Mediterraneo: polvere desertica, proveniente dal Sahara o dalle regioni aride della Spagna; particelle inquinanti, prodotte principalmente nelle zone industriali ed urbane dell'Europa; aerosol marino, che si forma sul Mediterraneo; e particelle prodotte negli incendi forestali, principalmente in estate. Anche il segno degli effetti prodotti dagli aerosol sul bilancio della radiazione (cioè se producano un raffreddamento o un riscaldamento) dipende dalle loro caratteristiche. Negli

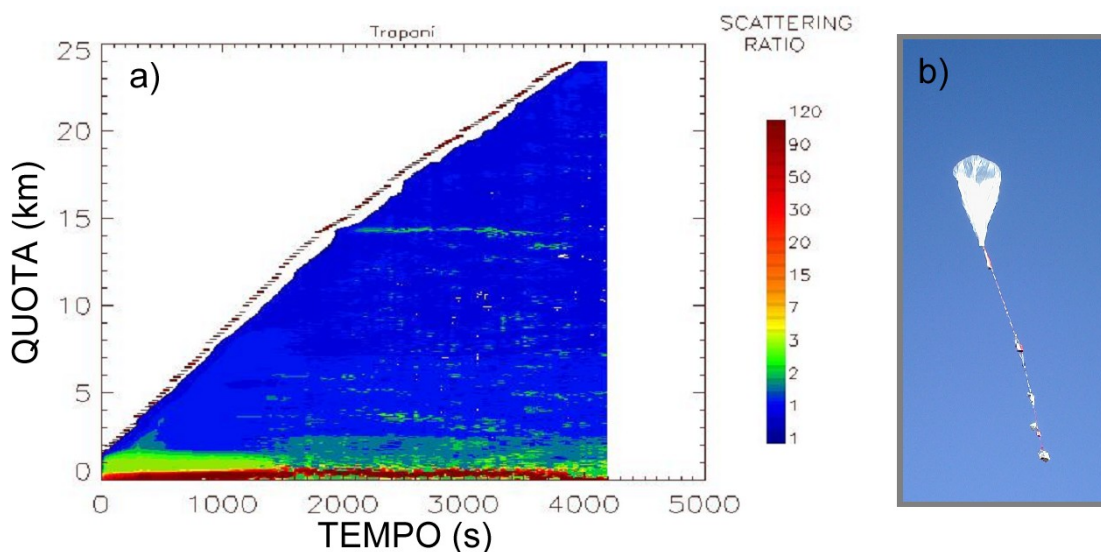
ultimi anni sono stati effettuati numerosi esperimenti a livello internazionale indirizzati a quantificare gli effetti prodotti dall'aerosol sul bilancio della radiazione.

Alcune campagne sperimentali sono state organizzate dall'ENEA ed indirizzate proprio a studiare questi aspetti. Gli aerosol producono sempre una riduzione della radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre; l'entità di questa riduzione dipende significativamente, oltre che dal quantitativo di aerosol, dalle sue proprietà. La tabella 1 mostra i valori di "efficienza di *forcing*" radiativo solare al suolo (media annuale) misurati a Lampedusa per diverse classi di aerosol. L'efficienza di *forcing* è l'effetto di riduzione della radiazione solare al suolo prodotta dallo stesso quantitativo di aerosol (spessore ottico unitario) appartenente a diverse classi. Confrontando le efficienze si ha una stima del peso dei vari tipi di aerosol sul bilancio della radiazione: l'effetto prodotto da una variazione nello spessore ottico dell'aerosol è uguale al prodotto dell'efficienza di *forcing* per la variazione, e dipende significativamente dal tipo di aerosol. Come si vede in tabella 1, le differenze tra i comportamenti delle varie classi sono significative, ed è necessario effettuare misure accurate e studi specifici per la determinazione degli effetti a livello regionale e globale. Se si calcola l'effetto radiativo alla sommità dell'atmosfera (quello che è maggiormente indicativo degli effetti sul clima), anche il segno viene a dipendere dal tipo di aerosol.

Tabella 1 - Media giornaliera dell'efficienza di forcing radiativo solare al suolo per diversi tipi di aerosol (di Sarra et al., 2007)

Classi di aerosol	Efficienza di <i>forcing</i> radiativo alla superficie (W/m <sup>2</sup> )
Tutte le classi	-86.0±2.5
Aerosol desertico	-78.3±4.3
Antropico	-62.0±4.7

Figura 4 - (a) Misura di aerosol effettuata tramite misure lidar da pallone lanciato dalla base dell'Agenzia Spaziale Italiana di Trapani Milo il 10 Luglio 2002 (il tempo è riferito al momento del lancio). Lo strumento ENEA (Di Donfrancesco et al., 2006) era installato su un pallone stratosferico (b) che ha attraversato il Mediterraneo occidentale, atterrando dopo circa 24 h sulle le coste della Spagna. Nel grafico a) è riportato l'andamento in quota del segnale. Sotto i tre km di quota il segnale è dovuto all'aerosol; la regione al di sopra di 3 km è essenzialmente priva di particolato, tranne che alla quota di circa 15 km (appena sotto la tropopausa), dove si riconosce la presenza di un cirro sub-visibile (la sottile linea verde da 2000 a 3500 secondi con spessore di poche centinaia di metri). Tali particolari cirri appaiono quasi trasparenti alla radiazione solare, ma risultano opachi alla radiazione infrarossa riemessa dalla Terra, contribuendo quindi al riscaldamento dell'atmosfera.



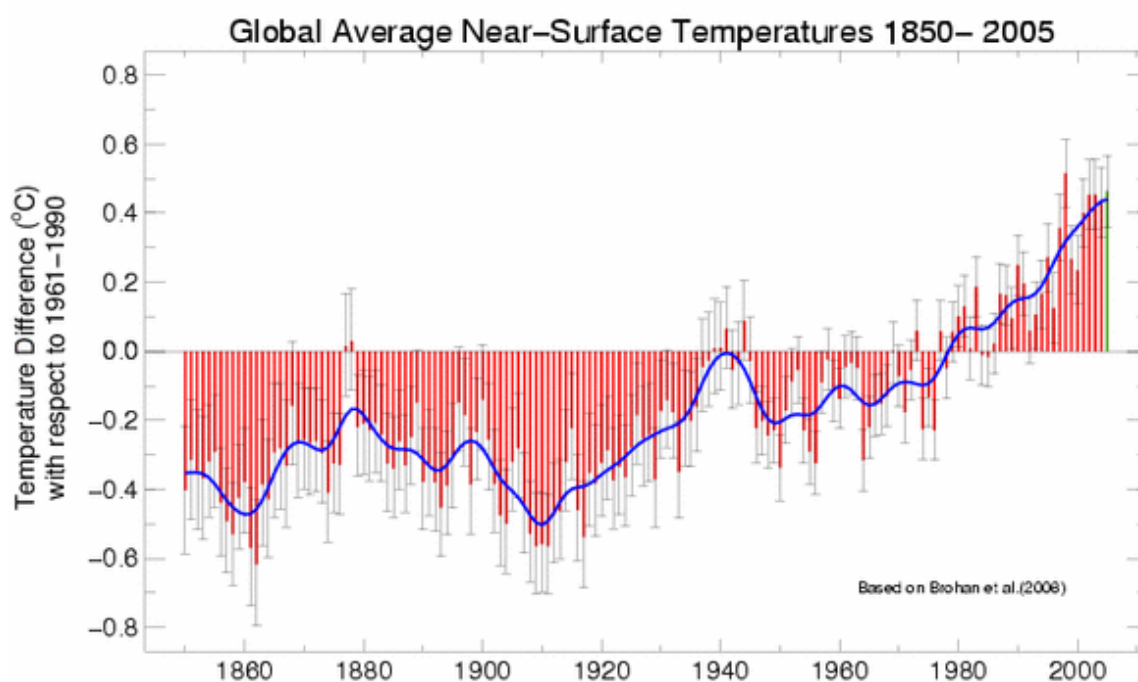


Molte incertezze sono legate al ruolo delle nubi. Gli effetti da esse prodotti dipendono dalle loro caratteristiche microfisiche, dalla quota, e dalla temperatura alla quale si trovano. Mentre le nubi basse producono un incremento del flusso radiativo uscente dall'atmosfera, e quindi un raffreddamento, i cirri, cioè le nubi di ghiaccio che si formano ad alta quota, possono produrre un riscaldamento. È quindi necessario studiare in maggior dettaglio caratteristiche, variabilità e distribuzione di queste nubi per determinarne il ruolo a scala regionale e globale. Da parecchi anni l'ENEA effettua studi sulle proprietà e su ruolo di queste nubi in varie regioni del globo e nel Mediterraneo, utilizzando strumentazione da terra, aviotrasportata, e su pallone. Figura 4 mostra un cirro sottile rilevato in un sondaggio atmosferico effettuato con uno strumento su pallone.

### 1.3 L'incremento della temperatura e l'aumento della frequenza dei fenomeni meteorologici intensi

Le ricostruzioni paleoclimatiche delle temperature relativamente agli ultimi 2000 anni indicano un periodo relativamente caldo attorno al X-XI secolo (periodo caldo medievale) ed un periodo relativamente freddo durante fra il XVI e il XIX secolo (piccola età glaciale). Le misure strumentali evidenziano che negli ultimi 100 anni la temperatura media superficiale planetaria è aumentata di circa 0,7 °C (fig. 5) e questo dato è coerente con quello misurato sul territorio italiano (circa 1,0 °C). Negli ultimi 25-30 anni la temperatura è cresciuta bruscamente alla velocità di 0,18 °C per decennio. I dieci anni più miti dall'inizio della registrazione strumentale (metà del XIX secolo) si sono verificati a partire dagli anni '90. L'aumento di temperatura non è stato uniforme sia geograficamente che temporalmente ed ha riguardato principalmente le terre emerse con un riscaldamento maggiore nell'emisfero settentrionale durante i periodi invernali e primaverili. Il confronto fra i dati strumentali e le serie paleoclimatiche indica che le temperature degli ultimi 50 anni sono state le più alte dal XVI secolo e molto probabilmente negli ultimi 2000 anni. Le simulazioni climatiche suggeriscono che gran parte del riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni è attribuibile all'aumento dei "gas ad effetto serra" con un contributo minore dovuto a cause naturali (es. attività solare).

Figura 5 - Temperature medie globali annuali rappresentate come differenza rispetto al periodo 1961-1990 (<http://www.metoffice.gov.uk/>)



Met Office

Hadley Centre for Climate Prediction and Research and CRU, University of East Anglia

Ci sono indicazioni di un aumento della frequenza dei fenomeni meteorologici intensi (tempeste, ondate di calore, uragani, prolungati periodi di siccità ecc.) in molte parti del mondo e una diminuzione significativa degli impulsi di area fredda alle medie e alte latitudini. A tale proposito vale la pena di ricordare la prolungata ondata di calore che ha investito l'Europa nell'estate del 2003 con temperature eccezionalmente elevate (oltre 3 °C al di sopra della norma). Le condizioni ambientali hanno provocato oltre 35.000 decessi, numerosissimi incendi, danni alla agricoltura e al sistema economico valutabili in 13 miliardi di €. La stagione di fusione dei ghiacciai alpini ha avuto una durata record di 93 giorni (media degli ultimi 20 anni 45 giorni) causandone una forte riduzione. Anche gli ultimi due anni saranno ricordati per la loro eccezionalità meteorologica. Nel 2005 si è verificato un numero record (27) di tempeste tropicali nel bacino dell'Atlantico, la metà delle quali ha raggiunto l'intensità degli uragani. L'autunno del 2006 è stato straordinariamente mite in gran parte dell'Europa, con temperature di circa 3 °C superiori alla media dalle Alpi alla Norvegia. Nel nord d'Italia il periodo autunnale si è chiuso con temperature che risultano le più calde dall'inizio delle misure meteorologiche (metà del XIX secolo). Anche il 2006 si colloca nel gruppo dei 10 anni più miti mai rilevati nella regione alpina, con un'anomalia positiva di 1 °C rispetto alla norma.

Per quel che riguarda l'Italia essa è totalmente inserita nella realtà del Mar Mediterraneo e molte attività dipendono da esso.

L'interpretazione delle variazioni ambientali degli ultimi millenni appare molto più difficile a causa dell'interazione tra uomo e ambiente. La forte aridificazione della sponda meridionale del Mediterraneo, che sempre più va estendendosi anche alla sponda nord, potrebbe essere dovuta, oltre che a fattori climatici, anche all'eccessivo sfruttamento attuato dalle popolazioni delle risorse naturali (acqua, suoli ed ecosistemi vegetali), attivando processi di desertificazione.

#### **1.4 Il declino della criosfera e la risalita del livello del mare**

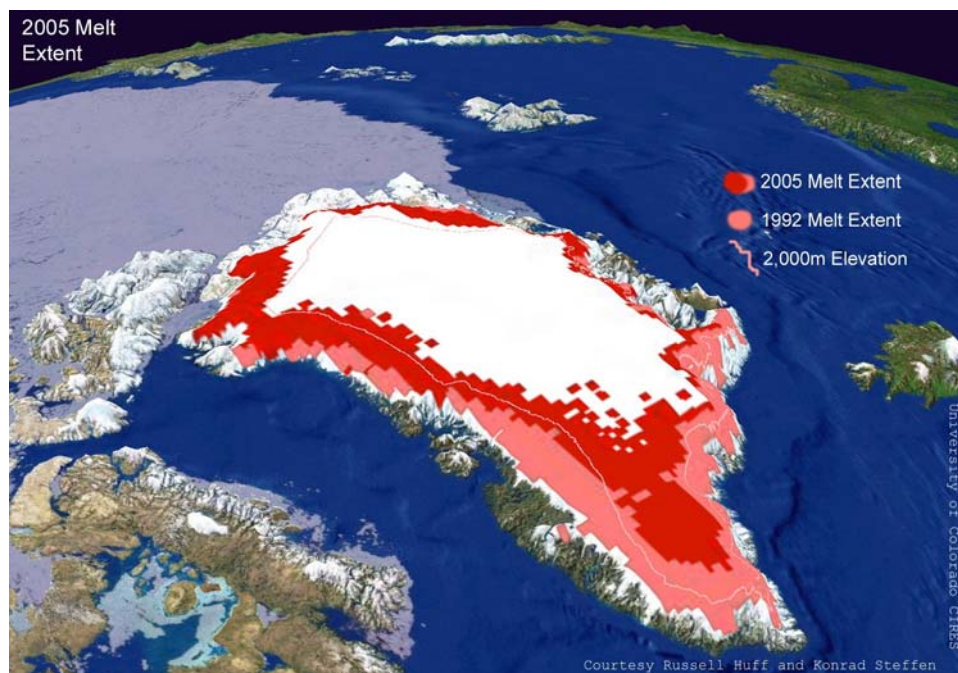
Evidenze geologiche suggeriscono che l'innalzamento medio del livello del mare negli ultimi 3000 anni è stato di circa 0,1-0,2 mm per anno. Le misure dei mareografi, durante l'ultimo secolo, hanno registrato una risalita di  $1,7 \pm 0,3$  mm per anno con una ulteriore accelerazione nell'ultima parte del XX secolo. I dati da satellite (dal 1994 al 2005) evidenziano una significativa accelerazione ( $3,0 \pm 0,5$  mm per anno) dell'innalzamento del livello del mare globale, anche se i dati locali possono differire significativamente dalle medie globali. L'attuale innalzamento del livello marino è dovuto in parte all'espansione termica degli strati superficiali del mare (stimata in 0,5 e 1,3 mm per anno) e alla variazione delle falde idriche, ma principalmente è da attribuire alla fusione dei ghiacci continentali e delle calotte polari (da 1,0 a 1,8 mm per anno).

Le aree polari costituiscono la sorgente fredda del sistema termodinamico globale. Esse regolano il bilancio termico della Terra e sono quindi di fondamentale importanza nell'equilibrio ambientale del nostro pianeta. Inoltre i ghiacci polari sono la riserva idrica dell'acqua dolce del nostro pianeta e dal loro "stato di salute" dipende l'innalzamento del livello del mare. Nelle aree polari si stanno verificando i cambiamenti climatici più macroscopici e che hanno effetti significativi sull'intero pianeta. La copertura nevosa nell'emisfero settentrionale è diminuita del 10% dalla metà del XX secolo con una drastica riduzione dei ghiacciai. A partire dagli anni '60 l'estensione del ghiaccio marino in Artide è diminuita del 20% raggiungendo i minimi nel Settembre 2005 e nel 2006. La variazione dell'albedo, causata dalla riduzione della copertura nevosa e del ghiaccio marino, ha contribuito sostanzialmente al riscaldamento dell'atmosfera con un aumento record (3-4°C in 50 anni) delle temperature medie annuali in Artide ed in Penisola Antartica. Negli ultimi dieci anni l'aumento della temperatura ha causato mutazioni ambientali significative quali: il collasso delle piattaforme di ghiaccio della Penisola Antartica (mai ridotte alle presenti condizioni almeno negli ultimi 100.000 anni), il drastico aumento della fusione superficiale sulla calotta groenlandese (fig. 6) e una forte accelerazione della quantità di ghiaccio che defluisce al mare attraverso i ghiacciai. Fra gli effetti antropici più significativi nelle aree polari è da segnalare l'assottigliamento dello strato di ozono stratosferico dovuto alla presenza di inquinanti nell'atmosfera come i clorofluorocarburi. In Antartide nel 2006 il "buco dell'ozono" ha raggiunto valori di estensione



record (oltre 28 milioni di km<sup>2</sup>) simili a quelli del 2000.

Figura 6 - Estensione della superficie di fusione della neve (1992 in rosa; 2005 in rosso) sulla calotta di ghiaccio groenlandese (CIRES)



### 1.5 Paleoclima del Mediterraneo

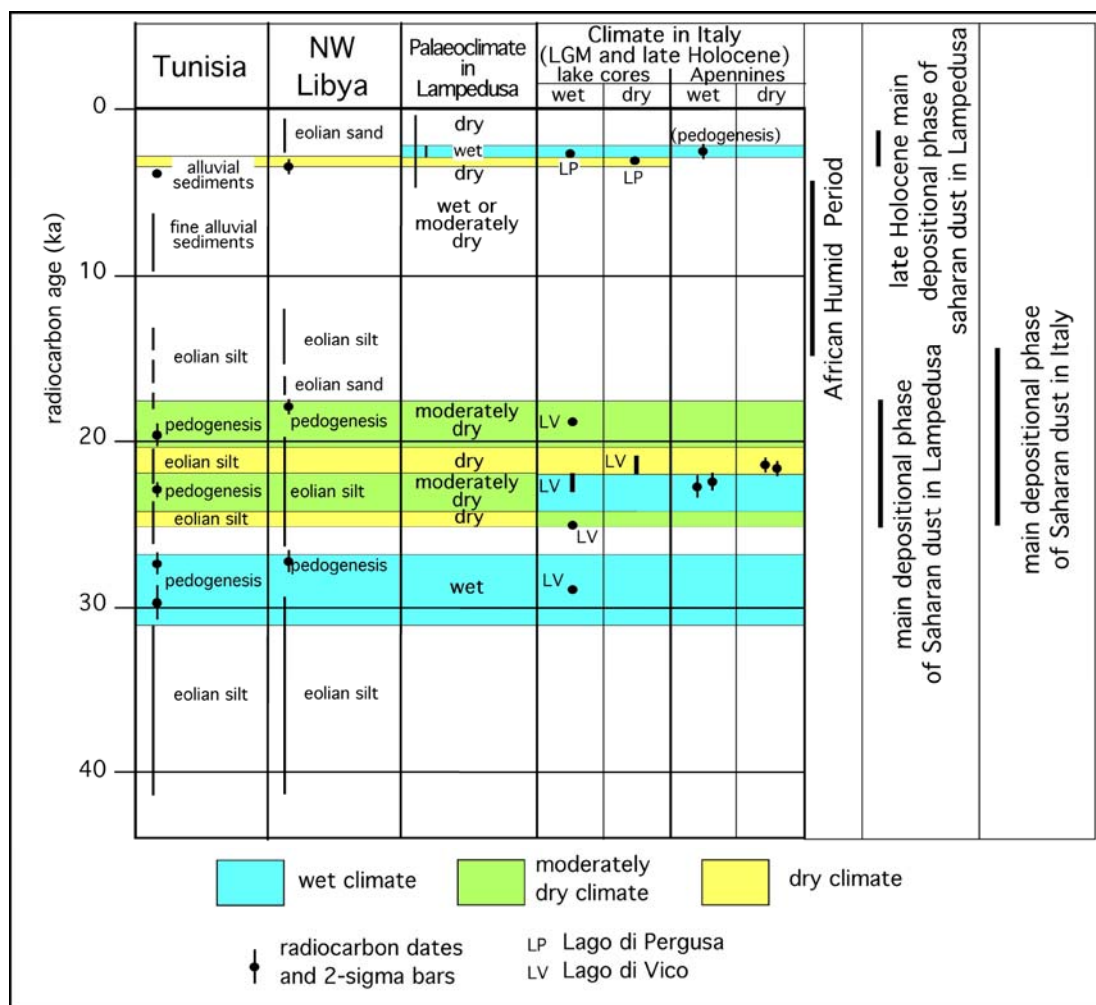
Gli studi paleoclimatici dei ricercatori ENEA sono stati avviati alla metà degli anni '80 e si riferiscono all'area del Mediterraneo centrale (Italia peninsulare e insulare, Africa Settentrionale), al deserto del Sahara. Tali studi hanno avuto un importante ruolo nella ricostruzione delle variazioni del clima dell'area in studio. Le variazioni climatiche nell'ultimo ciclo climatico glaciale-interglaciale in area mediterranea appaiono condizionate, in generale, dagli stessi fattori che hanno condizionato il clima globale, ma le sponde settentrionale e meridionale del bacino, a causa della diversa latitudine e conformazione morfologica dei continenti, sono spesso state interessate da tendenze climatiche opposte.

La ricostruzione del clima del passato si inquadra nella ampia problematica relativa alla caratterizzazione del sistema climatico globale e si prefigge di contribuire alla definizione della probabilità ed alla entità di future fluttuazioni del clima, mediante la comprensione dei processi che hanno portato al raggiungimento delle condizioni climatiche attuali. Poiché la prospettiva temporale del recente passato storico è troppo limitata per essere rappresentativa dell'entità e della durata delle fluttuazioni climatiche, è necessario procedere a ritroso nel tempo mediante lo studio di "archivi naturali" del clima relativi alla geosfera che conservino le tracce di eventi climatici del passato.

Nel corso del periodo (da circa 30.000 a circa 25.000 anni fa) che precede l'inizio dell'ultimo massimo glaciale, la temperatura non era fredda, ma non raggiungeva quella del periodo comunque post glaciale. Il livello del mare era inferiore all'attuale: le tendenze climatiche sulla sponda meridionale non erano molto diverse da quelle della sponda settentrionale (fig. 7).

Durante l'ultimo massimo glaciale e l'inizio del Tardiglaciale (da circa 25.000 a circa 14.000 anni fa) la temperatura media in area mediterranea, seguendo la tendenza globale, si abbassò di vari gradi centigradi, il livello del mare si abbassò fino ad oltre 140 m sotto il livello attuale facendo emergere ampie zone della piattaforma continentale. Inoltre il cambiamento della circolazione globale legato alla presenza delle grandi calotte Scandinava e Britannica, ed un indebolimento nella circolazione di Hadley in area equatoriale e tropicale, portò ad una forte differenza tra le variazioni climatiche delle sponde del Mediterraneo.

Figura 7 - Correlazione tra eventi paleoclimatici verificatisi in Nord Africa, nell'isola di Lampedusa, in Sicilia e in Italia peninsulare. Le variazioni climatiche sono dedotte dallo studio di sedimenti eolici, alluvionali, lacustri, glaciali e di paleosuoli. (da Giraudi, 2004, modificato)



Il Nord Africa fu soggetto ad una forte aridificazione ed il deserto del Sahara si espanse mentre la sponda settentrionale venne interessata dalle precipitazioni innescate dall'umidità che le masse d'aria provenienti dall'Africa Settentrionale (fig. 8) raccoglievano transitando sul mare. Questo meccanismo favorì lo sviluppo di notevoli ghiacciai anche sull'Appennino (fig. 9).

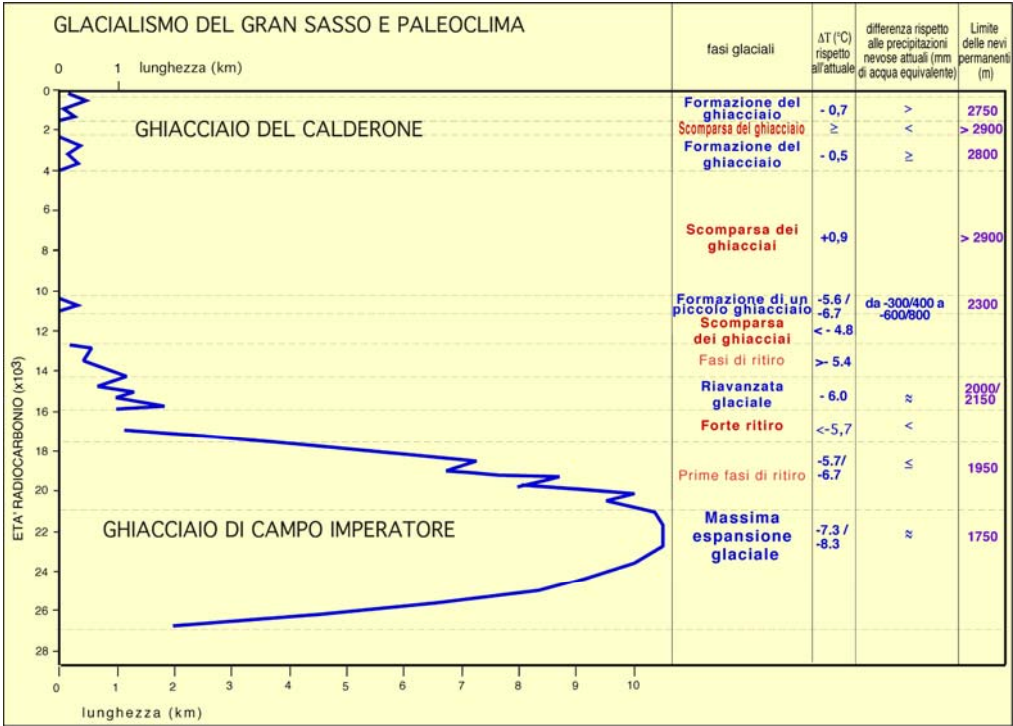
Alla fine dell'ultima glaciazione, con il ritorno della circolazione atmosferica alla situazione pre-glaciale, le tendenze del clima sulle due sponde del Mediterraneo tornarono ad essere abbastanza simili.

Nel corso della prima parte dell'Olocene (ultimi 10mila anni) la temperatura aumentò, raggiungendo valori superiori agli attuali: sulle Alpi i ghiacciai si ritirarono e raggiunsero dimensioni inferiori alle attuali, il ghiacciaio del Calderone, sul Gran Sasso, scomparve, la vegetazione colonizzò aree di alta montagna attualmente interessate da fenomeni glaciali e periglaciali. Ricerche su speleotemi (stalattiti e stalagmiti) costieri confermano tale riscaldamento. Sulle sponde meridionali del Mediterraneo si ebbe un clima meno arido, ma l'incremento delle precipitazioni non fu grande quanto quello che interessò la zona del Sahara posta a Sud della latitudine di circa 24-25°N. In tale periodo l'aumento di livello del mare fu molto veloce a causa dello scioglimento delle principali calotte glaciali.

mediterranea (<http://visibleearth.nasa.gov/>)



Figura 9 - Dati paleoclimatici del Gran Sasso a partire dall'Ultimo Massimo Glaciale (28mila anni). Sono rappresentate le dimensioni del ghiacciaio di Campo Imperatore e del Calderone, le variazioni del limite delle nevi, le variazioni di temperatura e la differenze nelle quantità di precipitazioni rispetto all'attuale. (da Giraudi & Frezzotti, 1997, modificato)



La forte aridificazione verificatesi nel Nord Africa durante l'ultimo massimo glaciale e l'inizio del periodo olocenico può avere determinato l'aumento di apporto eolico nei siti dell'Italia peninsulare. Attorno a 5000 anni fa, le condizioni climatiche mutarono nuovamente. Sulla sponda settentrionale il clima subì una inversione di tendenza, le temperature cominciarono ad abbassarsi e si verificò un'alternanza di periodi a clima fresco e umido e periodi più caldi e/o aridi (fig. 10).

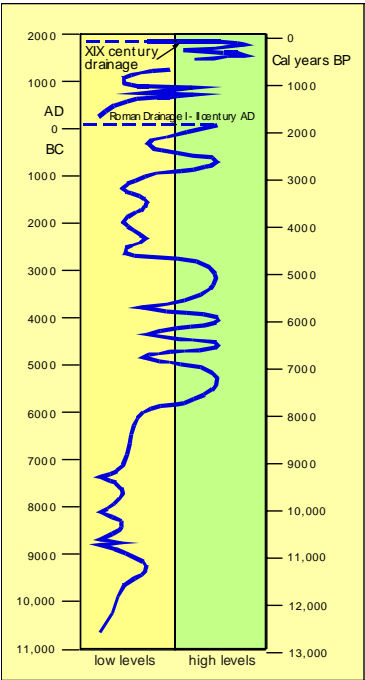


Figura 10 - Oscillazioni di livello del lago del Fucino (Abruzzo) rappresentativo delle condizioni del bilancio idrologico nel corso degli ultimi 11.000 anni. L'acqua del lago raggiungeva i livelli più alti nel corso dei periodi freschi e umidi e diminuiva nei periodi caldi/aridi, (da Giraudi, 1998, modificato)



Variazioni climatiche aventi generalmente la stessa frequenza, si verificarono anche sulla sponda meridionale, ma la tendenza generale del clima portò verso una maggiore aridificazione. Attorno a 4200-4500 anni fa si verificò un periodo di forte aridità anche sulla sponda settentrionale del Mediterraneo collegata, probabilmente, all'arrivo di masse di aria di provenienza Nord-Africana.

Negli ultimi 6000 anni il livello del mare si è stabilizzato poco sotto le quote attuali, ma, in seguito a movimenti isostatici si è relativamente innalzato in maniera molto differenziata con differenze fino a 7 metri tra le coste del Mediterraneo centrale e quelle settentrionali e meridionali. Il livello più alto raggiunto da 30.000 anni al presente è quello odierno (fig. 11).

La forte aridificazione della sponda meridionale del Mediterraneo degli ultimi millenni potrebbe essere dovuta, oltre che a fattori climatici, anche all'eccessivo sfruttamento attuato dalle popolazioni ed alla assenza di interventi volti a sfruttare le scarse risorse idriche.

Sulla sponda settentrionale del Mediterraneo è stato possibile stabilire, anche grazie allo studio delle aree di media e alta montagna, non soggette ad impatto antropico, che vi sono state variazioni climatiche, talora importanti (fig. 12).

Le maggiori variazioni sono avvenute in corrispondenza di:

- due periodi più freschi e umidi (alto medio evo e dal XIV al XIX secolo) nel corso dei quali la temperatura media doveva essere inferiore a quella attuale;
- due periodi più caldi (romano e medievale) nel corso dei quali la temperatura media può avere raggiunto valori superiori agli attuali o mantenuto temperature simili alle attuali per un periodo di tempo piuttosto lungo.

Figura 11 - Le curve di risalita del livello del mare per l'Italia alle diverse latitudini tra 5mila anni ed il presente (da Lambeck et al. 2004)

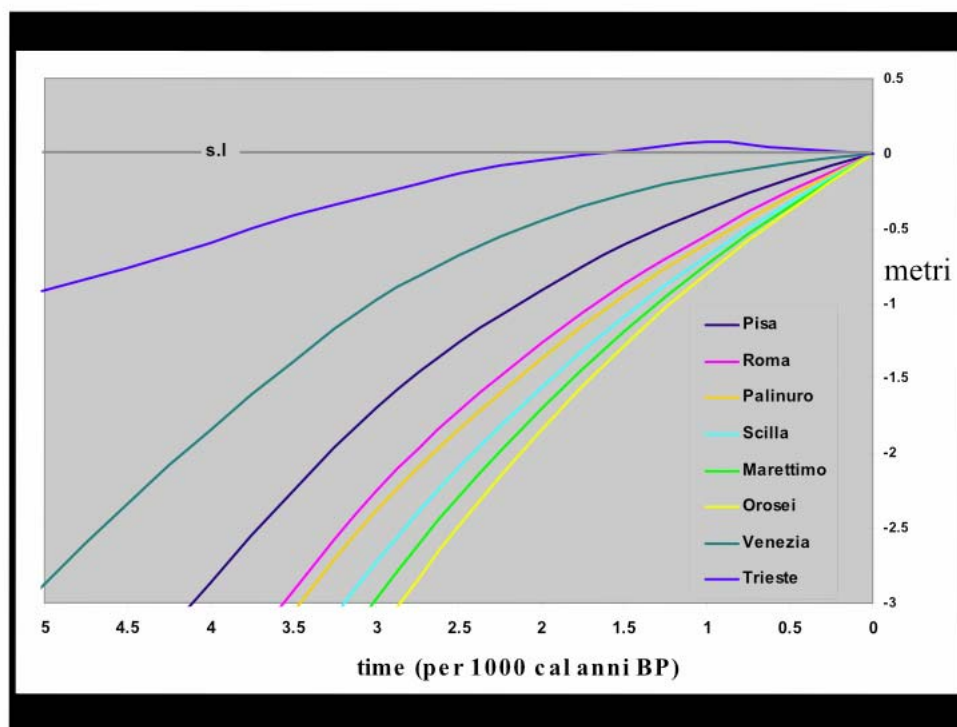
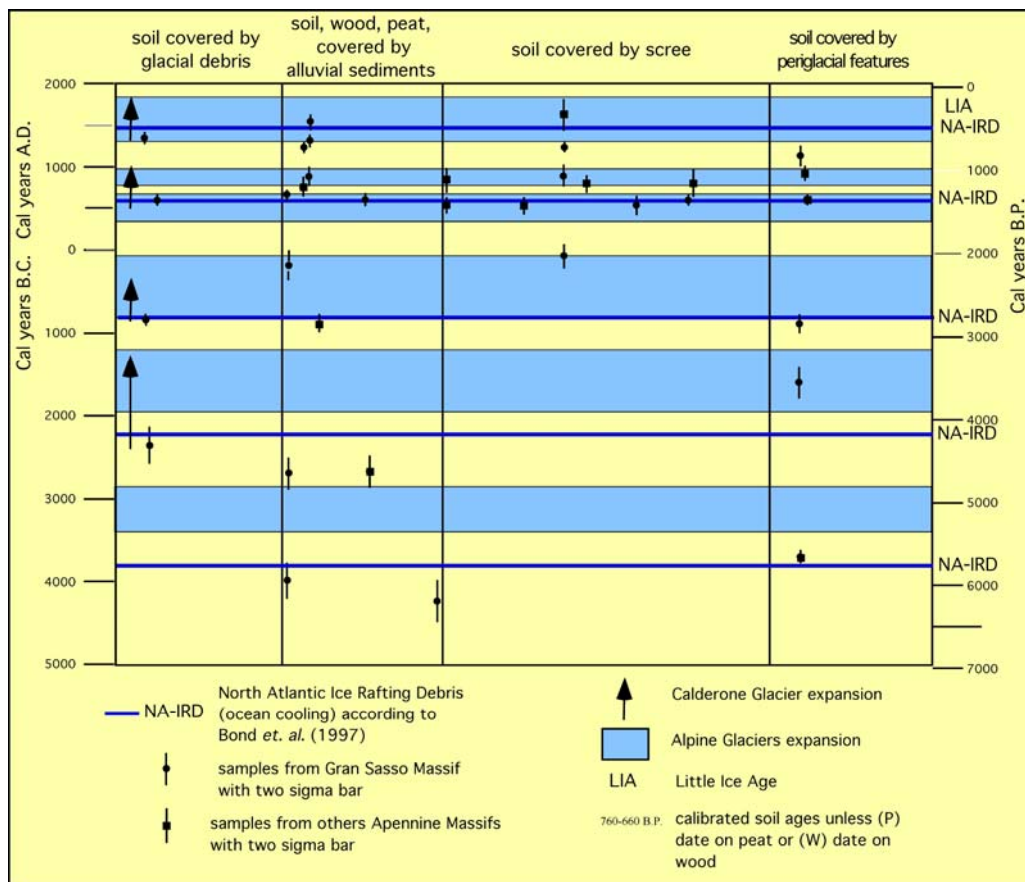


Figura 12 - Modificazioni ambientali che testimoniano il verificarsi di alternanze di climi caldi e fresco/umidi nel corso degli ultimi 7000 anni. Le fasi di avanzata glaciale e di sviluppo di processi periglaciali corrispondono evidentemente a periodi più freschi, mentre le fasi di ritiro e le fasi di sviluppo di suoli ad alta quota corrispondono a periodi più caldi. (da Giraudi, 2005, modificato)



L'ENEA ha utilizzato come marker per le variazioni di temperatura dell'aria e del mare speleotemi campionati in numerose grotte sommerse del mare Tirreno a profondità comprese tra -3 e -49 m ed a scale temporali tra 215mila anni ed il presente (figure 13 e 14). Per quanto riguarda le recenti variazioni di livello del mare ha utilizzato numerosi marker ambientali (reef a vermetidi, serpulidi concrezionati su speleotemi sommersi, solchi di battente), ma soprattutto reperti archeologici oggi sommersi studiati e misurati su tutte le coste di mari Italiani. In particolare le misure delle piscine di allevamento di pesci di età romana Imperiale (2000 anni fa) rinvenute tra i -180 e i -120 cm sotto il livello attuale del mare hanno consentito la convalida del modello isostatico delle coste italiane.

### 1.6 Monitoraggio del Mar Mediterraneo

Negli ultimi anni sono stati osservati cambiamenti significativi delle caratteristiche delle masse d'acqua del Mediterraneo e nella loro circolazione. In generale, negli ultimi 50 anni si è registrata una tendenza all'aumento di temperatura e salinità di alcune masse d'acqua profonde del Mediterraneo Occidentale. Nei primi anni 90 inoltre, le masse d'acqua profonde del Mediterraneo Orientale sono diventate più calde e più salate, probabilmente per i cambiamenti del flusso di calore e di acqua dolce nell'Egeo (Transiente del Mediterraneo Orientale - EMT) che hanno spostato la zona di formazione dall'Adriatico all'Egeo,. In conseguenza di questo cambiamento si sono modificate, rispetto al passato, anche le caratteristiche fisiche e chimiche delle acque intermedie del Mediterraneo Orientale e il segnale del cambiamento ha, negli anni successivi, raggiunto, attraverso gli scambi al Canale di Sicilia, anche il bacino Occidentale.



Figura 13 - A. Variazioni della composizione isotopica dell'ossigeno rappresentativa temperatura del atmosferica negli ultimi 1000 anni misurata utilizzando uno speleotema proveniente dalla Sardegna. Da notare il raffreddamento riscontrato per la piccola età glaciale (LIA), (Antonioli et al., 2005). B. Variazioni della temperatura del mare tra 9000 ed oggi, utilizzando alcuni organismi marini (serpulidi) posati su speleotemi da (Antonioli et al., 2001). C. Variazioni della temperatura atmosferica tra 190 e 140mila anni fa utilizzando uno speleotema sommerso (Bard et al 2004)

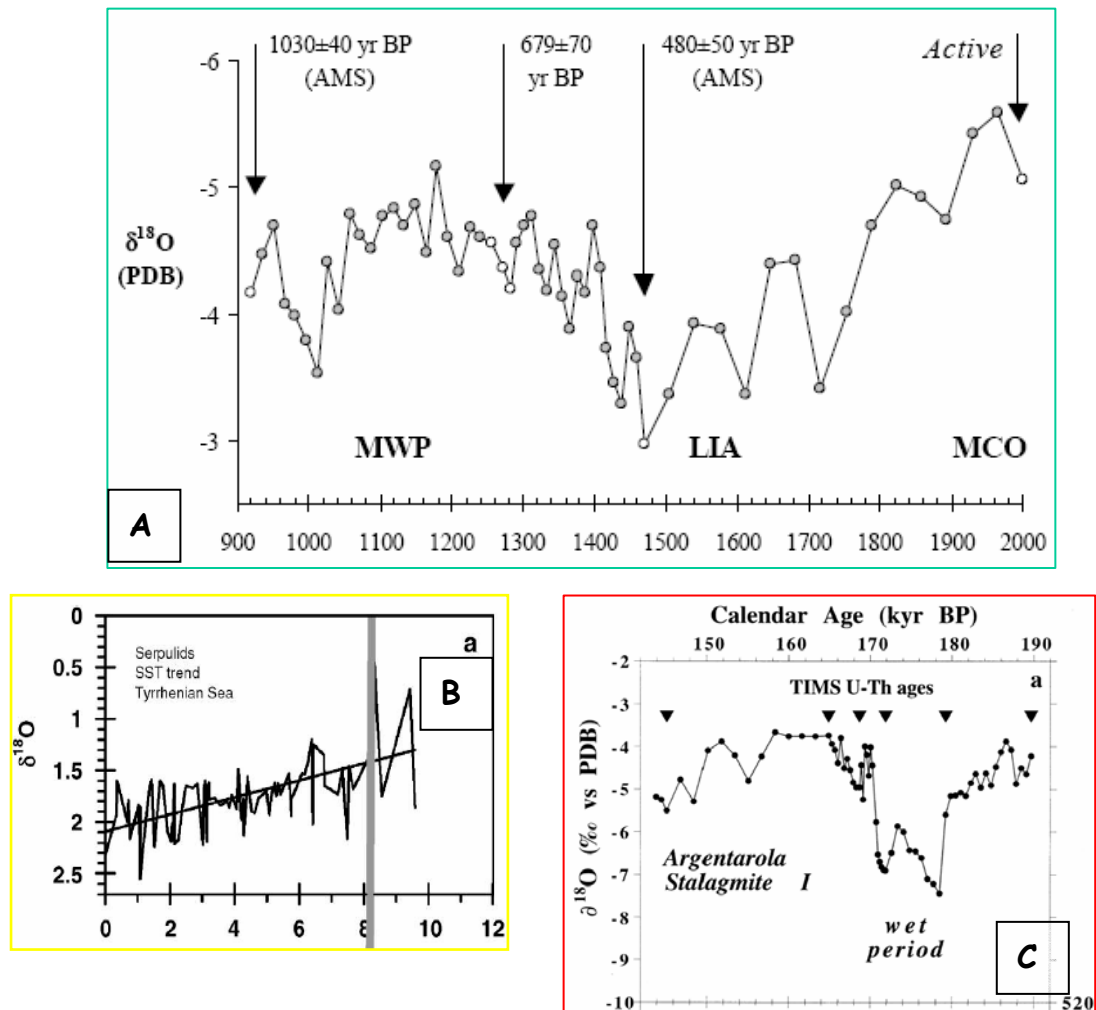


Figura 14 - (A) Misura della profondità della piscina romana di Torre Astura. e (B) degli speleotemi sommersi nella Grotta dell'Argentrola



Per comprendere se e come il Mediterraneo, in uno scenario di cambiamento climatico, potrà continuare a fornire "beni" (turismo, pesca..) e "servizi" (stabilità degli ecosistemi attraverso la conservazione della biodiversità, sequestro di carbonio), è necessario un complesso sistema di osservazioni, di medio e lungo termine, per monitorare il sistema, comprenderne la variabilità naturale ed individuare eventuali "trend" delle proprietà fisiche e chimiche e "shift" nello stato degli ecosistemi. Queste informazioni vengono poi utilizzate per definire il funzionamento del sistema e per validare modelli predittivi.

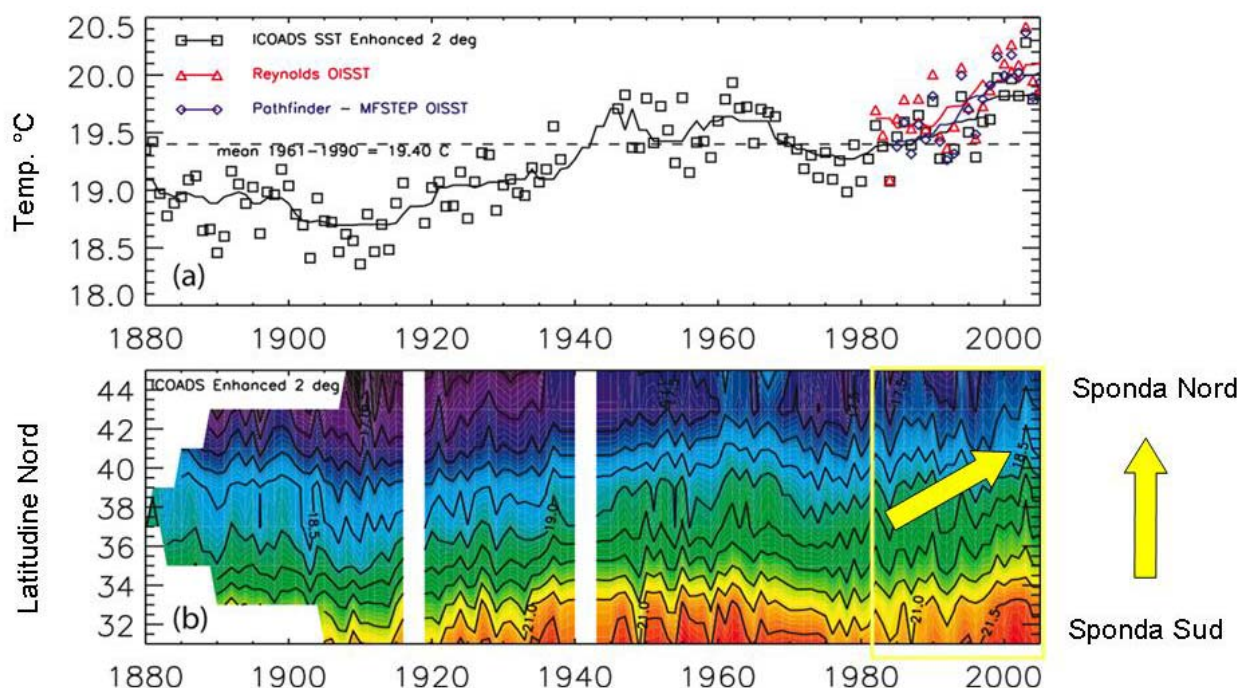
ENEA partecipa da tempo a grandi programmi nazionali ed internazionali nei quali si affrontano queste tematiche. In questo ambito ha raccolto un vasto set di dati derivanti da osservazioni satellitari, campagne oceanografiche e sistemi fissi per misure in situ in continuo. Di seguito sono riportati alcuni esempi.

### *Telerilevamento*

L'attività di telerilevamento del mare è stata sviluppata per lo studio della variabilità stagionale ed interannuale di specifici parametri derivabili da misure satellitari ed in relazione ai processi fisici e biologici più rilevanti per lo studio del clima globale e regionale.

- Temperatura Superficiale del Mare. La misura della temperatura superficiale del mare rappresenta la tecnica più consolidata fra quelle possibili con quelle con il telerilevamento, sia per la precisione raggiunta dai metodi di stima (ormai del tutto analoga se non migliore di quella corrispondente in situ) sia per la disponibilità di dati, ormai superiore al ventennio. Parallelamente, ed in collaborazione con altri laboratori nazionali ed internazionali, sono stati messi a punto nuovi metodi di analisi ed implementati sistemi utilizzabili per applicazioni di modellistica numerica della circolazione marina. A tal fine è stata sviluppata una banca dati di SST (Sea Surface Temperature) consultabile via internet (<http://clima.casaccia.enea.it/sst/>). L'analisi dell'andamento della temperatura superficiale del mare nel Mediterraneo (fig. 15) ha permesso di valutare quantitativamente il trend positivo della temperatura negli ultimi 20-25 anni e di validare le misure in situ disponibili al fine di valutarne la capacità di descrivere gli andamenti negli ultimi 120-130 anni a partire dal 1880. Questo lavoro servirà come base per la valutazione dei cambiamenti climatici recenti e della variabilità pluridecadale.
- Stima del vento. È stata effettuata una valutazione della qualità dei differenti data sets di vento disponibili nella prospettiva del loro utilizzo come forzanti dei modelli oceanografici. In particolare si sono valutati gli errori in base all'analisi dei modelli di circolazione atmosferica a scala globale (ECMWF o NCEP) e dati in situ. È risultato che le stime satellitari (misure scatterometriche) sono di gran lunga le migliori disponibili. Questo ha aperto la strada per lo sviluppo di prodotti cosiddetti "blended" dove la precisione delle misure satellitari con copertura non sempre continuativa ed omogenea vengono combinate con le stime dei modelli meno precise ma ovviamente omogeneamente distribuite nello spazio e nel tempo.
- Studi tropicali Per quanto riguarda gli studi nelle aree tropicali atlantiche effettuati nell'ambito del progetto europeo AMMA sono stati valutati gli scambi di calore aria-mare combinando in maniera ottimale dati satellitari e stime di modelli. Attualmente si sta sviluppando un'ulteriore attività di ricerca per inserire nel sistema anche le stime di insolazione derivabili dalle misure MSG (Meteosat Second Generation).

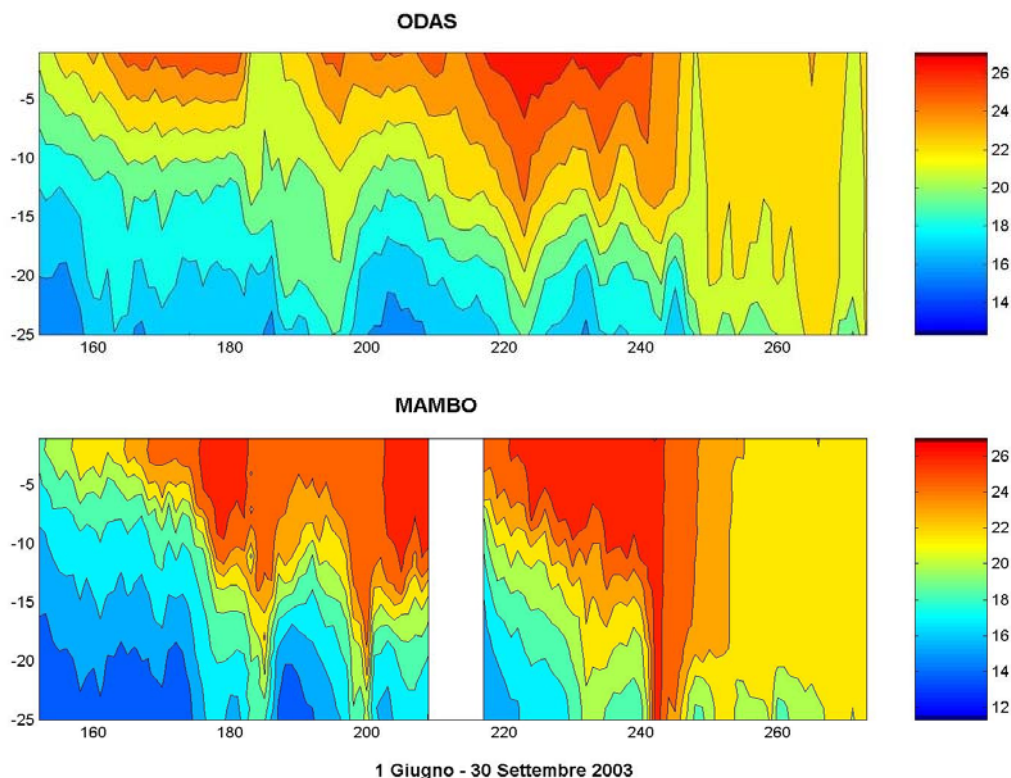
Figura 15 - Andamento della temperatura superficiale del Mar Mediterraneo negli ultimi 125 anni (a) e per fasce di latitudine (b)



#### *Misure in continuo da postazioni fisse*

A completare i sistemi di monitoraggio a lungo termine del Mediterraneo, da qualche anno sono operative boe oceanografiche corredate da ormeggi per le misure a maggiori profondità, che forniscono osservazioni meteorologiche e marine in continuo. In particolare nel Mar Ligure la boa-laboratorio d'altura (ODAS ITALIA 1 del CNR, con strumentazione ENEA accoppiata) situata al centro del bacino e la boa per il monitoraggio costiero (Monitoraggio AMBientale Operativo, gestita da ENEA) situata nella costa orientale nel Parco Marino delle Cinque Terre, formano un sistema integrato di osservazioni. Tale sistema, oltre a fornire lunghe serie di dati fisici nello strato superficiale della colonna d'acqua, permette di affrontare studi di interazione aria-mare volti anche a migliorare i risultati ottenuti con le simulazioni tramite modelli climatici da applicare al Mediterraneo e a validare le misure satellitari. Tra i recenti risultati ottenuti grazie alla disponibilità di questa rete di osservazione va menzionato lo studio compiuto durante l'episodio di anomalo riscaldamento estivo del 2003 (fig. 16) che ha interessato gran parte dell'Europa e dell'area mediterranea. Osservazioni satellitari avevano rilevato un aumento significativo (in alcune aree superiore ai 4°C) della temperatura superficiale del mare su estese aree del Mediterraneo. Questo aveva destato preoccupazione sia per i possibili effetti meteorologici dovuti al successivo rilascio in atmosfera di una grande quantità di calore accumulata dalla massa d'acqua sia per gli effetti immediati sugli ecosistemi costieri sulle comunità biologiche di pregio, particolarmente sensibili a forti aumenti di temperatura. L'anomalia termica ha effettivamente avuto impatti negativi su alcune comunità di organismi marini, già provate dall'analogo evento del 1999, ma i temuti effetti meteorologici non si sono riscontrati. Un'analisi dettagliata dell'evoluzione delle condizioni meteorologiche ed oceanografiche dell'area ed il confronto con situazioni passate ha permesso di seguire l'evoluzione del fenomeno e comprenderne i meccanismi. Si è osservato infatti che, nonostante l'anomalia termica registrata in superficie, il calore accumulato nella colonna d'acqua non è stato superiore a quello degli anni passati.

Figura 16 - Le figure mostrano l'evoluzione della temperatura del mare registrate dalla boa costiera (MAMBO) e da quella in mare aperto (ODAS). Si può osservare come le zone costiere di acqua bassa, non potendo disperdere il calore negli strati più profondi ed essendo soggette ad un minor rimescolamento dovuto al vento, si riscaldino maggiormente rispetto al mare aperto (Sparnocchia et al., 2006)



La prolungata assenza di vento ha infatti impedito il rimescolamento dell'acqua con gli strati sottostanti, confinando l'accumulo di calore in un sottile strato superficiale. Al primo episodio di vento intenso, verificatosi a fine Agosto, l'equilibrio stabilitosi nella colonna d'acqua è venuto meno e il calore si è propagato a maggiori profondità, ristabilendo la situazione nella norma.

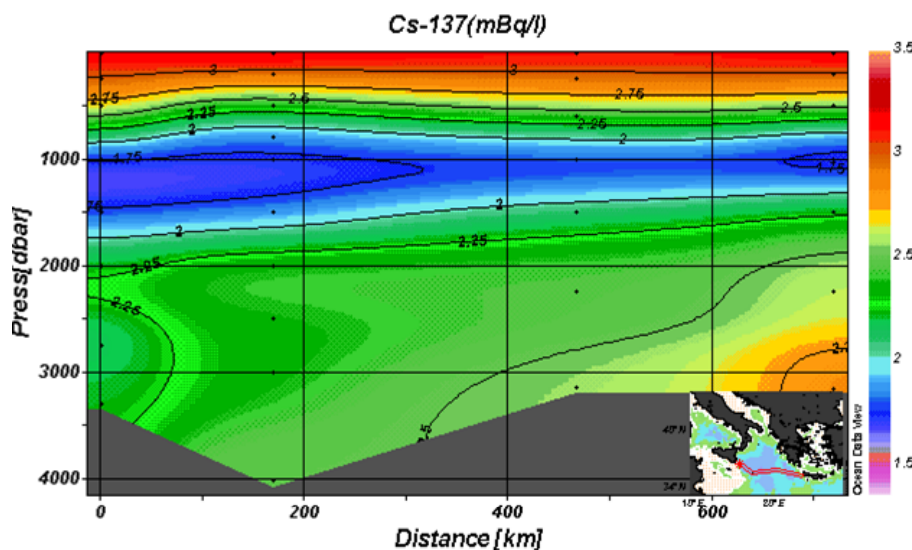
#### *Studi in aree-chiave*

Una larga parte degli studi in campo ha riguardato le masse d'acqua profonde del Mediterraneo Orientale (Transiente del Mediterraneo Orientale-EMT). In particolare, negli anni 90 ENEA ha contribuito agli studi sull'EMT nel Mediterraneo Orientale e nell'Egeo con misure di traccianti radioattivi (Cesio 137) presenti nell'ambiente per seguire i processi di formazione e "dispersione" delle masse d'acqua (fig. 17). In particolare, l'ENEA ha contribuito a definire l'importanza relativa delle diverse aree di dispersione di acque dense, evidenziando come le acque profonde dell'Adriatico Meridionale non siano state ricambiate nel periodo 1987-1999 e tracciando il percorso delle nuove acque profonde di origine Egea nel Mar Ionio e nel Levantino.

ENEA ha inoltre coordinato negli anni successivi il programma "Ambiente Mediterraneo" del MIUR, nell'ambito del quale ha iniziato nel 1999 a corredare e ampliare la serie storica di dati fisici e di corrente, acquisita dal CNR alla soglia occidentale del Canale di Sicilia, con dati chimici. Sempre in collaborazione con CNR, dal 1999 vengono periodicamente svolte campagne oceanografiche lungo transetti-chiave nel Mediterraneo Occidentale per determinare la variabilità delle caratteristiche delle masse d'acqua, i flussi biogeochimici tra sottobacini e gli effetti della propagazione del segnale del Transiente del Mediterraneo Orientale.



Figura 17 - Distribuzione del  $^{137}\text{Cs}$  (Cesio) nella colonna d'acqua del Mar Ionio lungo un transetto tra la Sicilia e Creta (1999): concentrazioni più elevate nei pressi di Creta indicano l'intrusione di acqua densa recente proveniente dall'Egeo (in arancione in basso a destra nella figura) che si posiziona al di sotto della vecchia acqua di origine Adriatica, caratterizzata da basse concentrazioni di tracciante (Delfanti et al., 2003)



I dati raccolti mostrano che, a seguito dei cambiamenti indotti dal Transiente, le acque attualmente provenienti dal Canale di Sicilia ed in ingresso nel Tirreno sono caratterizzate da concentrazioni di nutrienti superiori a quelle dei primi anni novanta e che anche le acque intermedie in uscita dal Tirreno sono più ricche di nutrienti nel 2005 che nel 1995. Le implicazioni di questi cambiamenti sul sistema biogeochimico non sono ancora chiari e sono oggetto di studi in corso. La Figura 18 mostra, a titolo di esempio, la distribuzione dei nitrati lungo una sezione tra la Sardegna e la Sicilia nel 2005.

Ma gli effetti del transiente cominciano ora ad essere evidenti non solo nel Mar Tirreno, che riceve, attraverso il Canale di Sicilia, un input diretto dal Mediterraneo Orientale, ma anche in tutto il bacino più occidentale del Mediterraneo.

Figura 18 - Concentrazione di nitrati nella colonna d'acqua lungo il transetto tra Sardegna e Sicilia, 2005. Le acque intermedie uscenti dal Tirreno sono indicate dal rettangolo tratteggiato

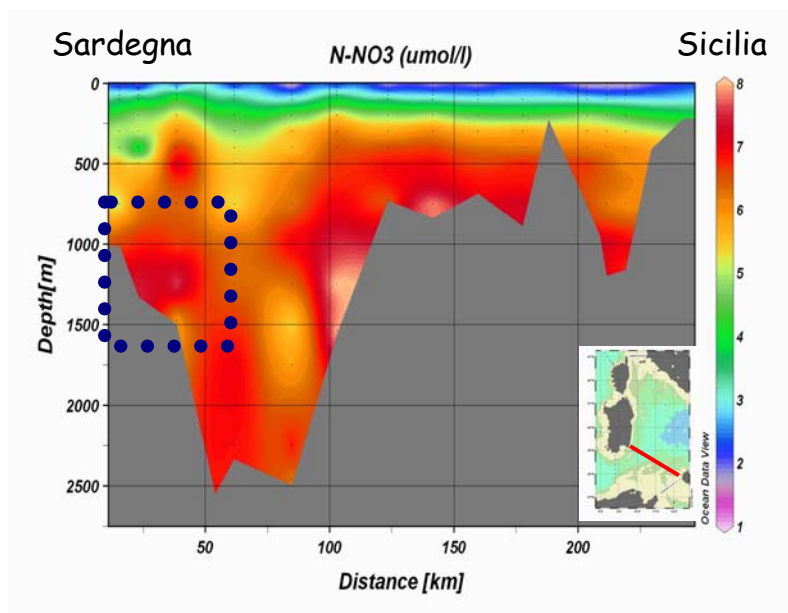
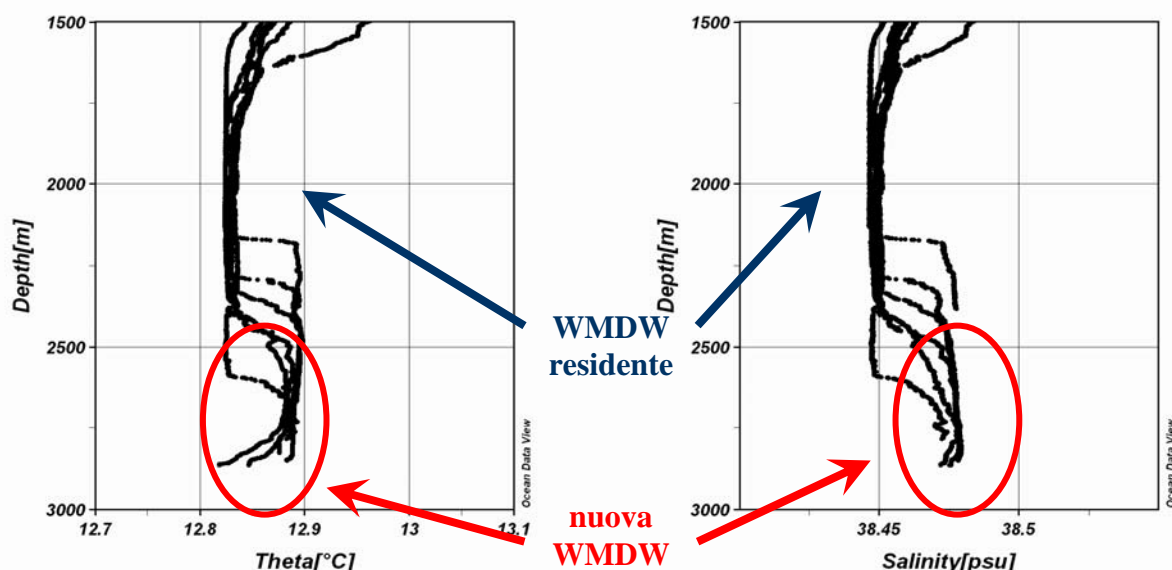


Figura 19 - Profili verticali di temperatura (Theta) e salinità della West Mediterranean Deep Water (WMDW) lungo il transetto Baleari - Sardegna, Maggio 2005 (Schröder et al., 2006)



I dati raccolti nel 2005 mostrano che nell'inverno 2004/2005 nel Mediterraneo Nord Occidentale si sono formate acque dense caratterizzate da valori di salinità, temperatura e densità più elevati sia rispetto alle acque profonde residenti, sia rispetto a dati storici (fig. 19).

La formazione di acque dense più calde e più salate è probabilmente in relazione con l'arrivo del Golfo di Leone di acque intermedie più salate e più calde provenienti dal Mediterraneo Orientale, effetto che si sovrappone ed amplifica il trend già osservato in passato. Le condizioni particolarmente rigide dell'inverno 2004/2005 hanno poi causato un'intensa produzione di acqua densa con queste nuove caratteristiche, che sono state osservate nel Mar Ligure, Mar delle Baleari, Bacino Algero-Provenzale e parte settentrionale del Bacino Algerino. Le acque di neoformazione sono anche caratterizzate da concentrazioni di nutrienti minori rispetto alla vecchia acqua residente. Questo fenomeno può, su lungo periodo, avere influenza sul ciclo biologico del Mediterraneo occidentale, diminuendo la sua produttività.

#### Il Mediterraneo, fonte o pozzo di Carbonio?

Gli oceani rappresentano complessivamente il maggiore pozzo (sink) di  $CO_2$ . Si stima che assorbano dal 20% al 40% di tutta la  $CO_2$  annualmente emessa in relazione ad attività antropiche, ritardando quindi il riscaldamento globale. Ma l'incertezza relativa a questo dato è elevata e per una realistica simulazione climatica, è necessario ridurla drasticamente. Il comportamento di regioni oceaniche come "fonti" o "sink" di  $CO_2$  dipende da una serie di fattori e processi chimici, fisici e biologici e dalla loro interazione. La  $CO_2$  scambiata con l'atmosfera viene trasportata dalle correnti e può essere trasferita in profondità attraverso i meccanismi di formazione di acque intermedie e profonde. Ma può anche essere utilizzata dal fitoplancton e trasformata in materia organica attraverso la fotosintesi e trasferita attraverso la catena trofica o verso il mare profondo, come detrito organico. La distribuzione del fitoplancton e l'entità della produzione primaria sono definite dalla disponibilità di luce e nutrienti, a loro volta regolata dai processi di circolazione, dalla dinamica dello strato superficiale rimescolato degli oceani, dall'upwelling e dalla deposizione di polveri atmosferiche. Come risultato di tutti questi processi, la distribuzione del carbonio in ambiente marino è molto irregolare e varia in maniera considerevole nello spazio e nel tempo, cosa che rende oltremodo complicata una stima accurata del sink oceanico.



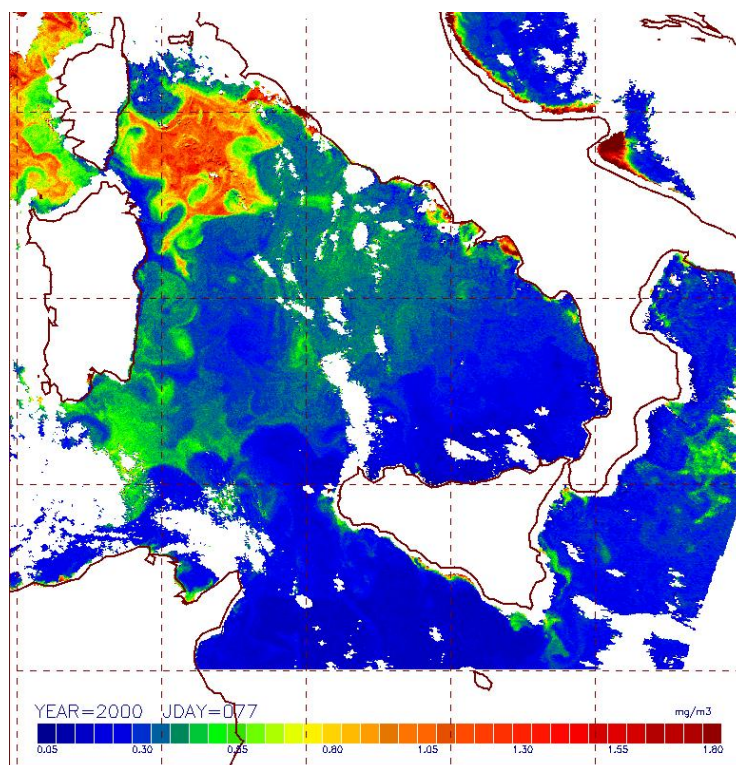
Per ridurre le incertezze sul sink di carbonio è necessario disporre di sistemi di osservazioni e modelli che permettano di individuare i meccanismi di funzionamento degli ecosistemi e di predire la loro risposta ai cambiamenti, che strettamente condiziona la capacità degli oceani di stoccare  $CO_2$ .

ENEA è principalmente impegnato nella definizione del funzionamento della "pompa biologica" (fissazione di carbonio da parte del fitoplancton e sua rimozione dagli strati superficiali del mare) negli ambienti pelagici del Mediterraneo, attraverso l'analisi di osservazioni in situ e da satellite e lo sviluppo ed implementazione di modelli biogeochimici.

Le misure satellitari del "colore del mare" offrono un mezzo molto potente per produrre stime quantitative della concentrazione di clorofilla (legata alla biomassa fitoplanctonica) e della produzione primaria a grande scala e della loro variabilità spaziale e temporale.

La disponibilità di sensori che operano nella banda del visibile ha aperto, negli ultimi anni, la possibilità di effettuare studi sulla variabilità a mesoscala e sulle relazioni fra dinamica del mare e produttività primaria nell'oceano. La produzione fitoplanctonica, primo anello della catena alimentare, è strettamente legata all'attività a mesoscala. Infatti le velocità superficiali variabili forzano la redistribuzione degli organismi planktonici e contribuiscono a modificare il loro ambiente. Questa redistribuzione provoca a sua volta variazioni dei parametri fotosintetici, della composizione delle specie e della disponibilità di nutrienti. In questo ambito l'attività dell'ENEA è stata inizialmente focalizzata sull'analisi delle serie temporali in relazione a campagne di misura effettuate con tecniche tradizionali. In una fase successiva lo sforzo investigativo è stato indirizzato allo studio degli effetti legati alla variazione interannuale dei forzanti atmosferici sulla produzione di biomassa. Questo studio è stato sviluppato mediante l'uso integrato di dati satellitari di colore del mare (fig. 20) e di modelli biogeochimici accoppiati con modelli fisici. In questa fase le stime satellitari di concentrazione di clorofilla sono state utilizzate per adattare il modello accoppiato alle caratteristiche peculiari delle regioni in esame.

Figura 20 - Un esempio di elaborazione di dati dal satellite SEAWIFS: mappa della concentrazione superficiale di clorofilla nel Mar Tirreno, Marzo 2000. È evidente un'intensa fioritura fitoplanctonica in presso le Bocche di Bonifacio

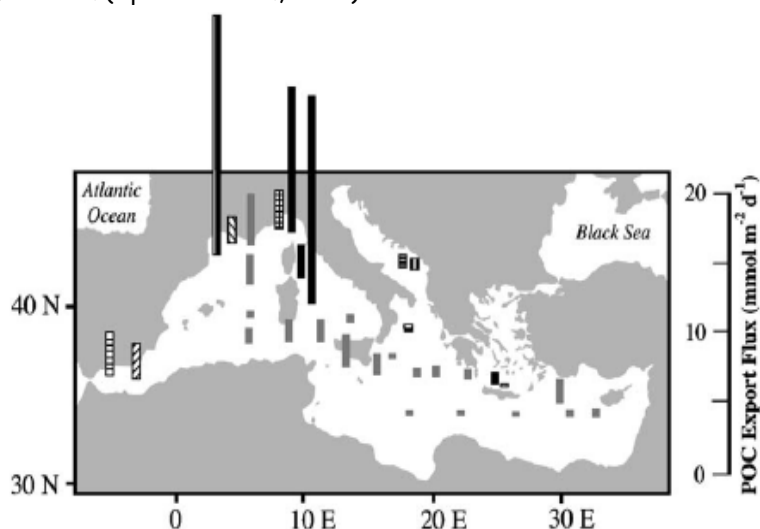


Attualmente si stanno per sperimentare nuove parametrizzazioni per le equazioni di stato del comparto ecologico valutando, essenzialmente, la possibilità di evolvere dal presente modello a 5 comparti ad un modello a 7 comparti più adeguato a descrivere l'evoluzione delle fioriture fitoplanctoniche sia in termini di "timing" che di intensità. Inoltre le misure satellitari non verranno utilizzate come semplice riferimento a cui far tendere le soluzioni numeriche ma verranno direttamente usate dal modello. In particolare si inizierà con inserire direttamente le stime satellitari di attenuazione della luce a 490 nm ( $k_{490}$ ) e la stima della PAR (Photosynthetically Available Radiation) incidente (la parte, in termini di lunghezze d'onda, di insolazione utile per la fotosintesi clorofilliana). Tutti questi sforzi sono finalizzati a contribuire alla sia alla comprensione del ciclo del  $CO_2$  nel Mediterraneo in relazione alla produzione primaria e secondaria sia a fornire una caratterizzazione modellistica dell'ecosistema marino allo scopo di valutarne la sua sensibilità ai cambiamenti climatici.

Solo una parte del carbonio fissato dal fitoplancton attraverso la produzione primaria è trasferito poi come detrito verso gli strati profondi del mare e quindi sottratto per lungo tempo al contatto con l'atmosfera. I flussi verticali di carbonio sono caratterizzati da un'ampia variabilità spaziale e temporale. Attualmente in Mediterraneo esiste una sola stazione permanente "DYFAMED" (Mar Ligure occidentale, Programma Joint Global Ocean Flux Study Francese), dotata di "trappole intercettatrici di sedimento", che permettono una stima della variabilità stagionale ed interannuale dei flussi di carbonio in questa posizione. ENEA ha contribuito recentemente alla definizione della variabilità spaziale dell'export di carbonio nel Mediterraneo Occidentale, con campagne che hanno interessato nel 2004-2005 l'area Mar Tirreno-Mediterraneo Occidentale (fig. 21). Nell'Ambito del Progetto FISIR-VECTOR è poi iniziata, nel 2006, l'acquisizione di serie temporali di dati in due aree-chiave, con differenti caratteristiche trofiche, l'Adriatico Meridionale ed il Tirreno Meridionale, con l'obiettivo di fornire informazioni sui meccanismi che controllano la variabilità stagionale ed interannuale di questi flussi.

Bisogna infine ricordare che le aree marine costiere partecipano in modo rilevante ai processi di sequestro di  $CO_2$  e di produzione carbonatica degli organismi che vivono sui fondali marini (comparto bentico). È stato stimato infatti che organismi del benthos, che vivono permanentemente fissi al fondale, trasformino la  $CO_2$  nelle loro strutture scheletriche di carbonato di calcio, contribuendo per circa il 50% agli stock carbonatici. La produzione carbonatica nelle aree costiere superficiali è stimata mediamente attorno ai  $150 \text{ g Carbonato di calcio (CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1})$ , ma con valori massimi dell'ordine dei  $2\text{-}3 \text{ kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{y}^{-1}$ , e quindi dello stesso ordine di grandezza dei 'coral reefs' tropicali.

Figura 21 - Flussi di carbonio organico particolato nel Mediterraneo. In nero, i dati di uno studio Università di Rhode Island, ENEA e HCMR Atene. (Speicher et al., 2006)



### *Il sistema biologico marino costiero - Valutazione del cambiamento negli ecosistemi bentici costieri*

Il biota marino mediterraneo è caratterizzato da un elevato grado di diversità, determinato essenzialmente dall'eterogeneità dal punto di vista biogeografico della flora e della fauna presenti. C'è un forte consenso scientifico sul fatto che gli ecosistemi marini costieri, insieme ai beni e ai servizi che forniscono, siano minacciati dal cambiamento climatico in atto. Le fluttuazioni e il cambiamento climatico, infatti, influenzano in modo significativo gli ecosistemi marini ed in particolare la biodiversità. Gli effetti possono essere individuati a livello di singoli organismi, di popolazioni, di comunità e di ecosistema e si esprimono attraverso il cambio nella taglia delle popolazioni e nella distribuzione di specie, nell'alterazione della composizione specifica e dell'estensione geografica degli habitats e degli ecosistemi, come nell'aumento del tasso di estinzione delle specie.

Comprendere i meccanismi e i processi attraverso i quali i cambiamenti possono influenzare la biodiversità marina è un aspetto essenziale sul quale gli ecologi e i biologi stanno lavorando da anni, anche nel tentativo di individuare i cambiamenti insiti nella variabilità naturale degli ecosistemi. Mettere in relazione la variazione climatica con il cambiamento nella struttura dei popolamenti e delle comunità non è sempre facile, anche perché spesso l'impatto antropico e i cambiamenti climatici possono combinare i loro effetti sulla biodiversità marina. L'analisi e la stima degli effetti del cambiamento sono particolarmente importanti nelle aree costiere dove le ripercussioni sono più evidenti, soprattutto a livello economico (diminuzione della pesca, regressione dei litorali, perdita e frammentazione di habitat).

A tale proposito, l'ENEA ha condotto negli ultimi 20 anni studi sulle caratteristiche compositive e distributive di comunità bentiche ad elevato grado di diversità (praterie a *Posidonia oceanica*, comunità coralligene) con particolare attenzione alle aree costiere ad elevato valore naturalistico e socio-economico (aree marine protette, siti di interesse comunitario) o in aree prossime a confini biogeografici. Come descrittori della biodiversità e delle sue alterazioni sono stati prevalentemente indagati gli organismi e le comunità appartenenti al bentos marino, in quanto vivendo fissi al substrato non sono in grado di spostarsi in risposta ad eventuali cambiamenti drastici o repentini, e sono adattati quindi a condizioni medie locali.

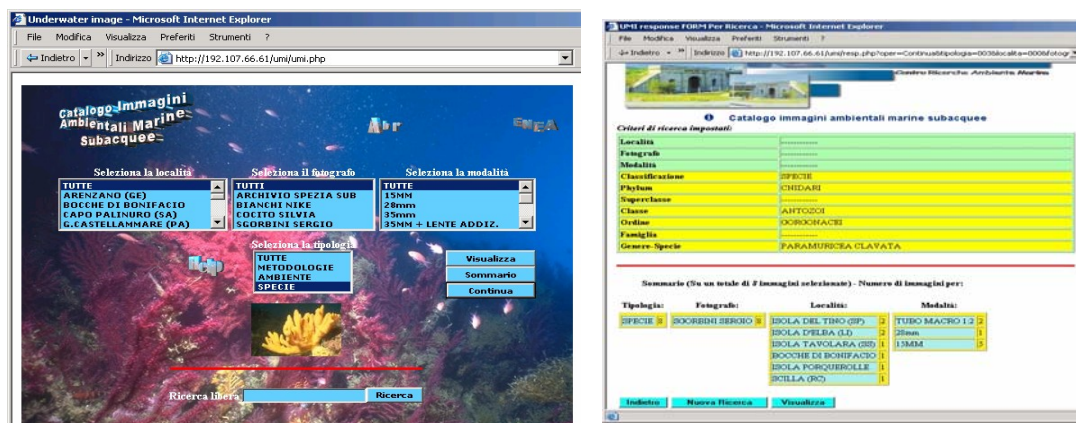
Nel caso delle praterie di *Posidonia oceanica*, specie inclusa nell'UNCED Action Paper (Agenda 21), i risultati hanno dimostrato come l'azione combinata di effetti antropici e variazione climatica ha una influenza negativa sull'ecosistema *in toto*, causando regressione delle spiagge e diminuzione di fauna ittica. Nel Mar Ligure, ad esempio, circa il 30% del suo ricoprimento originale è andato perso nel trentennio '60-'90. L'analisi delle serie decadali di crescita della posidonia hanno dimostrato come per l'area Ligure, che rappresenta una delle porzioni più 'fredde' del Mediterraneo, sia evidente un trend positivo in relazione con i parametri climatici.

Un altro effetto del cambiamento climatico si esplica a livello della fisiologia degli organismi, come prova la ripetuta e sempre più frequente fioritura di *Posidonia oceanica* in Mediterraneo, attribuita da molti autori ad anomalie termiche del periodo estivo. La fioritura è stata monitorata dal 1990 da ENEA sia a scala regionale che a scala di bacino ed analizzata con tecniche genetiche e con modellizzazioni oceanografiche.

Gli studi sulle comunità coralligene e precoralligene hanno messo in evidenza l'importanza, per la dinamica di popolazione di un organismo bentico, di eventi episodici ed imprevedibili, quale quello registrato nell'inverno del 1993 nel Mar Ligure orientale, in cui una mareggiata anomala per intensità e direzione ha causato la mortalità totale della popolazione nei primi dieci metri di profondità e la mortalità parziale a batimetriche superiori. Trattandosi di una specie importante per la strutturazione di una comunità, la cui presenza garantisce riparo e fonte di cibo per altri organismi (84 specie, 13 taxa), l'evento ha provocato una diminuzione della biodiversità nell'area considerata, almeno nel periodo immediatamente successivo l'evento.

Condizioni climatiche ottimali hanno consentito alla microalga *Ostreopsis ovata*, comunemente nota per i mari tropicali, di svilupparsi nel Mediterraneo. La prima fioritura di *Ostreopsis ovata* nel Mar Ligure è stata osservata dall'ENEA nel 1989 nel Golfo di La Spezia. Da allora ne è stata rilevata la presenza in molti siti del litorale ligure e la sua fioritura soprattutto nelle estati 1999, 2003, 2006.

Figura 22 - Banca dati immagini per la classificazione e descrizione della varietà di specie, di ambienti e di metodiche per lo studio dell'area marina Mediterranea  
([www.santateresa.enea.it/wwwste/banchedati/bd\\_ambmar.html](http://www.santateresa.enea.it/wwwste/banchedati/bd_ambmar.html))



Gli studi condotti da ENEA, che si sono basati essenzialmente su metodiche di rilevamento non distruttivo, tra cui il rilevamento video e fotografico, hanno consentito la realizzazione di una banca dati per la raccolta e catalogazione di immagini che descrivono la biodiversità del Mediterraneo illustrando varietà di specie e di ambienti, oltre alle metodiche per il loro studio (fig. 22).

### *Biocostruzione e biodiversità*

L'aumento della  $CO_2$  atmosferica, una delle principali conseguenze del cambiamento indotto dal clima, causa significativi cambiamenti nella chimica dei carbonati delle masse d'acqua, influenzando di conseguenza i tassi di calcificazione degli organismi bentici a scheletro carbonatico. Questi svolgono un ruolo fondamentale nel ciclo del carbonio nell'ambiente marino costiero, in quanto le formazioni bentiche biocostruite possono agire sia come riserve (*reservoir*) che come sistemi di accumulo (*sink*) nel budget del carbonio. Di qui la rilevanza della quantificazione dei processi di calcificazione e l'importanza di ottenere stime che possano servire a prevedere gli effetti del cambiamento climatico sull'attività degli organismi biocostruttori, che rappresentano quindi un possibile feedback negativo all'aumento di temperatura e di  $CO_2$ . Va ancora chiarito se le biocostruzioni possono svolgere una funzione 'tampone' all'acidificazione delle masse d'acqua prodotta dall'aumento di  $CO_2$  e se le stesse alterazioni chimiche possono provocare una riduzione dei tassi di calcificazione degli scheletri degli organismi biocostruiti, come verificato per alcune specie.

L'ENEA studia da anni la dinamica di popolazione, l'ecologia e la distribuzione di alcuni dei più importanti biocostruttori tra le specie sublitorali di area temperata, con approcci metodologici analoghi a quelli adottati in aree extra mediterranee e grazie alla collaborazione con istituti di ricerca italiani e stranieri. Coralli, briozoi, alghe calcaree sono gli organismi studiati come bioindicatori della variabilità termica e climatica. Diverse tipologie ambientali sono state indagate lungo gradienti latitudinali in area Mediterranea ed extra-Mediterranea. I risultati ottenuti hanno permesso di comparare i tassi di crescita, lo stock carbonatico e la produzione carbonatica delle aree mediterranee con quelli prodotti in aree extra mediterranee e di evidenziare che per alcune specie l'ordine di grandezza della produzione carbonatica in area temperata si equivale a quello delle aree tropicali (fig. 23 e tab.2).

Figura 23 - Ricostruzione tridimensionale (3D) di biocostruzioni bentiche per la misura dello stock carbonatico (da Cocito et al., 2003)

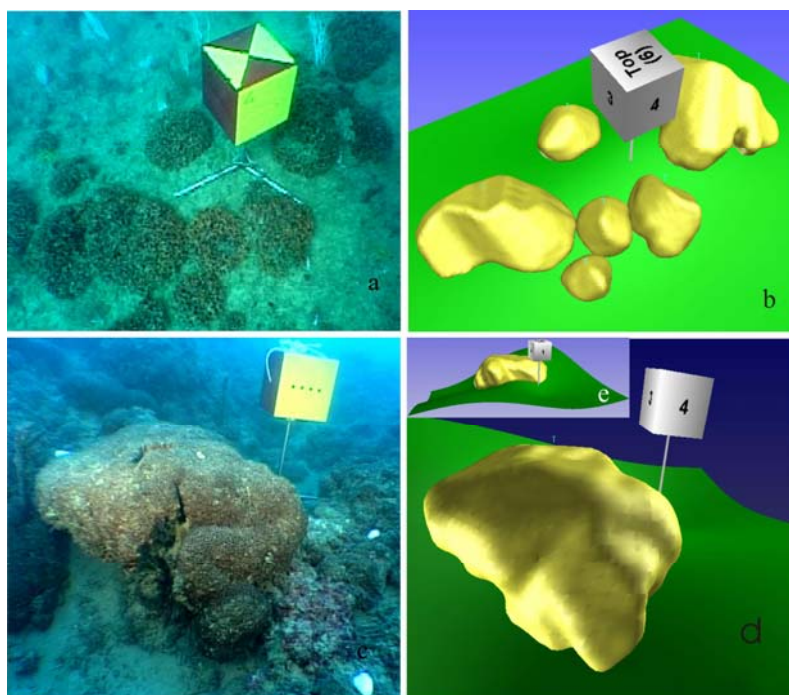


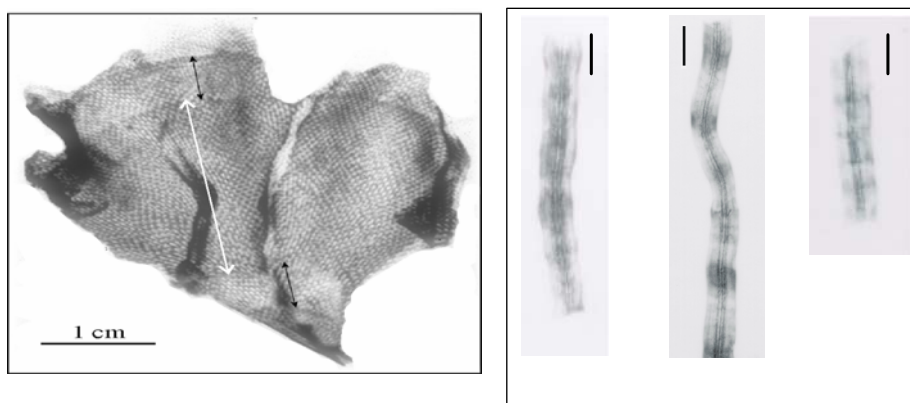
Tabella 2 - Produzione carbonatica ( $\text{kg CaCO}_3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$ ) di organismi bentici nell'area artica, temperata e tropicale (da Peirano et al., 2001 e Cocito et Ferdeghini, 2001)

Produzione carbonatica di organismi bentici (kg CaCO <sub>3</sub> · m <sup>-2</sup> · yr <sup>-1</sup> )					
Regioni Artiche		Regioni Temperate		Regioni Tropicali	
Lithothamnion cf. glaciale and Phymatolithon sp.	0.4 - 1.4	Lithothamnion corallioides	0.08 - 0.9	Porites spp	11.1 - 20.5
		Phymatolyton calcareum	0.08 - 0.4	Porites spp	4.5 - 17
		Lithophyllum incrustans	0.4	Favia pallida	5.9 - 13
		Peyssonellia spp	0.17 - 0.25	Goniastrea retiformis	8.3 - 14.5
		Ficopomatus enigmaticus	6	Pocillopora spp	9.6
		Pentapora fascialis	0.4 - 1.2	Palythoa caribaeorum	0.07
		Cladocora caespitosa	0.004 -12.4	Acropora spp	100
		Ophiotrix fragilis	0.7	Halimeda spp.	10
				Halimeda incrassata	~ 0.05

Per alcuni biocostruttori, in particolare i briozoi, è stata confermata la relazione inversa tra le dimensioni delle singole unità funzionali che compongono gli organismi e la temperatura delle masse d'acqua in cui hanno vissuto. In particolare, la relazione è risultata maggiormente correlata con il range medio annuale di temperatura rispetto alla temperatura media annuale. Queste relazioni forniscono l'opportunità sia di inferire i regimi di temperatura a cui sono stati sottoposti gli organismi durante il loro ciclo vitale, sia di stimare la periodicità della deposizione di carbonato di calcio nelle loro strutture scheletriche in funzione della variabilità stagionale della temperatura (fig. 24).



Figura 24 - Bande carbonatiche a densità variabile, individuate tramite tecniche radiografiche, depositate in relazione alla stagionalità della temperatura delle masse d'acqua in due esemplari di biocostruttori del benthos costiero, a sinistra il briozoo *Pentapora fascialis* (freccia bianca=banda estiva; freccia nera=banda invernale), a destra il corallo *Cladocora caespitosa* (da Lombardi et al., 2006 e Peirano et al., 2004)



I biocostruttori possono essere utilizzati come *proxies* o bioindicatori per indagare trends di temperatura non solo a diverse scale spaziali, ma anche temporali. In tal senso l'ENEA utilizza il corallo *Cladocora caespitosa*, attualmente vivente nel Mediterraneo ma ritrovato anche in giacimenti fossili, per inferire le condizioni termiche delle fasi climatiche più calde (Figg. 25, 26).

Secondo il concetto del '*biological habitat provisioning*', gli ecosistemi biocostruiti, o comunque organizzati attorno a specie strutturanti, sono quelli a più alta biodiversità. Le biocostruzioni sono quindi intesi come 'sistemi risorsa' e conseguentemente il mantenimento di biocostruzione e biodiversità è alla base di criteri ecologici riconosciuti basilari per uno sviluppo ecologicamente sostenibile. Gli organismi che costituiscono i biotopi marini biocostruiti incrementano la biodiversità locale attraverso i meccanismi di crescita, consolidazione, e stabilizzazione, nonché attraverso la cortocircuitazione dei cicli biogeochimici.

Figura 25 - Tasso di crescita di una colonia del corallo vivente *Cladocora caespitosa* (in verde) comparato con l'andamento della temperatura media annuale dell'aria in Liguria (in rosso)

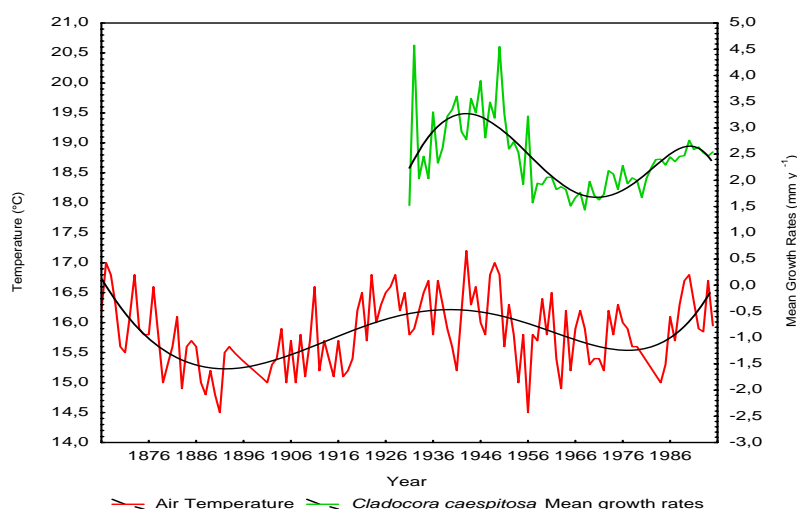
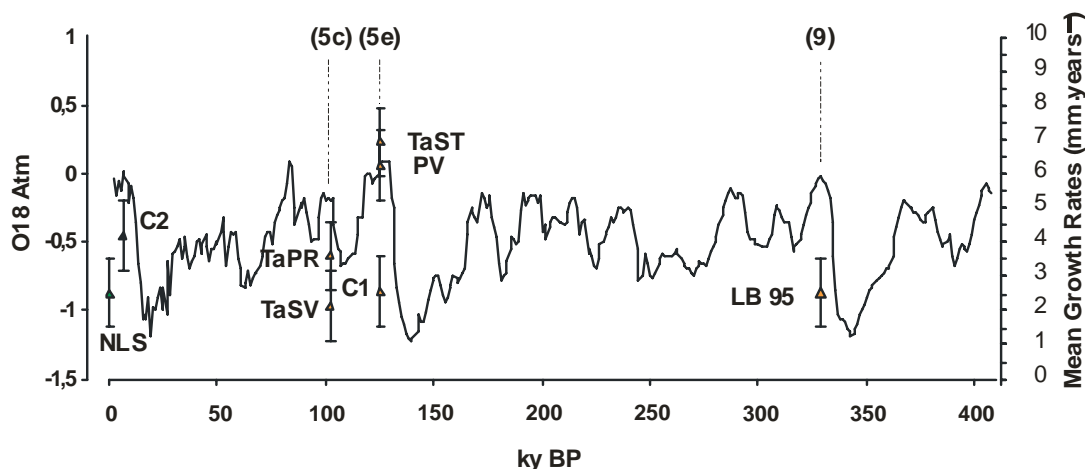


Figura 26 - Confronto tra il tasso di crescita medio dei campioni di *Cladocora caespitosa* viventi (NLS) e il tasso di crescita di campioni da giacimenti fossili italiani (indicati con varie sigle). La curva in nero è la curva isotopica  $\delta O18_{atm}$  di Shackleton. Le fasi calde del Pleistocene e Olocene sono evidenziate dai picchi di  $O18_{atm}$  (da Peirano et al., 2004)



Gli studi dell'ENEA hanno seguito l'approccio analitico che indaga i processi attraverso i quali la biocostruzione genera la biodiversità o in alcuni rari casi deprime la biodiversità. In particolare, è stato confermato il ruolo funzionale della biocostruzione che si esplica attraverso la creazione di habitat e di rifugio per altre specie, l'alterazione delle caratteristiche fisiche dell'ambiente, influenzando le interazioni biotiche, modificando la composizione biotica associata all'aumentare delle dimensioni e della complessità morfologica della biocostruzione. Ad esempio, morfologie semplici, quali le forme incrostanti, ospitano poche specie, mentre biocostruzioni ramificate e tridimensionalmente complesse ospitano anche centinaia di organismi appartenenti a molte specie. Oltre ad individuare i processi attraverso i quali la biocostruzione influenza la biodiversità, è stata analizzata la relazione inversa, cioè come la biodiversità influenza la biocostruzione. È risultato infatti che la composizione del biota associato, sia in termini quantitativi che qualitativi, può risultare determinante ed efficace nel processo

### 1.7 Monitoraggio delle Foreste

Per ciò che riguarda il monitoraggio della vegetazione e delle foreste, le rilevanti modificazioni dell'uso del suolo avvenute su larga scala nei recenti decenni sono spesso causa di alterazioni nelle tipologie di copertura della superficie terrestre (Land Use/Land Cover change - LULC), che influenzano notevolmente i processi fondamentali legati al clima e all'ambiente. A sua volta, la vegetazione costituisce la componente dominante della copertura del suolo e le sue interazioni con l'atmosfera sono importanti fino al punto che la disponibilità di dati aggiornati e dettagliati sulla copertura di vegetazione risulta un requisito fondamentale sia per la predisposizione di efficaci modelli climatici sia per la verifica dei risultati da essi stessi generati. Infatti, gran parte della modellistica numerica già sviluppata è fortemente dipendente dalla disponibilità a varie scale di dati aggiornati sul LULC e sulle distribuzioni di vari parametri biofisici della vegetazione (Leaf Area Index-LAI, biomassa, Fraction of Photosynthetic Absorbed Radiation-FPAR).

A livello nazionale e del bacino Mediterraneo, sono state sviluppate da ENEA metodologie di studio che, utilizzando immagini rilevate da satelliti con sensori a risoluzione sia media (MERIS, AVHRR, MODIS) che alta (Landsat-5 TM/ETM, ERS-1/2 SAR, IKONOS), hanno permesso di produrre mappe tematiche relative a numerosi aspetti della vegetazione, fra i quali le associazioni vegetali e la loro biomassa, la biomassa erbacea e l'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Inoltre anche per la calibrazione dei metodi e per la verifica delle accuratezze dei risultati ottenuti sono state effettuate campagne di rilievi a terra di grandezze e parametri di specifico interesse, ricorrendo al supporto di immagini aerospaziali ad altissima risoluzione geometrica (IKONOS, Quick-Bird).

Un ulteriore esempio di applicazione dei sistemi di osservazione aerospaziale della Terra ha riguardato lo studio dei fenomeni di siccità, che risultano particolarmente accentuati in alcune zone dell'Italia meridionale e fortemente influenzati dai cambiamenti climatici. Lo studio è stato condotto con l'impiego di immagini a diversa risoluzione spaziale e spettrale, acquisite da molteplici sensori aerospaziali, ed elaborate per ottenere stime quantitative di parametri biofisici della vegetazione, quali il LAI (fig. 27), la biomassa e il contenuto idrico.

Tali parametri d'interesse sono fortemente legati allo stress idrico e sono stati misurati a campione durante campagne di calibrazione a terra pianificate anche per l'acquisizione delle firme spettrali della vegetazione, necessarie per ottenere la completa caratterizzazione del suo comportamento radiometrico e della sua influenza sui processi di degrado del suolo. Lo studio è pervenuto anche ad una intercomparazione dei differenti sensori di ripresa delle immagini utilizzati, verificandone la rispettiva efficacia quale strumento per il monitoraggio operativo.

L'ENEA ha inoltre condotto uno specifico progetto per valutare l'andamento dell'estensione delle aree boschive in Italia mediante rilevamenti satellitari, effettuati nel corso degli ultimi venti anni, dai sensori AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), montati a bordo dei satelliti americani NOAA.

Per ciascuno dei mesi a partire dal 1986 sono state elaborate decine di riprese ed i risultati sono stati sintetizzati nella figura 28, in cui si evidenzia il trend delle aree ricoperte da boschi in Italia.

I risultati ottenuti e registrati in una apposita banca dati, descrivono con cadenza mensile l'andamento dell'estensione dei boschi verdi che varia annualmente tra un valore massimo assunto durante la stagione estiva ed un minimo assunto in inverno. Il cospicuo insieme dei dati così collezionati ha permesso di stimare quantitativamente il "trend" di crescita delle estensioni ricoperte sia dai boschi sempreverdi sia da quelli decidui.

Figura 27 - Mappa di LAI dell'area del bosco Pantano (Basilicata) ottenuta da immagini Ikonos e rilievi a terra (triangoli) (da Giordano ed al., 2006)

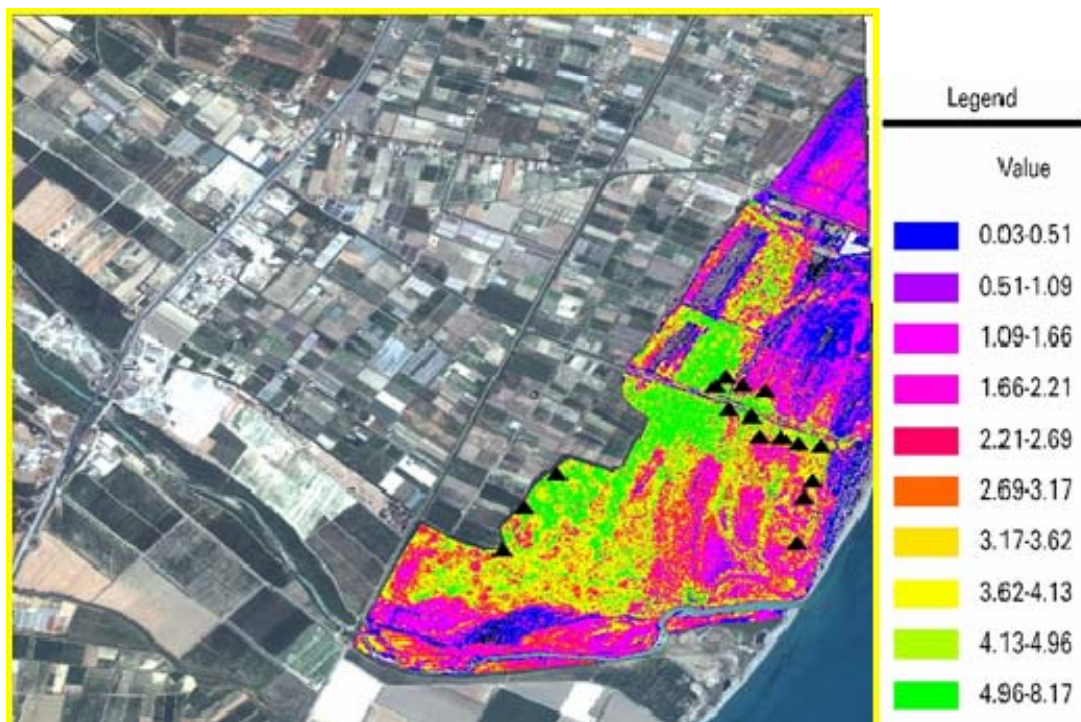
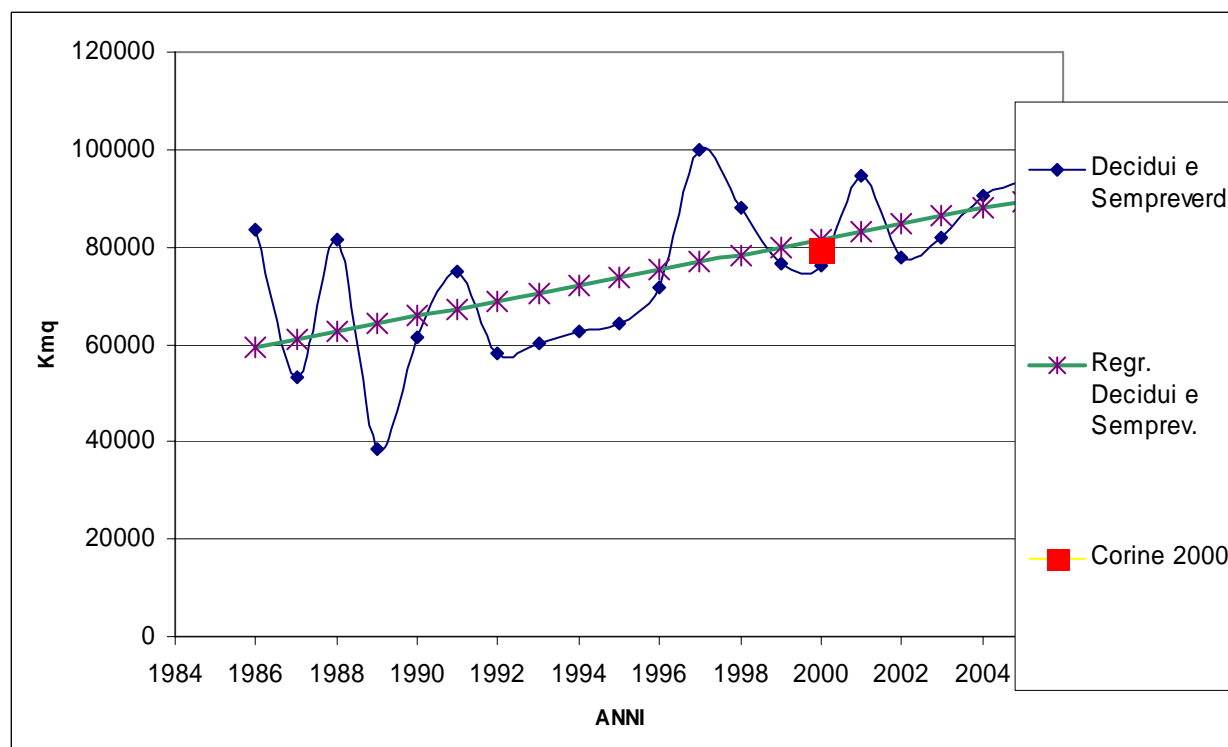


Figura 28 - Andamento della estensione dei boschi decidui e sempreverdi negli ultimi 20 anni. La regressione lineare indica una tendenza all'aumento delle superfici coperte (da Rossi et al., 2006)



### 1.8 Proiezioni e scenari climatici

Se e con quale rapidità il clima stia cambiando è sicuramente un argomento ampiamente dibattuto negli ultimi anni, e che coinvolge aspetti politici, sociali ed economici.

La comunità internazionale sta cercando di dotarsi di strumenti per attuare forme di *mitigazione* dei cambiamenti climatici. L'efficacia di questi provvedimenti tuttavia comporta necessariamente la revisione condivisa di alcuni modelli di sviluppo economico. D'altro canto gli effetti devastanti di alcuni fenomeni meteorologici *estremi*, si pensi all'uragano Katrina, mettono in evidenza clamorosamente la vulnerabilità dei territori, delle persone che li abitano e delle economie locali.

Anche sul fronte della conoscenza scientifica la comunità internazionale, tramite l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e le Nazioni Unite (UNEP), ha sentito l'esigenza di avere un organo che raccogliesse e gestisse in modo esauriente, aperto e trasparente tutte le informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche rilevanti per la comprensione scientifica del rischio di un cambiamento climatico e dei suoi potenziali impatti. L'International Panel on Climate Change (IPCC) opera in tal senso dal 1988 e fornisce con la pubblicazione regolare dei suoi report un quadro esauriente tanto delle problematiche coinvolte quanto delle conoscenze più aggiornate nel campo. L'ultimo rapporto IPCC è stato pubblicato nel 2007 e costituisce il quadro di riferimento entro cui la comunità degli studiosi del clima si deve muovere (l'ENEA, tramite suoi ricercatori ha contribuito direttamente alla scrittura ed alla elaborazione del rapporto finale WGI-AR4). Da esso emergono, in continuità con il TAR, l'intensificazione dei fenomeni estremi (in particolare uragani), anche al di fuori della fascia tropicale e sub-tropicale dove normalmente essi sono osservati, una forte correlazione tra l'aumento dei disastri naturali e l'aumento della temperatura globale. Altri fenomeni in intensificazione sono le ondate di calore, da notare quella dell'estate del 2003, l'accelerazione dello scioglimento dei ghiacciai all'interno dei continenti ed ai poli, in particolare in Groenlandia, ed un maggiore riscaldamento delle regioni tropicali ed anche sub-tropicali. La maggiore certezza che negli ultimi decenni la radiazione solare è rimasta stabile consente di escludere che l'aumento di temperatura osservata sia da attribuirsi

esclusivamente all'attività solare. Per quel che concerne l'accelerazione dell'aumento del livello del mare negli ultimi dieci anni invece, tale accelerazione potrebbe essere anche attribuita ad una maggiore precisione delle osservazioni del livello medio del mare, in virtù della sempre maggiore integrazione tra dati costieri (mareografi) e misure da satellite (altimetro). Infine a livello globale si è certi che l'oceano ha ridotto la sua capacità di assorbire CO<sub>2</sub> e quindi per il futuro si può prevedere un ritmo maggiore di crescita della CO<sub>2</sub> in atmosfera.

In questo contesto risulta fondamentale analizzare se e come questi cambiamenti si manifestino anche a scala regionale, e capire come il clima in Italia stia cambiando.

Questo tipo di valutazioni si effettuano analizzando statisticamente i dataset climatici disponibili. In generale, i dati per lo studio del clima recente (gli ultimi 50 anni) provengono da dati sperimentali, e dall'integrazione di questi ultimi in modelli numerici di circolazione atmosferica (progetti di rianalisi). Sono inoltre disponibili data-set climatici osservativi i cui dati, provenienti da reti di misura, sono stati digitalizzati e definiti su griglie uniformi, anche ad elevata risoluzione spaziale. Infine, l'utilizzo di dati "in situ" è particolarmente utile per lo studio dei processi locali.

Le proiezioni relative all'evoluzione del clima nel prossimo futuro sono invece totalmente affidate all'analisi dei dati prodotti dai modelli numerici. L'uso di modelli numerici globali accoppiati (estesi spazialmente su tutto il globo, e comprendenti l'atmosfera, l'oceano e la biosfera) è imprescindibile per poter tener conto di tutti i processi di retroazione del sistema climatico. Le indicazioni che questi modelli forniscono a grande scala possono poi essere utilizzate per trarre delle indicazioni più specifiche a scale regionali con l'ausilio di tecniche *ad hoc* dette di *regionalizzazione*.

Alcune considerazioni sull'evoluzione del clima futuro sono state fatte nell'ambito di uno studio condotto negli anni 2005-2006 sulla base delle informazioni contenute nell'ultimo report IPCC allora disponibile (TAR-2001), e dei risultati di un progetto di ricerca finanziato dalla Comunità Europea e finalizzato allo studio degli scenari climatici per il settore europeo (PRUDENCE) e infine utilizzando le rianalisi del National Center for Environmental Prediction (NCEP), quelle del Centro Europeo di Reading (ECMWF) e il dataset osservativo dell'Università dell' East Anglia (CRU).

### 1.8.1 Il clima globale e regionale

Il clima è definito dalle proprietà statistiche delle variabili meteorologiche su un periodo di tempo molto lungo (10-100 anni). Inoltre, i complessi accoppiamenti tra i vari sottosistemi che costituiscono il sistema climatico, e le scale di tempo coinvolte, obbligano a considerare prima di tutto il clima come un concetto *globale*, inerente all'intero pianeta. L'energia solare assorbita dalla Terra, principalmente all'equatore, è "immagazzinata" in modo molto diverso tra le sue varie componenti (aria-acqua-terra), essenzialmente in virtù delle loro diverse capacità termiche. Tale energia innesca nelle componenti fluide del nostro pianeta dei moti, "*veloci*" nel caso dell'atmosfera e "*lenti*" nel caso degli oceani, ma comunque complessi. Questi moti realizzano dei trasporti di energia su tutto il globo, con un trasporto netto dall'equatore ai poli, modulati da continui scambi tra i sottosistemi, in termini di calore, di momento e di acqua.

All'interno di questa dinamica globale le singole regioni, in funzione della loro collocazione geografica e della loro conformazione orografica, presentano poi delle caratteristiche climatiche precise: i *climi regionali*.

Nel caso del Mediterraneo occorre considerare almeno tre tipi di scale spaziali coinvolte: una scala emisferica con particolare riferimento al settore atlantico e a quello europeo-nordafricano, una scala sub-continentale (comprendente in questo caso tutto il bacino Mediterraneo e i territori immediatamente adiacenti) ed infine ad una vera e propria scala regionale, rilevante per la valutazione degli impatti e la definizione di strategie di mitigazione.

Da un punto di vista meteorologico la regione euro-mediterranea è caratterizzata da una circolazione alla mesoscala (circa 100-300 km) che è alimentata dai trasferimenti di energia che avvengono nella circolazione a scala sinottica (circa 300-1000 km) sull'Atlantico, e dalla interazione delle perturbazioni di origine Atlantica con la complessa topografia che circonda il bacino. È evidente che la variabilità del clima della regione Mediterranea è inter-connessa a quella del settore Atlantico. Inoltre, l'interazione



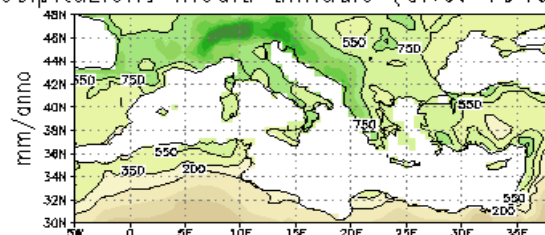
tra i cicloni Mediterranei e la complessa topografia dell'area produce a sua volta rilevanti fenomeni oceanici, che possono interessare le coste italiane, quali ad esempio gli eventi di Acqua Alta. Per quel che concerne la variabilità climatica del settore Atlantico, essa è dominata da un fenomeno molto tipico, e già noto fin dal 1700: il campo di pressione atmosferica presenta una bassa pressione centrata sull'Islanda contrapposta ad un'alta pressione centrata intorno alle Azzorre. L'intensità relativa di questi due centri di bassa ed alta pressione non è costante nel tempo, ma varia sia sulle scale dei pochi giorni che su quelle dei mesi e degli anni. L'altalenarsi dell'intensità relativa tra i due centri di pressione è determinante nella evoluzione e nel cammino delle perturbazioni atlantiche verso l'Europa e condiziona il regime di precipitazioni nel settore Mediterraneo e Nord-Europeo. Questa "altalena" del clima Atlantico è nota come la North Atlantic Oscillation (NAO). Viene usualmente definito un indice per misurare quantitativamente l'intensità di questo fenomeno, quando questo indice è fortemente positivo si registrano nel settore Mediterraneo delle situazioni di anomalie negative di precipitazione, ovvero una piovosità inferiore alla norma, quando è fortemente negativo le precipitazioni sul Mediterraneo sono più intense del normale. Alla luce di quanto esposto in questa breve introduzione passiamo ad analizzare i contenuti di alcuni dataset climatologici.

### 1.8.2 I dataset globali

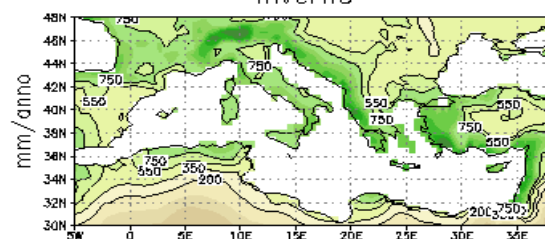
Nella figura 29, mostriamo la mappa climatologica di precipitazione sul periodo dal 1949 al 1996 per l'area mediterranea, ottenuta elaborando i dati osservativi distribuiti dall'Università dell' East Anglia ([www.cru.uea.ac.uk/cru/cru.htm](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/cru.htm)), cioè osservazioni, su grigliato regolare 0.5x0.5 globale, dal 1901 al 1996.

Figura 29 - Climatologia delle precipitazioni (da Rapporto ENEA per la Convenzione ENEA - Regione Abruzzo)

Precipitazione media annuale (CRU: 1949–1996)



Inverno



Estate

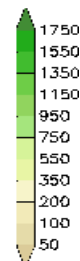
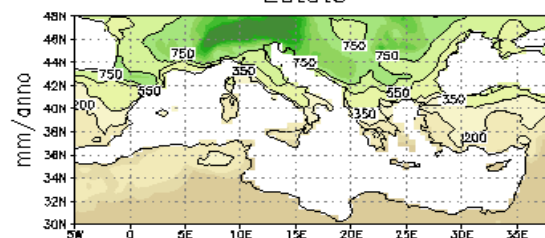
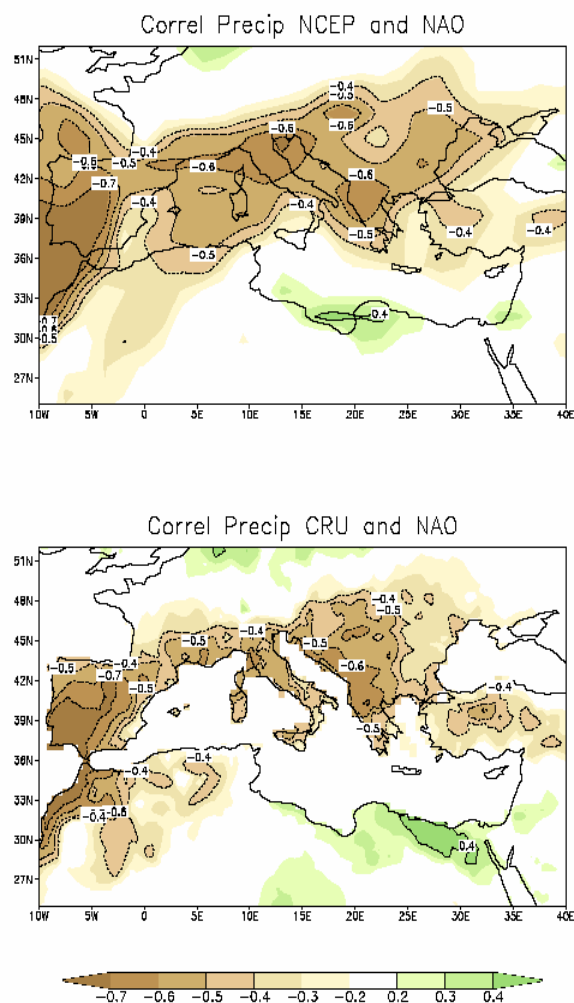


Figura 30 - Correlazione tra precipitazioni e NAO (da Mariotti et al., 2002)



Il primo riquadro mostra le medie annuali, mentre il secondo quelle invernali ed il terzo quelle estive. In tutti i riquadri è evidente che la distribuzione delle precipitazioni è fortemente influenzata dall'orografia dell'area, e mostra un evidente gradiente meridionale, in buona parte causato dalle perturbazioni meteorologiche che caratterizzano le medie-latitudini (45°-70°N). Le precipitazioni nel periodo invernale sull'area Mediterranea, comprendendo le coste nord-africane, si mantengono sopra i 750 mm/anno. Mentre, nel periodo estivo non superano i 600 mm/anno.

Come già discusso, il clima della nostra regione, pur godendo di peculiarità legate tanto alla complessa orografia circostante, quanto alla presenza del mare Mediterraneo, non è mai svincolato dal clima globale ed in particolare dall'Oscillazione Nord-Atlantica (NAO). Lo studio dei dati climatici alla scala del bacino Mediterraneo consente di mettere in evidenza le relazioni del nostro clima con questi fenomeni a più grande scala.

Nelle figura 30 valutiamo la rilevanza di questa configurazione climatica sulle precipitazioni invernali del Mediterraneo, mostrando la correlazione tra l'indice NAO e le precipitazioni di due dei dataset prima citati: le rianalisi dell'NCEP e i dati del CRU. Come si può notare le correlazioni tra i due fenomeni sono ben evidenti anche nelle regioni dell'Italia Centro-Settentrionale.

### 1.8.3 I cambiamenti climatici futuri

Le attività umane, contribuendo all'aumento della concentrazione di  $CO_2$  ed altri gas serra, nonché all'immissione di aerosol, provocano delle perturbazioni nel ciclo radiativo dell'atmosfera che inducono dei cambiamenti in quel sistema complesso che è il clima globale. Capire quali siano questi cambiamenti,

quale sia la loro entità, come si manifestino nelle diverse regioni del globo e se siano reversibili è un compito che gli studiosi del clima stanno già affrontando da molti anni.

Per poter indirizzare le strategie di mitigazione ed adattamento ai cambiamenti climatici, è importante sia conoscere i cambiamenti in atto quanto prevedere i cambiamenti futuri.

La previsione dei cambiamenti futuri può essere perseguita con l'ausilio di modelli climatici numerici, che riproducono l'andamento del clima sotto diverse condizioni di forzanti radiative, che simulano gli effetti di altrettanti "regimi" di attività antropiche caratterizzati da diversi ritmi di crescita economica, incremento di popolazione, uso di tecnologie avanzate. Queste ipotesi di lavoro sono usualmente denominate *scenari climatici*.

Gli scenari di riferimento da usarsi sono definiti nel contesto dei lavori dell' *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, Special Report on Emissions Scenario, 2000 -

<http://www.ipcc.ch/activity/sprep.htm>)

I modelli di circolazione generale (modelli oceanici ed atmosferici accoppiati) hanno, per ora, una risoluzione spaziale (100-300 km) che non permette di descrivere accuratamente le forzanti che agiscono su scala regionale. Nel caso del bacino Mediterraneo, la complessa topografia che lo circonda è per esempio scarsamente descritta da un modello di circolazione generale. Alcuni dei principali strumenti di previsione del clima a scala regionale sono i modelli ad area limitata. Questi modelli, che d'ora in poi definiremo modelli regionali o Regional Climate Model (RCM), descrivono la dinamica atmosferica come i modelli globali, ma hanno una risoluzione spaziale molto più alta (10-50 km), delle parametrizzazioni fisiche che inglobano forzanti a scala regionale, e sono forzati con un modello globale che fornisce loro le condizioni al contorno. Nel TAR, è stato evidenziato che i RCM migliorano la previsione climatica a scala regionale di variabili come la temperatura superficiale e la precipitazione rispetto ai modelli climatici globali.

Recentemente, la Comunità Europea ha finanziato tramite il V programma quadro il progetto PRUDENCE: Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects (<http://prudence.dmi.dk/>). Gli obiettivi dichiarati di questo progetto sono migliorare la previsione climatica a scala regionale e quantificare l'affidabilità e le incertezze nella predizione del clima futuro e dei suoi impatti, usando un sistema di modelli numerici climatici e di impatto. Mettendo a confronto ben 14 modelli diversi di cui 4 globali e 10 regionali, per due degli scenari definiti dall'IPCC (Scenari A2 e B2, vedi riquadro seguente), PRUDENCE è attualmente un progetto di riferimento per questo tipo di studi, relativamente all'area Europea e Mediterranea e fornisce il primo quadro di riferimento per gli studi futuri con modelli regionali ad alta risoluzione sull'area Europea.

Nel seguito di questa esposizione faremo quindi riferimento soprattutto ai risultati ottenuti nel contesto del progetto PRUDENCE.

***DEFINIZIONE di scenari di emissione A2 e B2 dello "Special Report on Emissions Scenarios" (SRES)***

*A2. La famiglia di scenari A2 descrive un mondo molto eterogeneo. Il tema fondamentale è la autosufficienza e la conservazione delle identità locali. Si prevede un aumento continuo della popolazione. Lo sviluppo economico è soprattutto orientato regionalmente e la crescita economica pro-capite ed il cambiamento tecnologico sono più frammentati e lenti che in altri scenari proposti all'interno dello stesso SRES.*

*B2. La famiglia di scenari B2 descrive un mondo in cui si privilegiano soluzioni locali alla sostenibilità economica, sociale ed ambientale. È un mondo con una popolazione globale costantemente in crescita, ma con un ritmo più basso che in A2, livelli di sviluppo economico intermedio, e cambiamenti tecnologici meno rapidi che in A1e B1. Si tratta di uno scenario orientato alla protezione ambientale e alla equità sociale, ma focalizzato su livelli locali e regionali.*

Il progetto PRUDENCE ha condotto un totale di 28 esperimenti diversi di simulazione del clima futuro confrontando modelli numerici regionali, forzati con diversi modelli globali, sotto le ipotesi dei due scenari di emissione A2 e B2. Il periodo di riferimento considerato è stato quello 1961-1990 mentre il periodo di proiezione è il 2071-2100. La risoluzione spaziale adottata è stata di 50 km, ed in alcuni casi si sono raggiunte risoluzioni di 20 -12 km.

In generale, i risultati rilevanti per il Sud Europa ed il bacino Mediterraneo ottenuti da PRUDENCE si possono riassumere come segue.

- Considerando lo scenario A2, le temperature medie superficiali estive aumenteranno su tutto il Mediterraneo di almeno 5°C. Aumenti più consistenti si potranno avere sulla Spagna, il sud della Francia, il nord dell'Africa ed il sud della Turchia. L'incertezza su queste stime è attestabile a circa 1.4 °C sulla temperatura media annuale, con un minimo nella stagione invernale (1.1 °C) ed un massimo in quella estiva (1.8 °C). I modelli prevedono una diminuzione della precipitazione estiva su tutto il dominio. I cambiamenti più intensi sono attesi sulle Alpi, dove la precipitazione estiva totale dovrebbe diminuire di più di 150 mm ( $\pm 30$  mm). A nord del cerchio di latitudine 44°N, ci si aspetta un aumento delle precipitazioni invernali di circa 100 mm ( $\pm 15$  mm). A sud di questa latitudine, la precipitazione invernale diminuirà di circa 50-100 mm ( $\pm 10$  mm).
- In particolare, i risultati prodotti dal modello regionale dell'ICTP di Trieste (<http://www.ictp.it/pages/research/pwc.html>) per i due scenari A2-B2, forniscono le seguenti indicazioni. Il riscaldamento sull'area Europea è nel range di 2.5-5.5 °C. Lo scenario più severo (A2) produce un riscaldamento di 1-2 gradi superiore allo scenario B2, con punte massime sul Mediterraneo e sulle regioni Europee occidentali durante l'estate, e nell'Europa centrale ed orientale durante l'inverno. In inverno, un sostanziale aumento della precipitazione avverrà sull'Europa centrale e settentrionale in risposta ad un aumento dell'attività ciclonica. In estate, la precipitazione diminuirà nell'Europa meridionale ed occidentale a causa di un aumento della circolazione anticiclonica sull'Atlantico nord-orientale. Questi risultati sono comuni ai due scenari (A2 e B2).
- Sempre all'interno del progetto PRUDENCE, è stata fatta una valutazione del cambiamento degli eventi siccitosi. Usando dati di quattro simulazioni con RCM, è stato evidenziato che, per quanto riguarda lo scenario A2, il Mediterraneo subirà un significativo aumento degli eventi siccitosi, con una riduzione dell'intensità della precipitazione, un anticipo dell'inizio della stagione secca ed un suo maggiore perdurare. Gli stessi cambiamenti si osservano per lo scenario B2, ma ridotti in intensità. Si deve tuttavia notare, che l'utilizzo di condizioni al contorno provenienti da diversi modelli globali produce, negli estremi di siccità, effetti paragonabili a quelli dati dal cambiare gli scenari stessi.

#### **1.8.4 Sviluppo di un Modello Accoppiato oceano-atmosfera-biosfera sull'area Mediterranea (MedSimulator)**

Il principale obiettivo dell'ENEA è quello di fornire scenari affidabili e dettagliati per il 21<sup>mo</sup> secolo sulla regione Mediterranea, da utilizzare in modelli di impatto ambientale e socio-economico. Lo strumento fondamentale per raggiungere questo obiettivo è lo sviluppo e messa a punto di un modello climatico del sistema Mediterraneo (oceano-atmosfera-biosfera).

La Figura 31 mostra l'evoluzione della complessità, attraverso introduzione di maggior dettaglio della fisica dei processi climatici, all'interno dei modelli numerici nei diversi rapporti dell'IPCC; la Figura 32 mostra l'evoluzione della risoluzione geografica dei modelli usati nei diversi rapporti IPCC dal FAR (1990) all'AR4 (2007), la figura in particolare mostra come i modelli "vedono" il nord Europa (da IPCC-AR4).

Figura 31

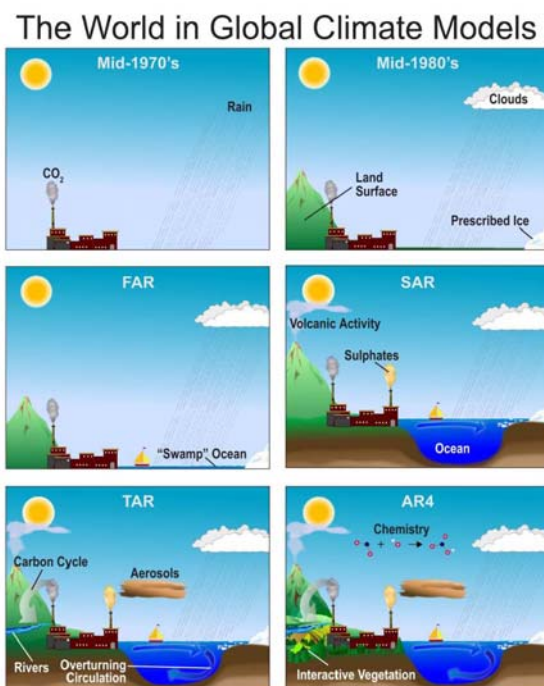
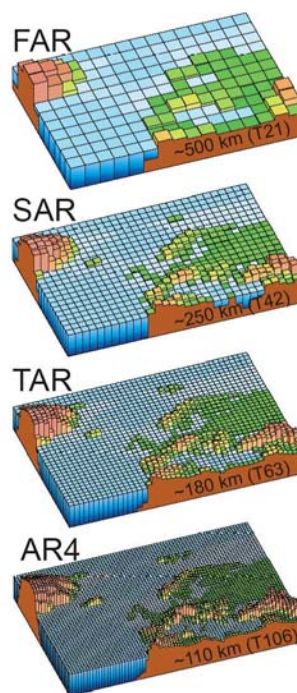


Figura 32



Prima di descrivere questo modello, analizziamo la necessità di un modello accoppiato a scala di bacino Mediterraneo. Il limite dei modelli globali nella produzione di scenari climatici per il Mediterraneo, è quello di non poter dettagliare le loro previsioni ad una scala sufficiente per l'uso in modelli di impatto. Questo, in pratica, comporta la necessità di passare dalla scala delle centinaia di chilometri a quella delle decine di chilometri (fig. 31 e 32), ossia in termini tecnici fare il downscaling. La principale tecnica di downscaling utilizzata negli ultimi anni è quella dinamica, cioè lo sviluppo di modelli atmosferici regionali che forzati dai modelli globali producono simulazioni di scenario con un maggiore dettaglio spaziale.

Nel caso del Mediterraneo, questa metodologia va estesa in considerazione dell'esistenza di meccanismi di retroazione tra le diverse componenti del sistema climatico (atmosfera-oceano-biosfera) che possono agire all'interno della scala regionale di interesse.

Vi sono alcuni quesiti scientifici, riguardanti l'area Mediterranea, che palesano l'importanza della dinamica interna del clima Mediterraneo. Eccone un breve elenco:

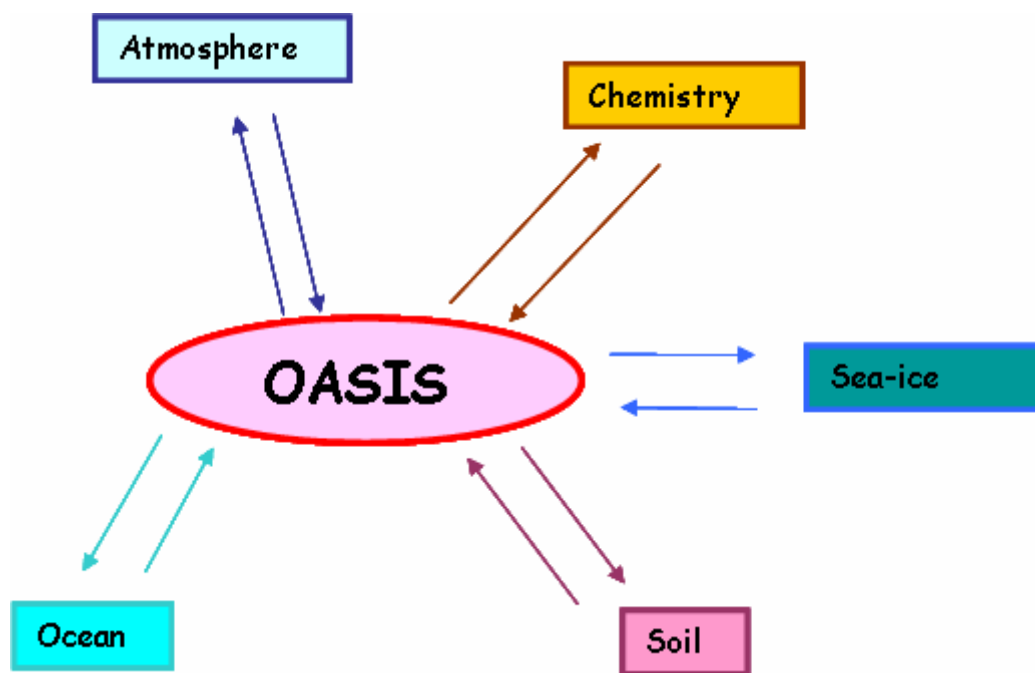
- 1) in che termini la variazione dell'uso del suolo modifica il bilancio di vapor acqueo?
- 2) le variazioni del bilancio del vapor acqueo interne al sistema Mediterraneo modificano i regimi di pioggia? E se sì in che proporzione rispetto alla forzante a larga scala del ciclo idrologico?
- 3) qual è l'impatto dell'aumento della salinità e della temperatura sulla variabilità climatica del Mar Mediterraneo?

Per rispondere a queste domande non si può prescindere da una sempre più approfondita conoscenza della dinamica accoppiata delle componenti del sistema climatico regionale del Mediterraneo. Quindi, a scala regionale i metodi di downscaling devono entrare in una nuova fase in cui tutte le componenti climatiche vengono prese in considerazione.



La previsione dei cambiamenti climatici può essere affidata esclusivamente all'uso di modelli numerici che simulano il comportamento del sistema climatico (comprendente atmosfera-oceano-biosfera-criosfera). Sintetizzando, l'analisi sulle simulazioni numeriche attualmente disponibili consentono di prevedere sull'area Mediterranea, un aumento significativo di temperatura dovuta ad effetti antropogenici per il periodo 2070-2100 (il riscaldamento sull'area Europea è nel range di 2.5-5.5 °C). Gli studi attualmente a disposizione della comunità internazionale non permettono di valutare accuratamente questi cambiamenti a scala regionale e locale. Infatti le proiezioni della variazione di precipitazione, ottenute da modelli regionali e globali sul bacino Mediterraneo, sono affette da errori non trascurabili, e necessitano di ulteriori studi. L'ENEA, recependo le richieste nazionali ed internazionali di un maggior impegno sulle problematiche dei cambiamenti climatici sta potenziando le attività di modellistica per gli impatti e sta partecipando ai principali progetti europei che integrano lo sviluppo di modelli regionali e locali con i modelli di impatto (CIRCE, AMMA, GO). Infine l'ENEA in collaborazione con l'ICTP di Trieste ha sviluppato un modello integrato del clima Mediterraneo comprendente atmosfera, oceano e biosfera (fig. 33). Attualmente sono stati accoppiati il modello MIT per l'oceano, ed il modello RegCM per l'atmosfera.

Figura 33 - Schema di un sistema climatico regionale. Le principali componenti sono l'atmosfera, l'oceano, il suolo, e la chimica. Tutte le interazioni tra queste componenti vengono gestite dal modulo OASIS

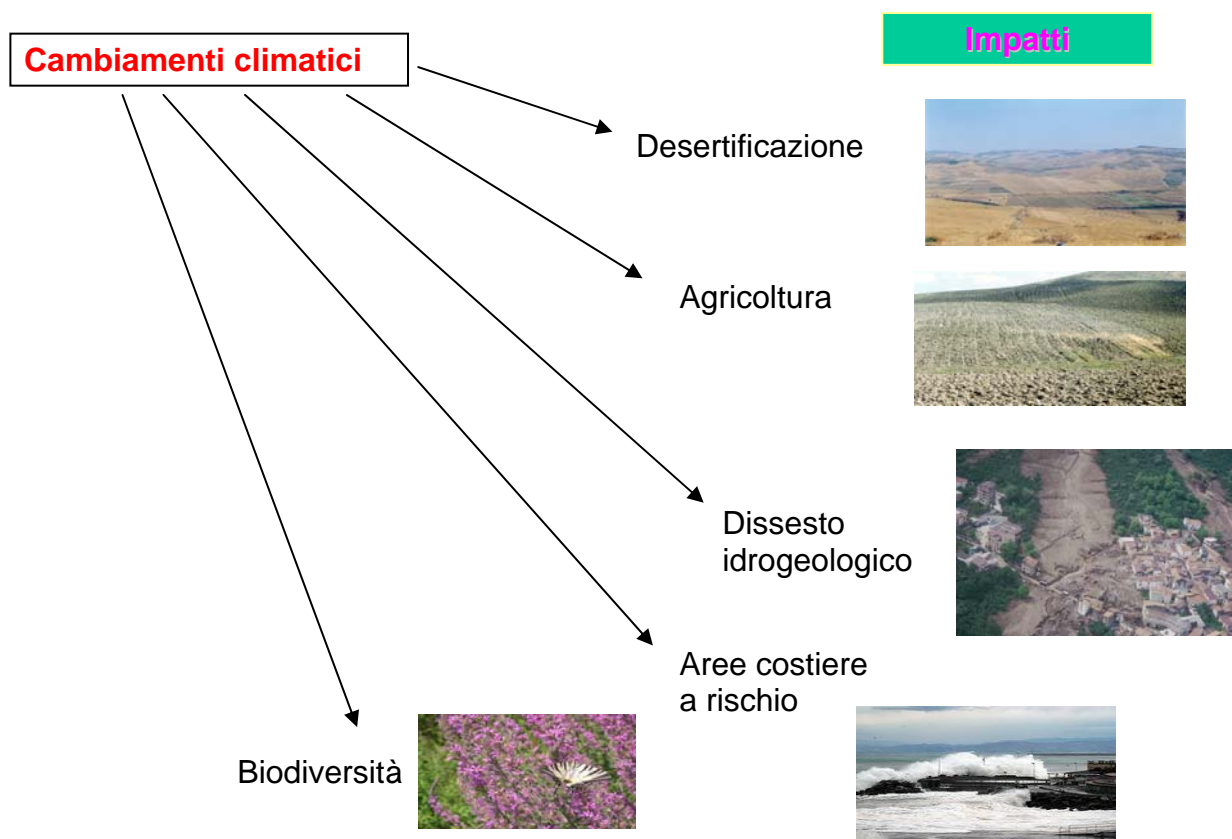




## 2. ATTIVITÀ ENEA SULLA VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Le evidenze, lo studio e l'analisi dei cambiamenti climatici in atto rappresentano il presupposto indispensabile per affrontare il problema della mitigazione e dell'adattamento, per minimizzare le conseguenze negative prevedibili, prevenire i possibili danni e combattere le emergenze future. In questo secondo capitolo vengono trattati gli aspetti legati alle modificazioni delle dinamiche ambientali indotte dai cambiamenti climatici e ai relativi impatti sul territorio.

I punti trattati vengono riassunti nell'immagine seguente:

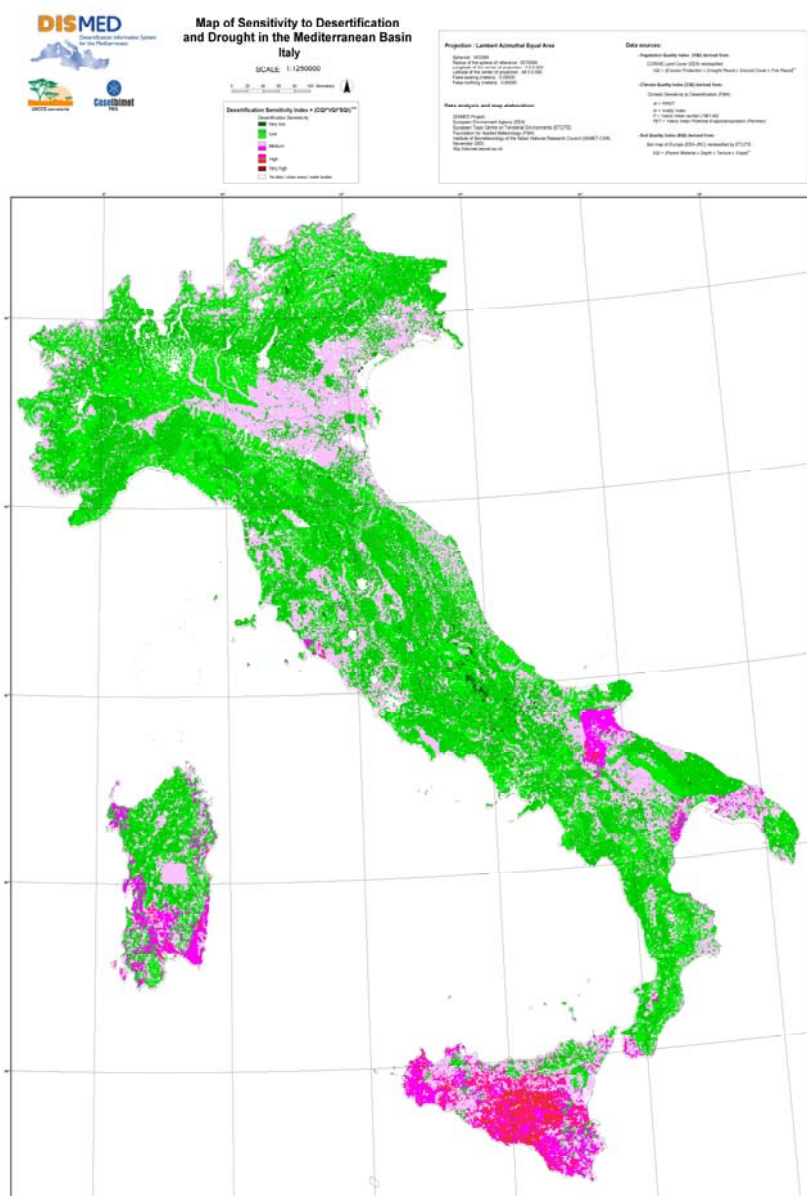


### 2.1 Desertificazione

La desertificazione è un fenomeno che provoca la riduzione della produttività economica e biologica delle zone climaticamente aride in conseguenza di numerosi processi, generati dalle attività umane e favoriti da eventi climatici estremi. I principali processi sono l'erosione ed il degrado dei suoli, il sovrasfruttamento delle risorse idriche, la salinizzazione, la deforestazione, gli incendi e la perdita di biodiversità, che possono manifestarsi anche nelle zone non aride e dare origine a situazioni di degrado del territorio, ma la loro estensione, incidenza ed i relativi impatti sono inferiori rispetto alla desertificazione.

L'Agenzia Ambientale Europea (EEA) ha realizzato, grazie ad un progetto a cui ha partecipato anche l'ENEA, una carta della sensibilità dei Paesi del bacino del Mediterraneo alla desertificazione. Dalla carta in figura 34 si riporta la situazione relativa al territorio italiano (ENEA, CNR, APAT), che evidenzia come il 3,7% del territorio è molto vulnerabile, il 32,15% è vulnerabile ed il 64,11% è poco vulnerabile nelle presenti condizioni climatiche e con gli attuali utilizzi del territorio. Le aree poco vulnerabili saranno soggette ad incrementare la loro vulnerabilità in alcune delle condizioni di cambiamento climatico previste dagli scenari futuri.

Figura 34 - Mappa della sensibilità alla desertificazione (fonte EEA 2001)

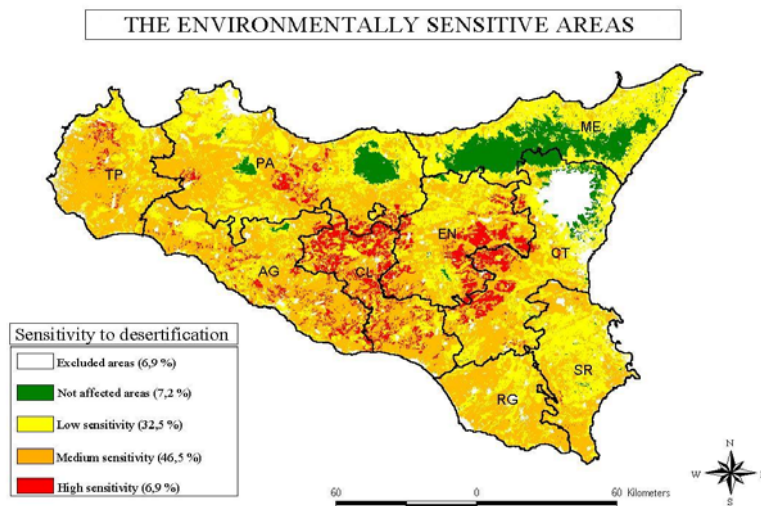


La situazione più critica si riscontra nelle regioni meridionali ed insulari dove le condizioni ambientali sono più sfavorevoli e dove l'agricoltura, la pastorizia e le altre attività dell'uomo incidono sulle condizioni del territorio.

### L'esempio della Sicilia

L'ENEA ha approfondito lo studio della desertificazione sia a scala regionale, realizzando una carta della sensibilità della regione Sicilia (fig. 35) che a livello sub regionale, studiando aree affette da particolari processi di degrado.

Figura 35 - Mappa della sensibilità alla desertificazione della Regione Sicilia (da M. Sciortino, M. Iannetta, et al., 2002)

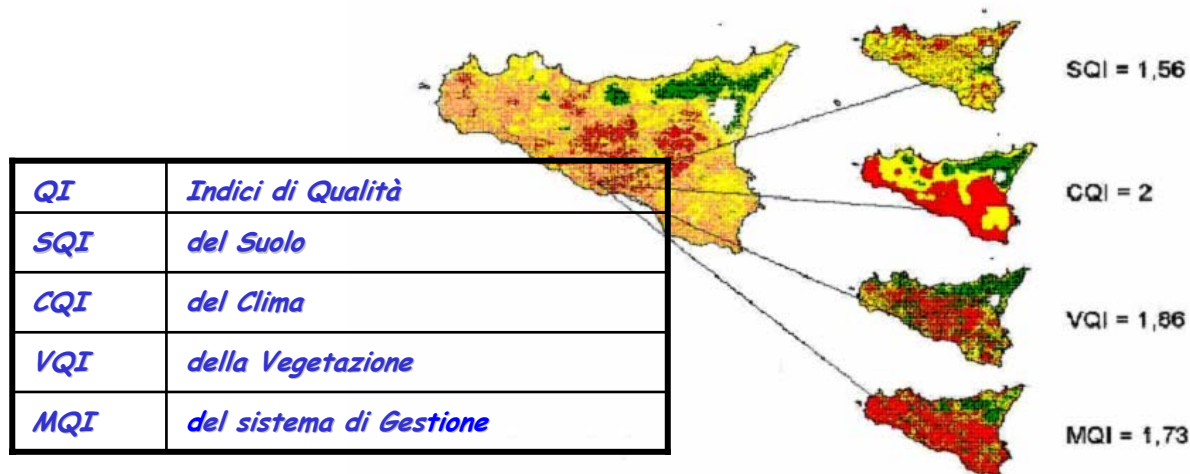


Le variazioni della pressione esercitata sul territorio dalle attività antropiche e dal cambiamento del clima possono generare impatti difficilmente distinguibili fra loro. La metodologia ESA (Environmentally Sensitive Areas), utilizzata per l'individuazione della sensibilità alla desertificazione della Regione Sicilia, ci consente di discriminare l'incidenza del fattore climatico (CQI) rispetto alle altre componenti che entrano in gioco (Suoli SQI, Vegetazione VQI e Sistemi di Gestione MQI) nella determinazione del valore finale (compreso tra 1 e 2), attraverso una valutazione quali-quantitativa di specifici indicatori/parametri (fig. 36).

Figura 36 - Contributo dei singoli Indici di Qualità ESA (da M. Sciortino, M. Iannetta, et al., 2002)

*Per ogni punto è possibile risalire al contributo degli Indici di Qualità (QI) o dei singoli parametri tramite l'informazione contenuta nell'associato database*  

$$ESA = (1,56 * 2,00 * 1,86 * 1,73)^{(1/4)} = 1,78$$





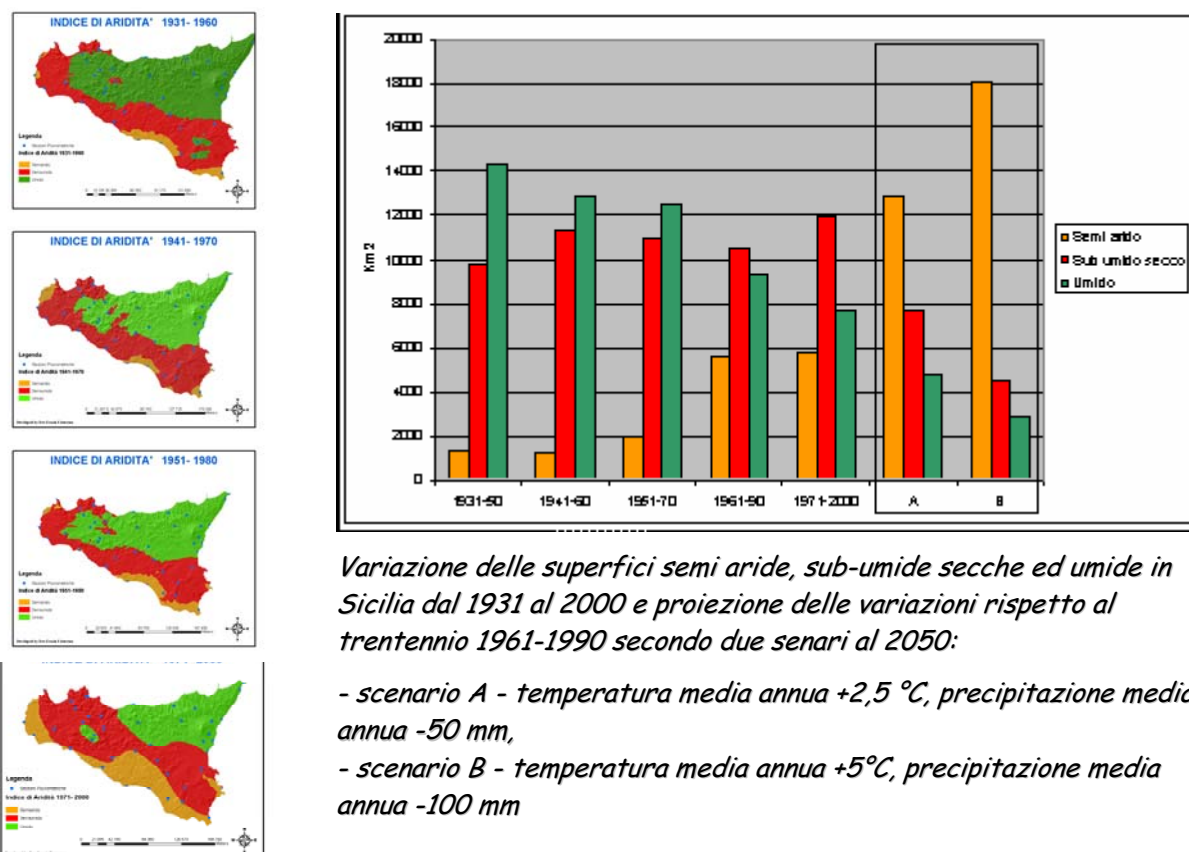
I differenti valori di aridità climatica, determinati dalla simultanea variazione di precipitazioni e temperature, sono documentati grazie ai dati che l'Ufficio Idrografico Regionale ha messo a disposizione per le attività di ricerca che l'ENEA ha condotto in Sicilia. Dalla figura 37 si evince che la superficie di territorio semi arido è progressivamente aumentata dal 1921 al 2000 arrivando a superare il 20% del territorio regionale. Parallelamente, i territori classificati "umidi" sono diminuiti fino al 30%.

Questo cambiamento dell'aridità è attribuibile principalmente all'incremento delle temperature, aumentate significativamente su tutto il territorio regionale. Le variazioni delle precipitazioni risultano in alcune località meno significative, sebbene l'Ufficio Idrografico abbia stimato che nell'arco degli ultimi due trentenni ci sia stata una diminuzione media sul territorio regionale di 30 mm/anno.

Gli studi effettuati dall'ENEA nell'ambito del progetto RIADE hanno inoltre approfondito la conoscenza dei più importanti processi di desertificazione, che interessano le aree maggiormente vulnerabili delle regioni meridionali (Esempio nella Figura 38).

L'effetto combinato delle peggiorate condizioni climatiche e della intensivizzazione delle attività antropiche, soprattutto lungo le fasce costiere e nelle aree pianeggianti, nel corso degli ultimi 40 anni, hanno innescato un trend crescente di degrado quali-quantitativo delle risorse naturali (acqua, suolo ed ecosistemi vegetali). Al contrario, le zone collinari e montane si stanno invece rinaturalizzando per un processo di abbandono. I due processi in atto non si compensano, ma generano problemi di gestione diversi che vanno affrontati con una politica di territorializzazione puntuale degli interventi.

Figura 37 - Variazione della percentuale di territorio della regione Sicilia interessata da condizioni di aridità (da M. Sciortino, 2007)



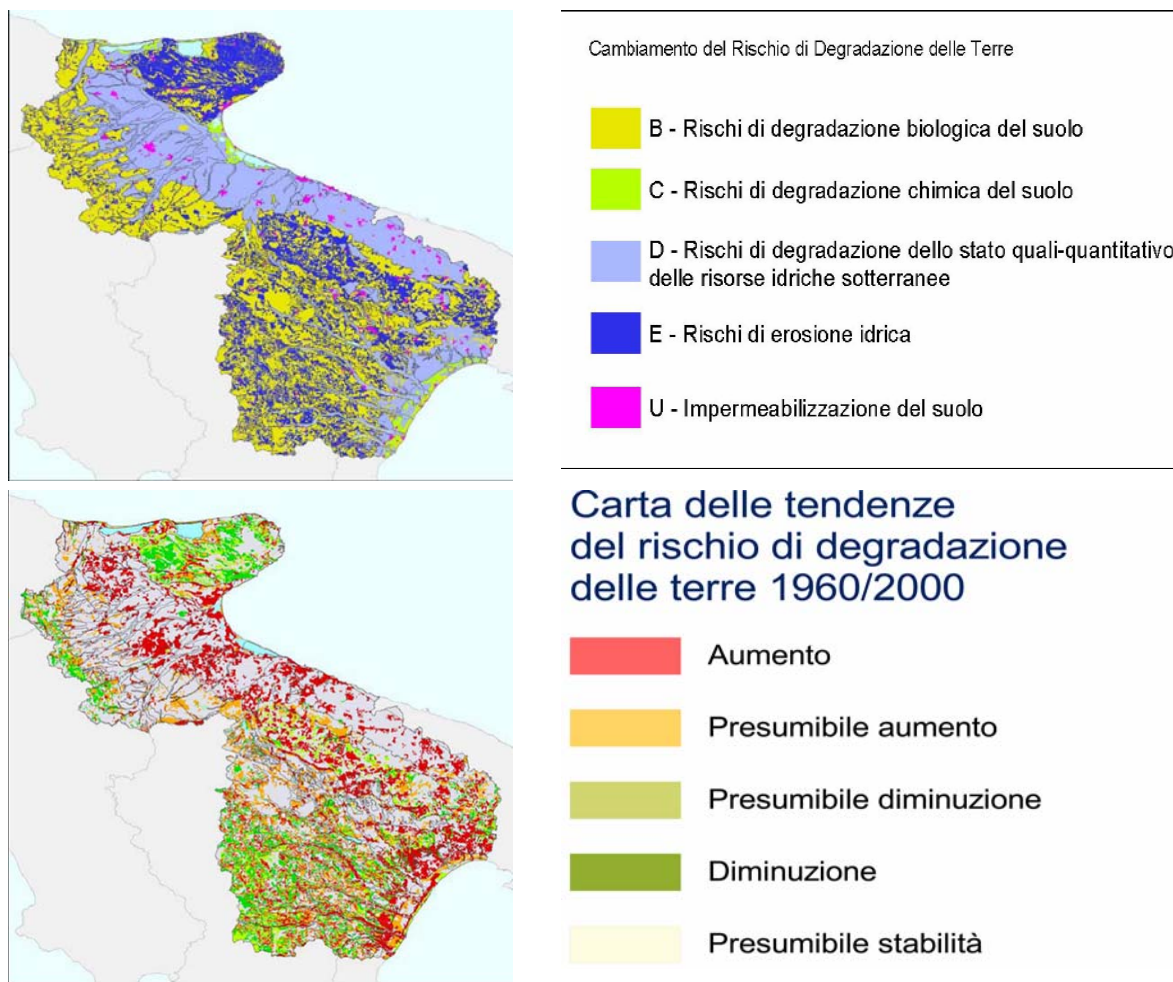


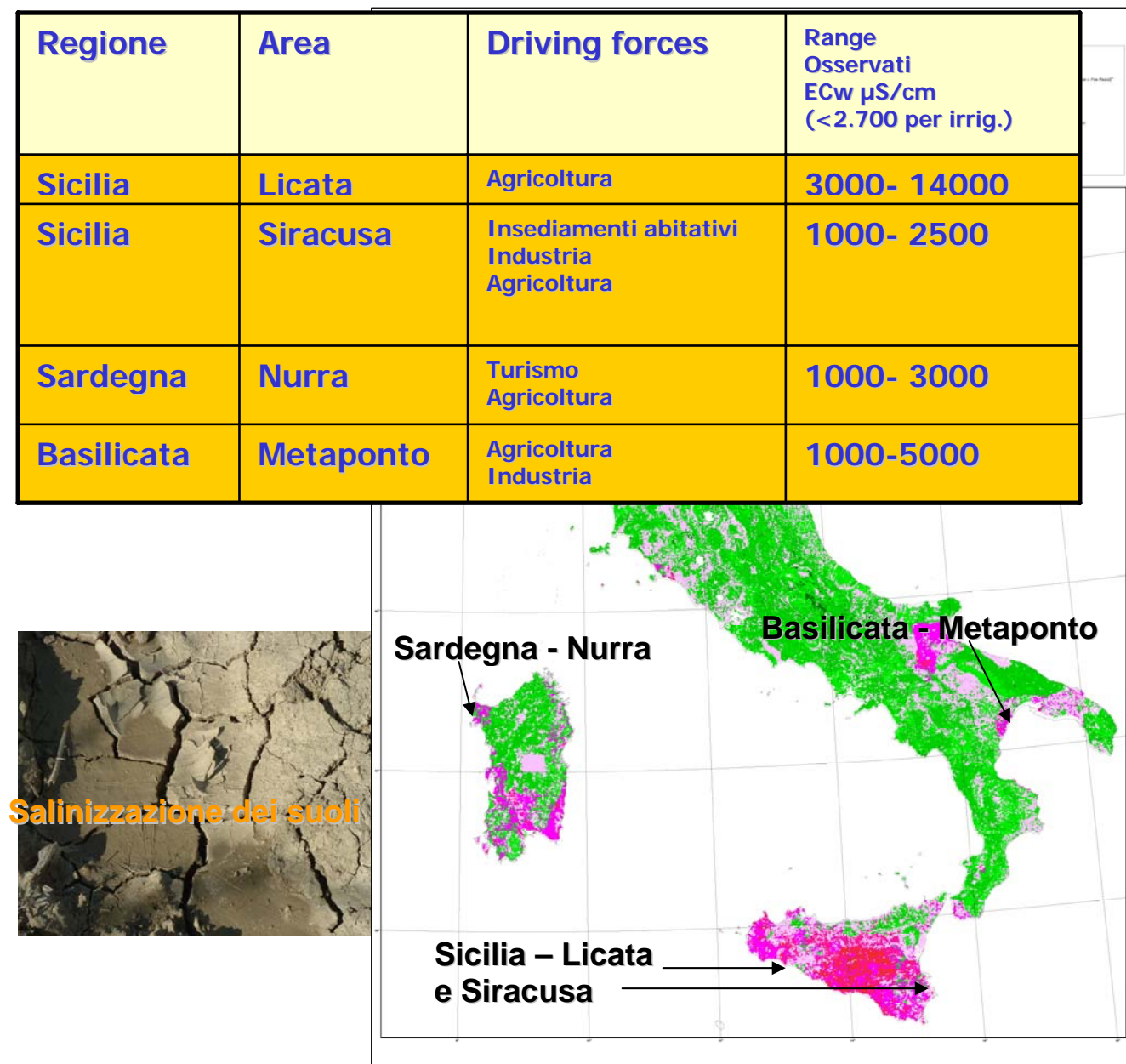
Figura 38 - Carta del rischio di degradazione delle terre e delle tendenze evolutive (da Iannetta M., G. Enne, C. Zucca, N. Colonna, F. Innamorato, A. Di Gennaro, 2005)

## 2.2 Agricoltura

Una recente analisi delle serie storiche termo-pluviometriche italiane ha mostrato un significativo aumento della temperatura media annua (0.4 °C al Nord, 0.7 °C al Sud) e una significativa diminuzione delle precipitazioni annue, in particolare nell'Italia meridionale (Brunetti et al., 2000). Nelle regioni aride e semi-aride la variabilità dei fattori ambientali e meteorologici è un elemento chiave nel determinare la produzione agricola. In queste regioni la variabilità interannuale del clima e, in particolare, delle precipitazioni piovose rappresenta, infatti, una componente intrinseca del sistema e il principale fattore di rischio. Parry e Carter (1988) e Rosenzweig (1982) hanno evidenziato le difficoltà che si incontrano, alla scala locale, nella valutazione del rischio climatico per le colture e le aree agricole. Il Rapporto pubblicato dalla Commissione Europea il 10 gennaio 2007 "Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius. The way ahead for 2020 and beyond", nel capitolo 4 "Cost of action for Europe" attraverso il progetto PESETA del JRC sottolinea gli impatti del cambiamento climatico in relazione all'agricoltura e ad altri importanti settori economici.

In termini di produzione agricola i cambiamenti previsti al 2020 e al 2080 determinerebbero una diminuzione delle rese nelle aree del sud Europa variabili dall'1,9% al 22,4% circa, a causa soprattutto della *riduzione del periodo di crescita, eventi estremi più frequenti durante le fasi del ciclo produttivo, in particolare precipitazioni intense durante la semina, stress da calore durante la fioritura e periodi asciutti più lunghi*. Pertanto, le aree già attualmente affette da scarsità di acqua saranno sottoposte a condizioni sempre più critiche con processi accentuati di salinizzazione delle falde acquifere e conseguentemente dei suoli (fig. 39).

Figura 39 - Hot spot ENEA sulla Salinizzazione (da Colonna, Palucci, Iannetta, 2006)



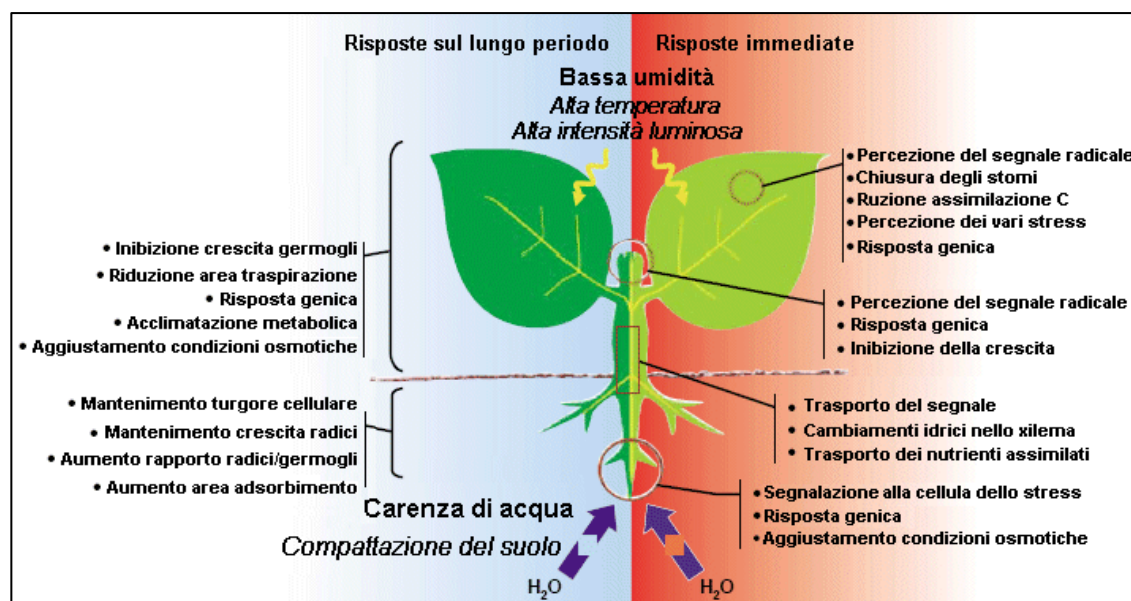
Relativamente alla scelta delle colture agrarie, gli elementi di maggiore criticità ed interesse sono quindi rappresentati da: maturazione precoce, resistenza/tolleranza alla carenza idrica e alla salinità dei suoli. Le colture erbacee più indicate per questi ambienti sono quelle a ciclo autunno-primaverile, periodo in cui la disponibilità di acqua di pioggia è massima e la domanda evapotraspirativa dell'ambiente è minima. Per quanto riguarda la resistenza alla scarsità di disponibilità idrica si possono riportare le seguenti indicazioni orientative:

- frumenti: i duri più resistenti dei teneri; i precoci più dei tardivi;
- orzi: più resistenti dei frumenti;
- avena: le varietà precoci più resistenti delle tardive;
- legumi, in ordine decrescente: fava, lupino bianco, lenticchia, cece, pisello;
- erbai: veccia, favetta, fieno greco, più resistenti del trifoglio incarnato;
- prati, in ordine decrescente di resistenza: sulla, medica, lupinella, trifoglio pratense.

Una migliore comprensione degli effetti della siccità sulle piante è vitale per migliorare sia le pratiche agricole, in relazione ad un ottimale utilizzo delle risorse idriche, che gli sforzi di incrocio e selezione dei "breeders" per ottenere varietà sempre più adattate alle mutate situazioni climatiche.

Molto lavoro in questo campo è stato fatto negli ultimi venti anni per individuare le strategie usate dalle piante, per controllare il bilancio idrico e i processi fisiologici e biochimici, alla base delle risposte in condizioni di deficit idrico e di stress ossidativo. Grandi progressi sono anche stati fatti sull'interpretazione delle relazioni tra struttura e funzione delle foglie e morfologia delle radici in carenza di acqua. Gli strumenti della biologia molecolare e i progetti di genomica, per il sequenziamento completo di alcune specie vegetali, hanno fortemente contribuito ai grandi progressi che sono stati compiuti nella comprensione dei meccanismi molecolari che sono alla base della risposta fisiologica delle piante allo stress abiotico (salinità, carenza di acqua, ecc.). Il quadro che si va delineando è molto complesso, un network in cui sono coinvolte molte vie metaboliche interconnesse a vari livelli, basato su centinaia di geni con attività sia funzionale (per la produzione di proteine che servono a proteggere le cellule dalla disidratazione o dal cambiamento di temperatura) che regolatoria dell'attività di altri geni. Nella figura 40 è descritto lo schema che riassume alcuni dei fenomeni legati alla risposta della pianta allo stress idrico.

Figura 40 - Risposta della pianta agli stress abiotici





Nell'ambito del progetto RIADE dell'ENEA è stato condotto sul grano duro uno studio molecolare di quei geni che a vario livello sono coinvolti nella risposta della pianta alle varie sollecitazioni ambientali e climatiche, quali la siccità, l'alta salinità e le alte temperature (fig. 41).

In particolare è noto in letteratura che i geni DREB, isolati per la prima volta in *Arabidopsis t.*, risultano essere geni-chiave nella risposta allo stress idrico, alla elevata salinità ed al freddo. I geni DREB codificano per fattori di trascrizione che controllano l'espressione di vari altri geni che attivano la "tolleranza" agli stress abiotici, con meccanismi in cui può essere o meno coinvolto l'acido abscissico (ABA). Abbiamo pertanto cercato ed isolato geni DREB-omologhi in diversi genotipi di grano duro.

Le varietà di grano duro (italiane e non, provenienti dal CIMMYT - Messico) esaminate in questo lavoro sono: Creso, Ciccio, Colosseo, Cannizzo, Simeto, Duilio, Gianni, Atil C2000, Karalis e Vitromax. Sono state anche saggiate due varietà di triticale, Pollmer TCL 2003 e LIRON (CIMMYT) ed una linea sperimentale di grano tenero, il giallo-verde. Queste varietà di grano (maggiormente di tipo duro) sono state scelte tra quelle disponibili sul mercato e sono tra le più diffuse, presentando una produttività e dei tratti qualitativi molto interessanti, ovvero sono particolarmente interessanti perchè segnalate tra quelle ad alte rese e più tolleranti alla siccità. In particolare, la cultivar Creso, costituita presso l'ENEA e registrato in Italia nel 1975, ha rappresentato nel nostro paese la più importante cultivar per almeno 20 anni; attualmente rappresenta circa il 20% di tutta la produzione nazionale di grano duro. Ciascuna delle varietà di grano duro esaminate possiede un diverso grado di tolleranza allo stress idrico e differenti caratteristiche biometriche e fenologiche. Sono state utilizzate almeno 10 piante per cultivar analizzata.

In figura 42 sono mostrati materiali vegetali ottenuti nel corso degli esperimenti ENEA.

Figura 41 - Serra controllata presso il centro ENEA Casaccia



Figura 42 - (Sinistra) Confronto tra due piante di DUILIO, a sinistra, il controllo negativo è sempre stato abbondantemente irrigato, mentre a destra, la pianta al 7° giorno di stress. (Destra) Aspetto sofferente di una pianta di CRESO al 7° giorno di stress (da Latini ed al., 2005)





Nel corso di questo lavoro sperimentale, è stato individuato nel grano duro un nuovo gene, denominato *TdDRF1*, appartenente alla famiglia dei geni DREB correlati allo stress idrico, omologo al gene DREB2A di *Arabidopsis*, e caratterizzato da un meccanismo di splicing alternativo analogo a quello del gene *HvDRF1* di orzo.

Parallelamente allo studio in piante soggette a deidratazione in serra controllata, sono in corso esperimenti in campo con questi e altri genotipi (sperimentali e non) di grano duro, per valutare la modulazione dell'espressione di questo gene in condizioni più vicine possibili alla situazione in campo. Tali esperimenti sono stati condotti sia in Italia che presso i campi sperimentali del CIMMYT in Messico, nell'ambito di una collaborazione in atto con l'ENEA (fig. 43). Sono tuttora in corso prove sperimentali in campo presso la stazione sperimentale di Obregon, situata nella zona desertica nel nord ovest del Messico.

Altri campi sperimentali sono stati realizzati presso l'ENEA Casaccia e presso il CRAS (Centro Regionale Agrario Sperimentale, Sardegna) con l'obiettivo di testare situazioni di campo in ambiente mediterraneo più variabile.

Sempre nell'ambito del progetto RIADE dell'ENEA, oltre alle varietà di grano, sono state studiate altre specie di interesse agronomico per un programma di breeding orientato a selezionare quelle varietà capaci di adattarsi meglio ai cambiamenti climatici in atto (fig. 44).

Si tratta di specie già particolarmente adatte agli ambienti del sud Italia, come: Lenticchia (*Lens esculentum*) (culinaria), vari tipi di Fava (*Vicia faba major*, *Vicia faba minor*) e di Lupino (*Lupinus albus* e *Lupinus angustifolius*), Orzo (*Hordeum vulgare*), Cece (*Cicer arietinum*), Carciofo (*Cynara scolymus*), Brassica (*Brassica carinata*) e Cartamo (*Carthamus tinctorius*).

Figura 43 - Campi sperimentali ad Obregon (MX) nella fase di crescita iniziale (a) e di stress (b) (da Latini ed al., 2005)

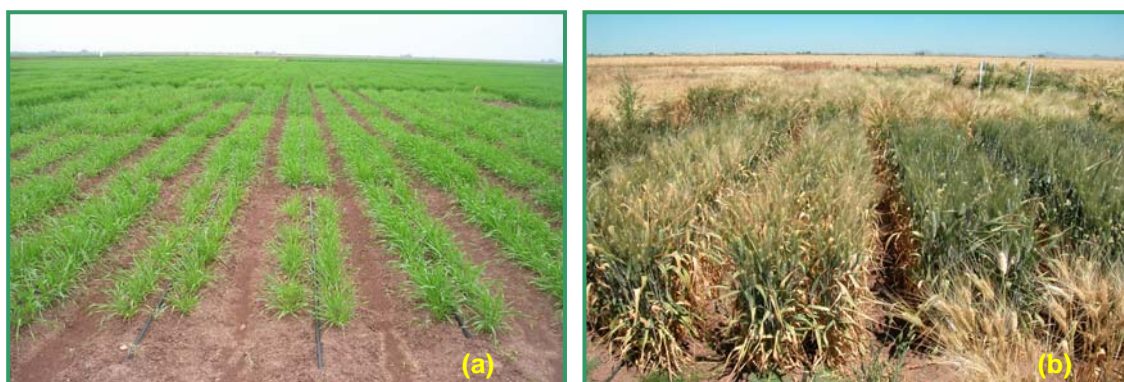


Figura 44 - Piante in serra ENEA CR-Casaccia



### *Ottimizzazione del processo produttivo esistente*

Il sistema produttivo orticolo dell'Italia meridionale sta trovando nella mancanza d'acqua di buona qualità un fattore assai limitante per l'espansione. Ai fini dell'ottimizzazione del processo produttivo già esistente, pertanto, si richiede di razionalizzare al massimo l'apporto di acqua e di fertilizzanti e limitare al minimo necessario, compatibilmente con la qualità dell'acqua irrigua, le perdite per drenaggio e ruscellamento (*runoff*). L'introduzione delle tecniche di coltivazione fuori suolo a ciclo chiuso (con riutilizzo della soluzione drenata dopo apposite correzioni) permette di ridurre l'impatto ambientale della coltivazione in serra sia perché non si rende più necessaria la geosterilizzazione (problema già posto con la proibizione del *bromuro di metile*), sia perché con l'idroponica si ha un sensibile aumento dell'efficienza idrica (intesa sia come minore consumo idrico, sia come maggiore rapporto tra rese produttive e volumi di acqua impiegati - Tabella 3).

Tabella 3 - Water use efficiency (WUE) di una coltura di pomodoro ottenuta in diverse condizioni climatiche e con differenti sistemi di coltura

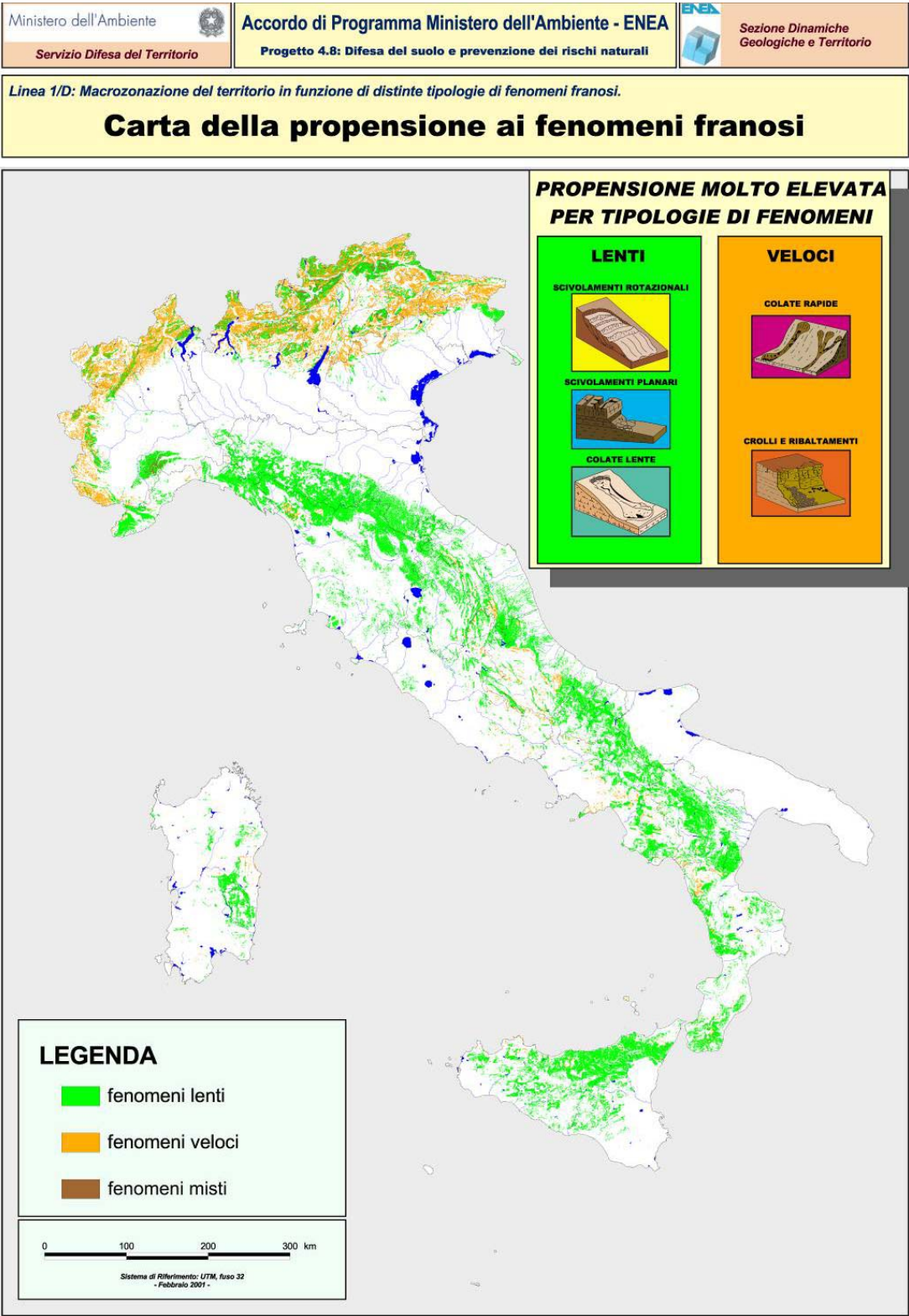
SISTEMA COLTURALE	PAESE	WUE (litri di acqua per kg di peso fresco)
PIENO CAMPO	Israel	60 <sup>1</sup>
	France	70 <sup>2</sup>
SERRA TUNNEL NON RISCALDATA	Spain	40 <sup>1</sup>
	France	40 <sup>2</sup>
	Israel	30 <sup>1</sup>
	Italy ( <i>substrate</i> a ciclo aperto)	42 <sup>3</sup>
	Italy ( <i>substrate</i> a ciclo chiuso)	21 <sup>4</sup>
SERRA IDROPONICA CONTROLLATA	France (ciclo aperto)	25 <sup>2</sup>
	Netherlands (ciclo aperto)	22 <sup>1</sup>
	Netherlands (ciclo chiuso)	15 <sup>1</sup>

[Fonte: 1, Van Os, 2001; 2, Baille, 2001.; 3, Malorgio et al., 1991; 4, Malorgio et al., 2001]

### **2.3 Dissesto Idrogeologico: le Carte Nazionali della pericolosità**

L'ENEA, nel corso della collaborazione con il Ministero dell'Ambiente (1998-2000) sui temi del dissesto idrogeologico e sullo sviluppo di linee guida a sostegno della pianificazione del territorio a fronte del rischio idrogeologico, ha sviluppato una serie di modelli e cartografie a scala nazionale sulla pericolosità da frana. Le cartografie di sintesi, sviluppate per ciascuna tipologia di fenomeno franoso, costituiscono ancora oggi prodotti unici a scala nazionale sugli scenari potenziali della pericolosità da frana (fig. 45). Questi sono stati ricostruiti partendo dall'analisi delle litologie, della morfologia locale e della capacità, per ciascun tipo di terreno, a sviluppare specifiche tipologie di frana. Gli scenari di riferimento sono stati successivamente calibrati sugli inventari di frana disponibili a scala nazionale - con risoluzione dei dati ultradecennale - e sulle Banche Dati ENEA e CNR, in grado di fornire indicazioni spazio-temporali sugli eventi estremi occorsi in Italia a partire dall'anno 1000.

Figura 45 - Carta della franosità potenziale per diverse tipologie di eventi a scala nazionale (da Delmonaco, Leoni, Margottini, Puglisi, 2002)



Rispetto agli scenari potenziali di Cambiamento Climatico attesi nella nostra penisola, possono farsi le seguenti considerazioni.

- a. L'aumento dei fenomeni estremi di tipo meteorico porterà ad un incremento degli eventi di frana del tipo colate rapide di fango/detrito che sono considerate, sia per il loro sviluppo improvviso che per l'elevata mobilità dei terreni dislocati, il fenomeno a più elevata componente di rischio indotto (es. Sarno, 1998); la loro previsione è fortemente dipendente dalla capacità di prevedere fenomeni meteorici intensi a scala locale, mentre i tempi di evacuazione delle popolazioni sono evidentemente molto brevi. Le colate di detrito investiranno in modo particolare l'arco alpino e pre-alpino, l'arco calabro-siciliano ed alcune aree specifiche peninsulari (es. Versilia, Area Sarnese-Penisola Sorrentina). Le colate di fango, sia rapide sia a sviluppo lento, interesseranno tutta la regione appenninica in corrispondenza dei vasti affioramenti di terreni a prevalente componente argillosa.
- b. Si prevede una generale diminuzione dei fenomeni di frana profondi, a fronte di una generalizzata diminuzione dei valori medi di precipitazione, sia annui che stagionali. Gli effetti di tale scenario sulla rete idrografica del territorio nazionale comporteranno una generale diminuzione delle portate medie dei corsi d'acqua, soprattutto nelle aree di pianura, con conseguente diminuzione della pericolosità idraulica.
- c. L'aumento progressivo della temperatura e la conseguente de-glaciazione nelle aree sommitali della catena alpina, causerà un aumento delle frane di crollo, in corrispondenza di affioramenti di rocce a media-alta fessurazione. L'incremento degli sbalzi di temperatura, soprattutto nella stagione invernale, comporterà un aumento generalizzato della pericolosità da crolli anche nelle regioni appenniniche, in corrispondenza di affioramenti di rocce litoidi.
- d. Per quanto riguarda il rischio idraulico, si prevede un aumento nelle fasce montane e pede-montane alpine ed appenniniche dei fenomeni di piena improvvisa (*flash-floods*) che, come per le frane a rapido innesco, hanno un carattere di ampia diffusione nel territorio, elevato rischio indotto per le popolazioni, e capacità predittive dipendenti dalla precisione dei modelli meteorologici di tipo *real-time*. In generale, potrà verificarsi un aumento della pericolosità idraulica, soprattutto nelle regioni centro-settentrionali, quale conseguenza dell'incremento dei fenomeni di precipitazione ad elevata intensità unitamente agli effetti negativi derivanti da crescente urbanizzazione, cambiamenti nell'uso del suolo, incendi, scarsa manutenzione delle aree rurali e forestali.

Un'applicazione a livello locale sul ruolo della variabilità climatica e del dissesto idrogeologico è stata condotta nell'area interessata dal disastroso evento del 19 giugno 1998, quando un evento pluviometrico estremo (450 mm circa in 13 ore), causò vittime ed ingenti danni in un vasto territorio della Versilia.

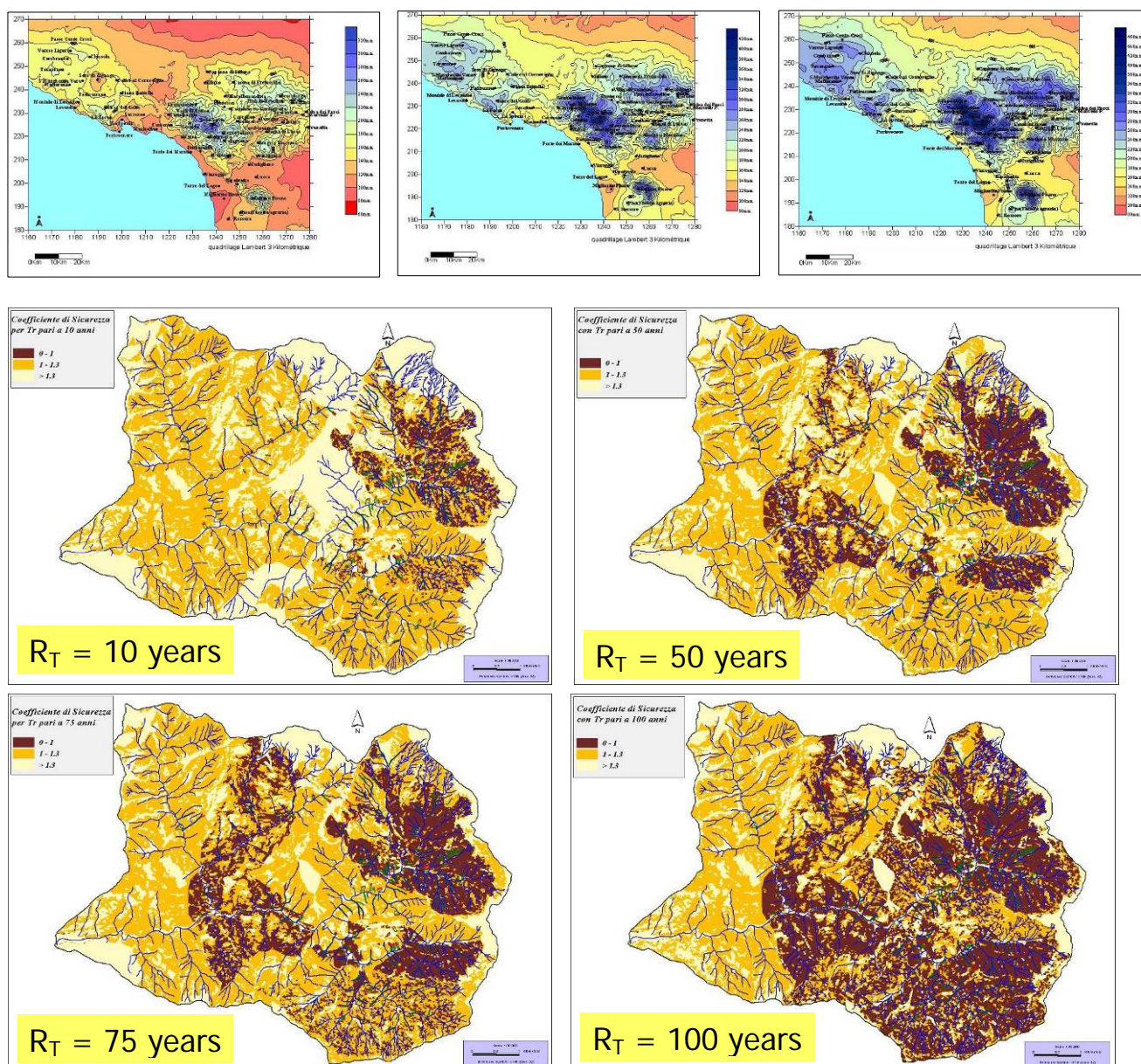
L'ENEA ha sviluppato, per la prima volta, un modello dinamico della pericolosità da frana in considerazione degli scenari previsti a 10, 50, 100 anni (fig. 46).

Gli scenari ricostruiti sono basati su una modellazione dei tempi di ritorno delle precipitazioni costruita su una serie temporale storica di circa 75 anni, senza considerare gli eventuali effetti del Cambiamento Climatico sulle caratteristiche di intensità/durata degli eventi estremi.

Gli effetti di un incremento degli eventi estremi di tipo meteorologico nel futuro comporterà, nel caso analizzato ed a fronte di un sostanziale immutato quadro delle caratteristiche di uso del suolo in quel territorio, un sostanziale peggioramento delle condizioni di stabilità d'insieme, rendendo molto più probabile l'occorrenza degli scenari previsti a 75 e 100 anni nel modello adottato, a tempi molto più brevi.



Figura 46 - Valutazione della pericolosità da frana dinamica costruita su scenari temporali diversi (in basso), sulla base della variabilità climatica a 10, 50 e 100 anni (in alto). (da Delmonaco, Leoni, Margottini, Puglisi, Spizzichino, 2003)



## 2.4 Aree costiere a rischio

La recente individuazione dei complessi movimenti di risalita del mare sulle coste italiane, insieme alla valutazione proiettata per i prossimi anni dell'accelerazione del sollevamento del mare dovuto al riscaldamento globale, assume una notevole importanza per la programmazione delle attività umane future. Il mare si è comportato nel passato (e continuerà a comportarsi nel prossimo futuro) come una sorta di "ammortizzatore", variando costantemente il suo livello sia al variare della radianza del sole misurata al suolo che ad alcuni movimenti geofisici in atto sulla maggior parte delle zone costiere della terra.

L'ENEA ha realizzato la Carta Nazionale delle aree costiere a rischio di allagamento da parte del mare (fig. 47 e tab. 4).



Figura 47 - Mappa nazionale delle aree a rischio di allagamento da parte del mare, da DEM a 20 m (da F. Antonioli e G. Leoni, 2007)

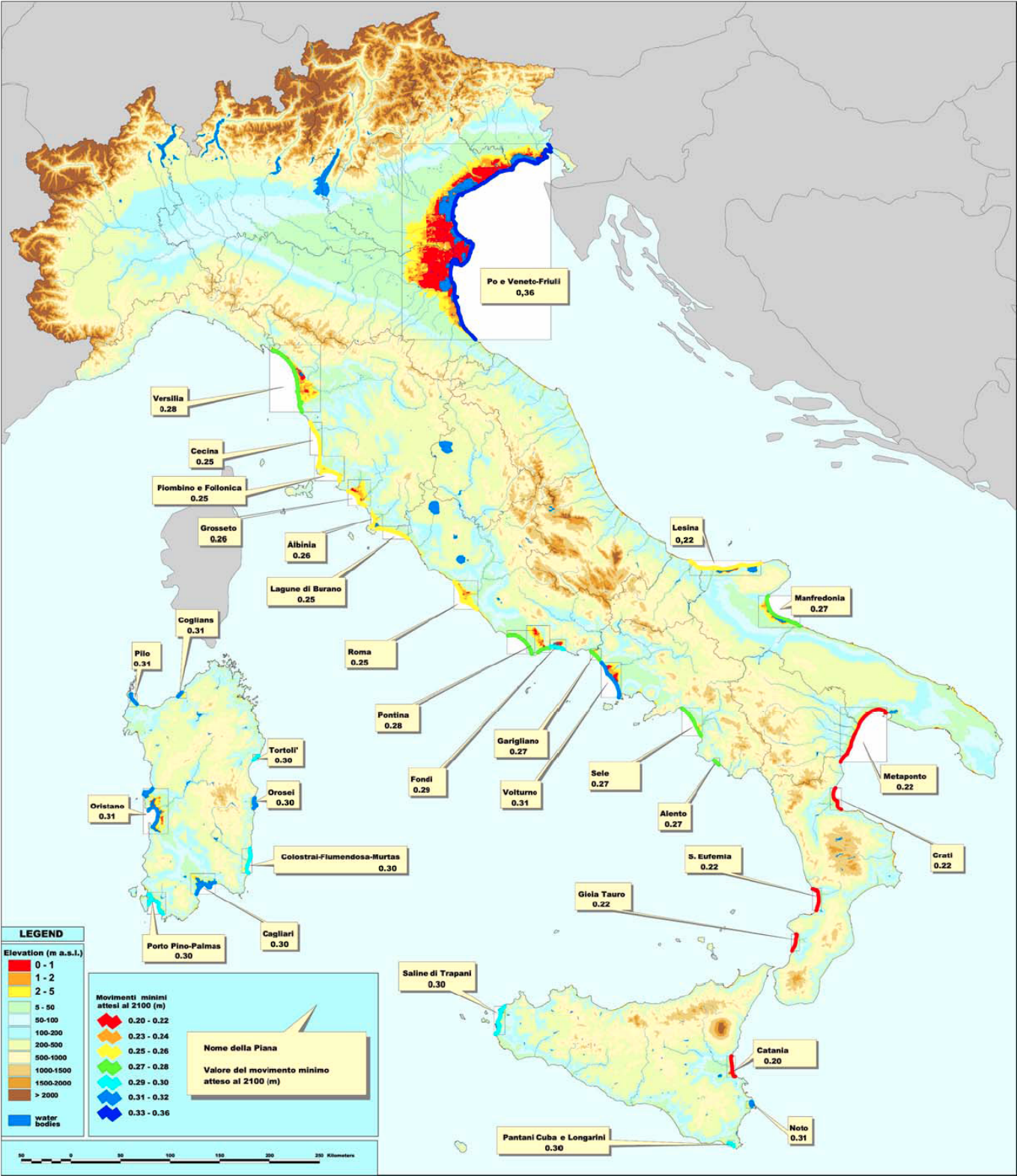


Tabella 4 - I valori min. 0.22 e max. 0.96 ipotizzati per la fine del 21° secolo provengono dal report UE "Impact assessment" pubblicato il 10 gennaio 2007. Le cifre sono arrotondate al secondo decimale. I movimenti attuali (espressi in mm\anno) sono dati dalla somma dei valori isostatici (Lambeck et al 2004a) + tettonici (Ferranti et al 2006) ed eustatici 1.02 (Lambeck et al 2004b) per l'Italia. Per l'area del Po è stato inserito un valore medio. A questi numeri vanno aggiunti quelli di costipazione del suolo e da emungimento di acque e gas. Le località in rosso sono quelle dove l'ENEA ha carotato sondaggi e valutato precisi valori tettonici

SITI costieri	Movimenti attuali	Movimenti attesi al 2100 (metri)	
	Isostatici e tettonici + eustatici (1.02) mm\anno	valore minimo 0.22 m	valore massimo 0.96 m
Po e Veneto-Friuli *	-1,25 +1.02	0,36	1,08
Lesina	-0,30+1.02	0,22	0,99
Oristano	-0,88+1.02	0,31	1,05
<i>Versilia</i>	-0,56+1.02	0,28	1,02
Grosseto	-0,38+1.02	0,26	0,99
Volturno	-0,95+1.02	0,31	1,05
Manfredonia	-0,5+1.02	0,27	1,01
<i>Cagliari</i>	-0,85+1.02	0,30	1,04
<i>Pontina</i>	-0,6+1.02	0,28	1,02
Albinia	-0,4+1.02	0,26	1,0
<i>Fondi</i>	-0,65+1.02	0,29	1,03
Roma	-0,35+1.02	0,25	0,99
Porto Pino-Palmas	-0,8+1.02	0,30	1,04
Pontina Laghi costieri	-0,5+1.02	0,27	1,01
Sele	-0,5+1.02	0,27	1,01
Metaponto	0+1.02	0,22	0,96
Garigliano	-0,5+1.02	0,27	1,01
<i>Catania</i>	+0,2+1.02	0,19	0,94
S. Eufemia	0+1.02	0,22	0,96
Piombino e Follonica	-0,35+1.02	0,25	0,99
Lagune di Burano	-0,35+1.02	0,25	0,99
Crati	0+1.02	0,22	0,96
Colostrai-Flumendosa-Murtas	-0,8+1.02	0,30	1,04
Saline di Trapani	-0,75+1.02	0,30	1,03
<i>Orosei</i>	-0,80+1.02	0,30	1,04
Gioia Tauro	0+1.02	0,22	0,96
Pilo	-0,88+1.02	0,31	1,05
Cecina	-0,25+1.02	0,25	0,99
Tortoli'	0,82+1.02	0,30	1,04
Pantani Cuba e Longarini	-0,75+1.02	0,30	1,03
Alento	-0,5+1.02	0,27	1,01
Coglians	-0,85+1.02	0,31	1,04
Noto	-0,85+1.02	0,31	1,04

Le valutazioni ed i numeri che scaturiscono da questa carta sono da considerarsi come fase preliminare di uno studio ben più dettagliato. Prima che le Amministrazioni regionali o provinciali prendano in considerazione eventuali ipotesi di adattamento sono infatti necessarie, in tutte le aree considerate a rischio, indagini di dettaglio nonché valutazioni sul comportamento naturale delle coste al variare del livello del mare. La risposta è molto diversa a seconda del variare di alcune caratteristiche fisiche locali come, la portata dei solidi dei fiumi, la presenza o meno di dune costiere, le correnti marine, gli impatti antropici.

L'Italia è situata in un'area geologicamente attiva, dove movimenti isostatici e tettonici (movimenti della costa) e di subsidenza antropica si sommano a quelli eustatici (scioglimento dei ghiacci). Le coste Mediterranee (46.000 km) e soprattutto quelle italiane (7.700 km) presentano, in relazione al rischio di allagamento da parte del mare, diversi fattori negativi.

#### Arretramento della linea di costa

Per la quantificazione delle variazioni del limite terra - mare, intercorse negli ultimi 40 anni, per derivare scenari quantitativi (su base geomorfologica) della perdita attesa nei prossimi 10 anni, discriminando le aree a evoluzione antropica prevalente da quelle ad evoluzione naturale predominante, è stata messa a punto una metodologia in ambito internazionale con relative applicazioni al territorio italiano: Puglia (copertura completa delle province di Lecce, Taranto e Brindisi), Basilicata ionic, Molise (fig. 48).

Figura 48 - Valutazione dell'arretramento della linea di costa (linea blu) atteso per il prossimo 2010 in Molise (foce del Fiume Biferno) in relazione alla perdita di dune costiere (tratteggio in giallo) - Simulazione dinamica (da Valpreda et al, 2006)



Oltre alla valutazione della mera mobilità della linea di costa (che viene tradizionalmente studiata come geoindicatore della complessa serie di fattori che, combinandosi in un processo dinamico, determinano la tendenza evolutiva delle zone sabbiose costiere) è stato sviluppato un modello morfologico di valutazione quantitativa delle variazioni della morfologia delle aree litorali e di simulazione (nel breve termine) della loro tendenza futura.

Nel fare ciò viene messa in relazione non solo la tendenza dinamica, valutata quantitativamente in base a spostamenti relativi nel tempo della linea di costa, ma anche la dimensione (ampiezza) della spiaggia (considerata come il bene in possibile perdita) e così pure vengono considerati gli elementi di resilienza morfologica, cioè le dune costiere.

La loro attuale presenza e stato di conservazione fornisce indicazioni per la corretta valutazione del rischio del sistema costiero all'erosione e all'allagamento, come pure per la valutazione della capacità del sistema di rispondere ai cambiamenti indotti da eventi potenzialmente dannosi.

Inoltre la particolare modalità operativa di valutazione quantitativa della tendenza evolutiva di un tratto di costa (hazard) consente di esprimere, spazialmente, l'area di possibile perdita in precisi intervalli di tempo e, con la classificazione dei beni ivi presenti, consente di esprimere il valore economico della perdita attesa. Le valutazioni vengono effettuate con criteri di classificazione molto dettagliati e anche con l'utilizzo di tecniche composite di analisi di uso del territorio (image processing ad alta risoluzione, tipo Quik Bird) e rilievi di tipo strutturale su edifici e strutture.

Sul tema delle dune costiere sono state svolte attività di ricerca applicata per lo sviluppo di metodi innovativi di mitigazione del rischio di allagamento, tramite la realizzazione di dune costiere armate (lavoro svolto sulla foce del Po con l'Università di Ferrara e la Protezione Civile della Regione Emilia Romagna).

A scala nazionale è stata invece coordinata la realizzazione di un censimento sulle dune costiere sabbiose in Italia confluito in un Atlante GIS (lavoro svolto in collaborazione con 11 atenei italiani e con il supporto esterno del Ministero dell'Ambiente e del Territorio - Difesa del Suolo - che ha consentito la realizzazione interattiva dell'Atlante sulle basi cartografiche del Portale Cartografico Nazionale).

Rispetto agli scenari potenziali di Cambiamento Climatico attesi nella nostra penisola, dagli studi sinora effettuati, si possono fare le seguenti considerazioni:

- le verifiche quantitative sull'evoluzione del trend di erosione costiera recente e le simulazioni di evoluzione in aree costiere fortemente interessate da opere di difesa a mare (fig. 49) hanno evidenziato una maggiore vulnerabilità a fenomeni di arretramento che, nei casi studiati, appaiono in diretta relazione con il cedimento strutturale di opere idrauliche a mare (es: argini), in conseguenza di eventi meteorici "eccezionali" (ciò evidenzia il problema della valutazione della frequenza degli eventi e della loro intensità nei parametri di dimensionamento delle opere ingegneristiche).
- Nelle aree non controllate dalle opere di difesa o da altre opere umane (che interagiscono modificando la dinamica locale del litorale) i nostri studi hanno evidenziato la presenza di un trend di arretramento più lineare nell'ultimo trentennio, innescato sostanzialmente dal mancato apporto di sedimenti a mare, intrappolati nelle opere di ritenzione idraulica dei bacini (fig. 50). Ciò evidenzia la rilevanza di valutare anche un adeguamento della normativa vigente che di fatto rende difficile intervenire per riequilibrare l'apporto dei sedimenti.



Figura 49 - Esempio di erosione parossistica (1999-2005) conseguente al cedimento delle opere idrauliche in occasione di eventi meteoroclimatici di rilevanza superiore alla media e che si sono imposti all'arretramento del litorale indotto da cause "antropiche" (in primis, in questo caso, la diminuzione dei sedimenti trasportati dai corsi d'acqua) (da Valpreda et al., 2006)

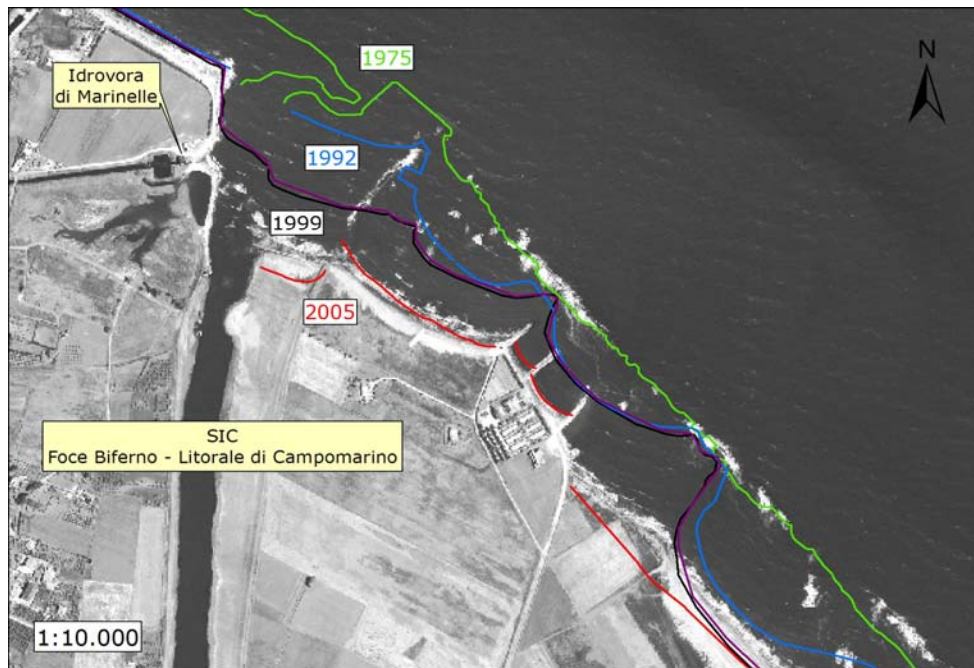
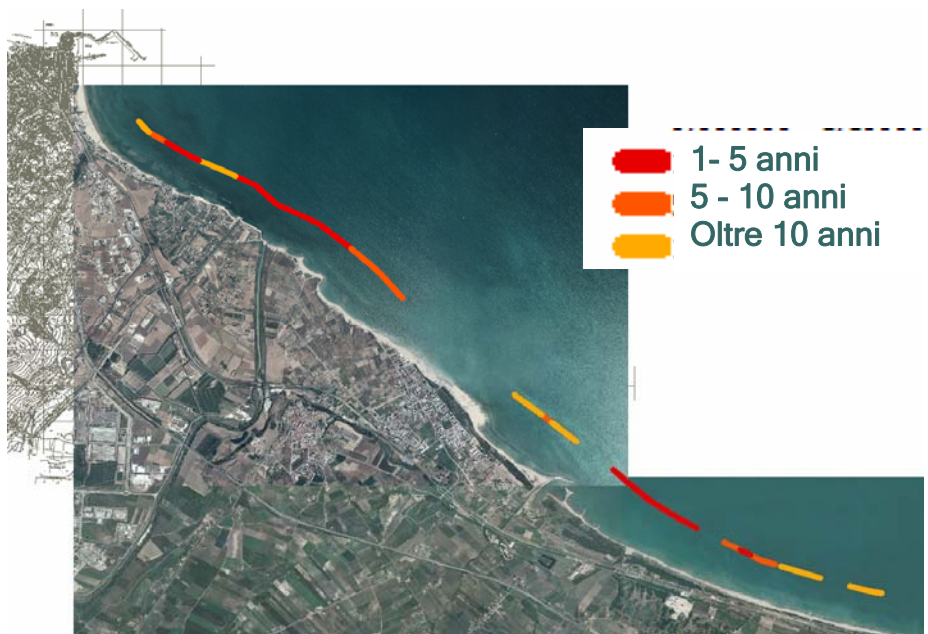


Figura 50 - Esempio di valutazione dei tempi (numero di anni) previsti per la di perdita totale delle attuali spiagge sabbiose - in Molise - calcolata in forma di metri di perdita/anno in ambiente GIS, sulla base delle tendenze rilevate. I dati sono stati acquisiti ed elaborati per ogni 50 metri di distanza a terra in modo da fornire elementi significativi per la pianificazione degli interventi di mitigazione e da risultare adatta alla scala di lavoro nominale 1:10.000 (da Valpreda et al., Progetto Interreg- Littorisk- 2006)

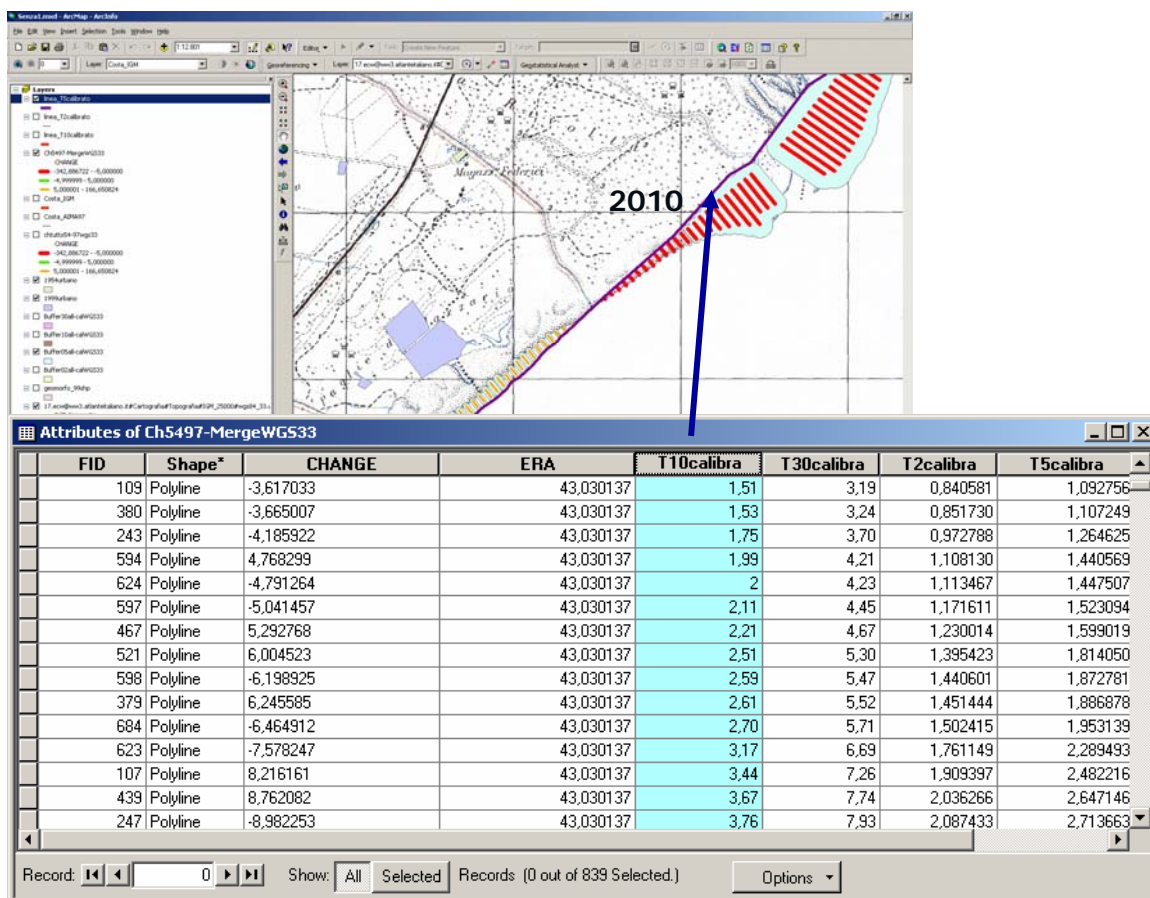




### Considerazioni generali:

1. In ambito costiero risulta fondamentale discriminare le valutazioni di scenari di evoluzione a breve, medio e lungo termine (fig. 51). I cambiamenti di frequenza ed intensità dei fenomeni meteorologici assume un ruolo predominante nelle valutazioni di effetti a breve termine, mentre la valutazione delle morfologie costiere attuali evidenzia la rilevanza della subsidenza antropica a medio e lungo termine, ove si associa pienamente agli effetti del sollevamento del mare.
2. L'adattamento ai cambiamenti climatici esprime l'esigenza di trasferire modi "non tradizionali" di intervenire per mitigare il rischio. Gli studi hanno evidenziato come sia stata spesso controproducente la presunta azione antropica di mitigazione e che è ancora lontano il necessario trasferimento di tecnologie innovative disponibili, quali i brevetti della comunità scientifico-industriale internazionale (es. il dewatering), ma anche di cultura tecnico-scientifica maturata con le esperienze in atto (INTERREG III C- LITTORISK- OCR NOE) con casi di studio in Italia, Francia, Grecia e Portogallo.

Figura 51 - Simulazione al 2015 delle aree di litorale che saranno perse (area azzurra) o progradate (area gialla) nel litorale della Basilicata Ionica, in base a valutazioni di arretramento/progradazione lineare (transetti in rosso), indicati nella colonna evidenziata in azzurro in metri di variazione attesa per il 2010 (da Valpreda et al., Progetto ARCHEOMAR- Ministero Beni Culturali- 2006)



## 2.5 Biodiversità

### Perdita di Biodiversità Vegetale

La flora e la vegetazione di un territorio sono in equilibrio con i fattori ambientali che agiscono su di esso; fluttuazioni o variazioni dei parametri chimico-fisici dell'ambiente, indotti da cause naturali oppure antropiche, innescano risposte nella composizione floristica delle comunità vegetali. Tali modificazioni possono manifestarsi in modo drastico con l'alterazione più o meno spinta degli ecotopi oppure possono avvenire in modo graduale, quando gradualmente e lenti sono i processi di trasformazione, quali ad esempio i cambiamenti climatici globali attualmente in corso.

Da circa un ventennio si assiste, a livello planetario, ad un progressivo riscaldamento climatico, che interessa complessivamente tutti gli ambienti terrestri, ma è in alta montagna che il riscaldamento dell'atmosfera produce effetti più evidenti sulla vegetazione di quelli rilevabili alle quote più basse. In ambito alpino il ritiro dei ghiacciai, la diminuzione delle precipitazioni nevose, la minor permanenza della neve al suolo, l'aumento della franosità, determinano di conseguenza cambiamenti nella distribuzione delle specie vegetali. Molti sono gli studi italiani che forniscono questo tipo di informazioni. Ci si attende che specie e comunità microterme, la cui espressione e distribuzione sono fortemente determinate da fattori climatici estremi, mostrino delle risposte, in media, più rapide rispetto alle specie mesofile, contraddistinte invece da una maggiore ampiezza ecologica. In definitiva le specie microterme si trovano a quote sempre più alte per un problema di adattamento al cambiamento climatico.

Nei sistemi mediterranei, il cambiamento si manifesta in perdita di biodiversità e questo processo influirà soprattutto sulle superfici più vulnerabili quali piccole isole, coste, zone aride e semiaride, zone a bassa altitudine, che mostreranno un continuo e progressivo impoverimento a favore di specie esotiche di climi caldi aridi.

Il bacino del Mediterraneo è uno dei 25 punti caldi "hotspot" per la biodiversità del nostro pianeta e un punto molto importante per la flora europea. Le isole e la riva Sud del Mediterraneo sono i territori per i quali maggiormente si teme l'aumento di temperatura e gli effetti che questo può determinare sulla biologia riproduttiva delle piante, in particolare per quanto riguarda le condizioni di germinazione.

I cambiamenti climatici, quindi, influenzano la composizione, la struttura e la dinamica della biodiversità e degli ecosistemi, ma in scala locale e regionale gli ecosistemi terrestri possono modulare alcuni valori del clima come la temperatura e le precipitazioni attraverso i processi di evapotraspirazione delle formazioni vegetali.

### *Le specie a rischio della flora italiana*

Nell'ambito del progetto RIADE l'ENEA ha applicato una metodologia integrata per lo studio dei processi di desertificazione mediante l'analisi dei vari livelli di organizzazione della componente vegetale del sistema ambientale: le specie, la vegetazione, il paesaggio.

L'ENEA ha svolto analisi storiche dei cambiamenti in Sicilia e Basilicata sulla base dello studio strutturale della vegetazione degli ultimi 80 anni, che ci hanno fornito un quadro esaustivo sul rapporto tra la velocità e l'importanza in termini quali-quantitativi del cambiamento e il livello di destrutturazione del sistema, da cui è anche possibile prevedere l'esistenza o meno di una potenzialità di conversione del trend. Molte infatti sono le situazioni individuate dove il livello di fragilità del sistema ha raggiunto valori limite (fig. 52).

Le attività di rilevamento, svolte dall'ENEA, mirano inoltre a stabilire delle correlazioni tra i dati acquisiti a terra, con specifiche campagne di misura sulla vegetazione e i dati telerilevati con diversi sensori satellitari ed aviotrasportati (fig. 53). Le differenti scale spaziali e temporali integrate tra loro ci permettono di stabilire importanti relazioni non solo con i cambiamenti climatici in atto, ma anche con le serie storiche degli ultimi 25 anni.

Figura 52 - Carta delle specie a rischio di estinzione nel meridione d'Italia (da Menegoni, 2007)

### Le specie a rischio di estinzione come bioindicatori di fenomeni di cambiamento

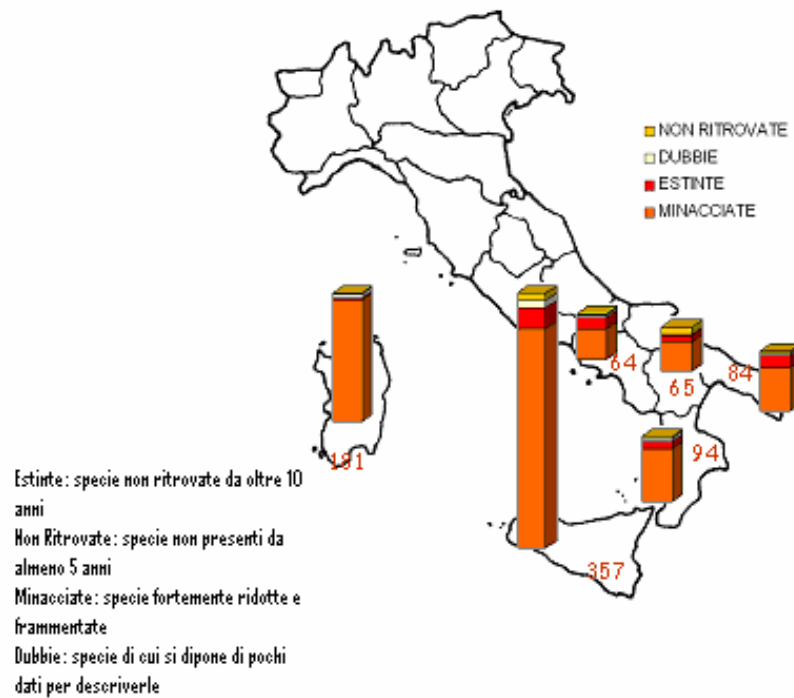


Figura 53 - Sovrapposizione ed integrazione di dati da sensori satellitari ed aviotrasportati (da Giordano. et al., 2006)



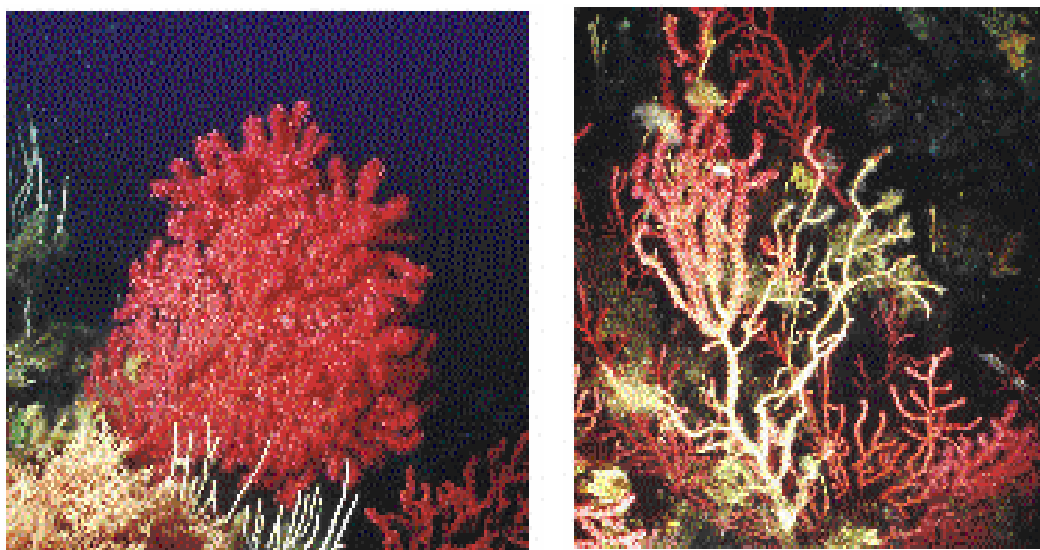
### Impatto sulla biodiversità marina

La ricorrenza di anomalie termiche, come quelle recentemente registrate nel Mediterraneo, può agire come un importante fattore di disturbo per gli ecosistemi marini costieri. Gli episodi di mortalità di massa registrati in concomitanza con tali eventi di anomalia termica sono stati riportati principalmente a carico di quelle specie bentoniche definite 'ecosystem engineers' o comunque specie strutturanti la comunità, la cui complessità strutturale determina fortemente il grado di biodiversità dell'ecosistema. In questo caso, la principale preoccupazione relativa agli effetti della mortalità di massa sulla conservazione della biodiversità riguarda principalmente la perdita a livello di comunità biologica, oltre che la sopravvivenza di una particolare specie. Date le caratteristiche di bassa resilienza, lenta capacità di recupero, basso tasso di crescita, scarso successo riproduttivo delle specie strutturanti molte comunità bentoniche, una completa valutazione dell'impatto dell'anomalia termica richiede un monitoraggio a lungo termine, in considerazione dell'esistenza sia di un effetto immediato ma anche dell'effetto ritardato che si esplica sulla struttura e dinamica della comunità stessa.

L'ENEA ha monitorato gli effetti delle anomalie termiche registrate nella tarda estate del 1999 e del 2003 su una comunità bentica di pregio nel Mar Ligure orientale. Gli episodi di mortalità di massa a carico di molti invertebrati marini hanno interessato una vasta area geografica, dall'Arcipelago Toscano alle coste del sud della Francia, provocando complessivamente una perdita superiore al 50% in termini di densità e biomassa di molte specie bentoniche. Sulla base degli studi effettuati dall'ENEA nel periodo precedente i due eventi, è stato possibile determinare quantitativamente l'impatto, analizzare la persistenza degli effetti nel tempo, individuando l'effetto ritardato e, per alcuni parametri, distinguendo la sovrapposizione degli effetti determinati dai due eventi ripetuti a distanza di 4 anni (fig. 54).

In collaborazione con l'Università di Pisa e il CNR, sono in corso attività di monitoraggio finalizzate ad analizzare le potenzialità di recupero da parte di una comunità fortemente compromessa, quali l'analisi della potenzialità riproduttiva e la possibilità di apporti larvali laterali. I risultati serviranno per sviluppare modelli demografici utili alla comprensione delle conseguenze degli impatti sulla capacità di sopravvivenza e per mettere a punto modelli predittivi sulla futura persistenza delle specie, in considerazione della variabilità della frequenza di eventi di anomalia termica.

Figura 54 -La gorgonia *Paramuricea clavata* prima e dopo l'evento di mortalità avvenuto in concomitanza con l'anomalia termica del 1999 nel Golfo di La Spezia (Mar Ligure orientale, Cupido et al., 2006)



Le evidenze di mortalità legate alle anomalie termiche a livello globale hanno fatto registrare mortalità non solo a carico dei coralli tropicali ma anche di quelli mediterranei. ENEA ha proseguito, a partire dai primi segnali nel 1997, il monitoraggio della mortalità in collaborazione con istituti stranieri di ricerca (fig. 55).

Uno degli effetti del riscaldamento delle acque è stato il diffondersi di specie 'invasive' mai rinvenute nel Mediterraneo o limitate ad aree geografiche ritenute mediamente più calde. Tra le specie invasive di origine tropicale sono note a livello bentico le alghe verdi del genere *Caulerpa* (*Caulerpa taxifolia* e *Caulerpa racemosa*) che sono state monitorate da ENEA fino dai loro primi ritrovamenti in collaborazione con istituti di ricerca italiani e stranieri (fig. 56). Tale effetto, soprattutto a carico di *Caulerpa racemosa*, costituisce un segnale evidente dei cambiamenti in atto nel bacino. La valutazione dell'impatto dei cambiamenti a carico delle comunità biologiche è ancora lacunosa, anche se l'allarme a livello scientifico è alto data la veloce propagazione dell'alga in quasi tutti i settori del Mediterraneo.

Purtroppo a livello nazionale sono state scarse le iniziative progettuali coordinate e multidisciplinari finalizzate alla comprensione e analisi dei cambiamenti in atto, che considerino aspetti dinamici degli ecosistemi e non solo aspetti descrittivi. Prevalgono inoltre studi di rilevanza locale e/o condotti per brevi periodi, mentre è indispensabile che i monitoraggi e le ricerche sugli ecosistemi marini siano effettuati alle appropriate scale spaziali e temporali.

Figura 55 - Mortalità parziale nei coralli mediterranei *Cladocora caespitosa* e *Balanophyllia europaea* (da Rodolfo-Metalpa et al., 2000)

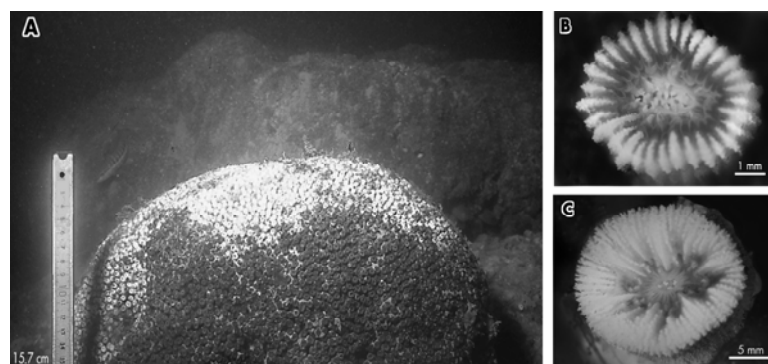
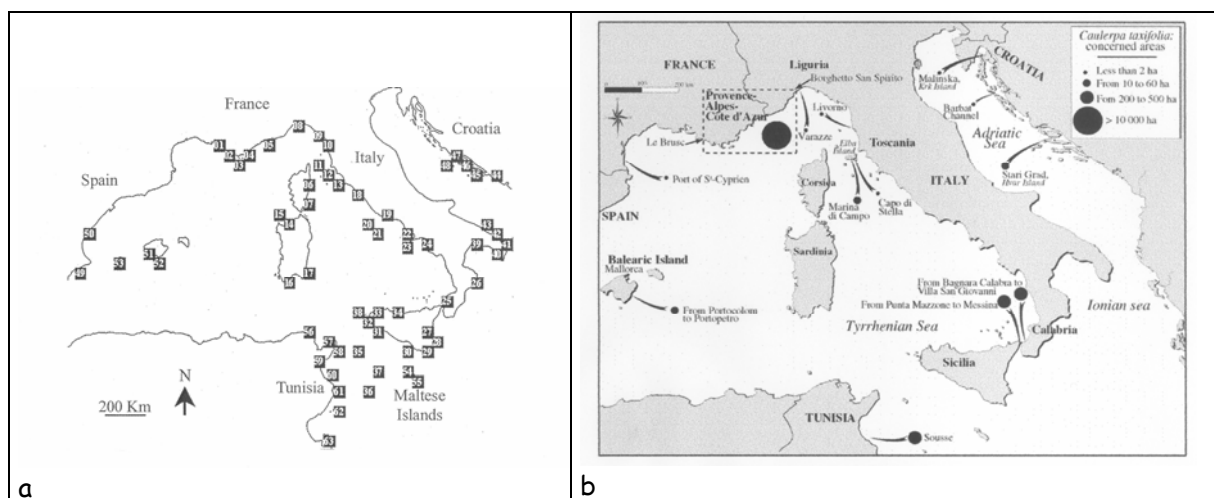


Figura 56 - a) Distribuzione dell'alga tropicale *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* nel Mediterraneo occidentale nel 2003 (da Piazza et al., 2005). b) Status dell'invasione dell'alga tropicale *Caulerpa taxifolia* nel Mediterraneo nel 2000 (da Meinesz et al., 2000)





## 2.6 La strategia ENEA di Adattamento flessibile ai Cambiamenti Climatici

L'ENEA ritiene importante proporre l'applicazione di concetti di trasversalità ed integrazione tra molti ambiti disciplinari per mettere in campo una "*strategia di adattamento flessibile*" al cambiamento climatico e ai relativi effetti, in funzione della resistenza e resilienza dei diversi ecosistemi naturali e delle specifiche relazioni con l'attività antropica sul territorio.

Gli interventi dovranno concentrarsi su alcuni aspetti rilevanti:

- (a) riduzione della vulnerabilità ai problemi legati al cambiamento climatico (desertificazione, dissesto idrogeologico, aree costiere a rischio, perdita di biodiversità) che risultano oggi urgenti e che potrebbero essere esacerbati in futuro;
- (b) rafforzamento della ricerca sulle possibili conseguenze ambientali del cambiamento climatico e sui relativi effetti socio-economici;
- (c) ampliamento delle attività di monitoraggio per essere in grado di predisporre strategie di allerta in merito agli effetti "pericolosi" del mutamento del clima e, se necessario, riorganizzare le priorità dell'adattamento nel caso in cui gli effetti negativi dovessero manifestarsi più velocemente o fossero più pericolosi del previsto.

Un tale approccio adattativo ai rischi dei cambiamenti climatici contribuirebbe a risolvere i problemi più urgenti di oggi e, nel frattempo, puntellerebbe la nostra capacità di affrontare la futura sfida del mutamento climatico.

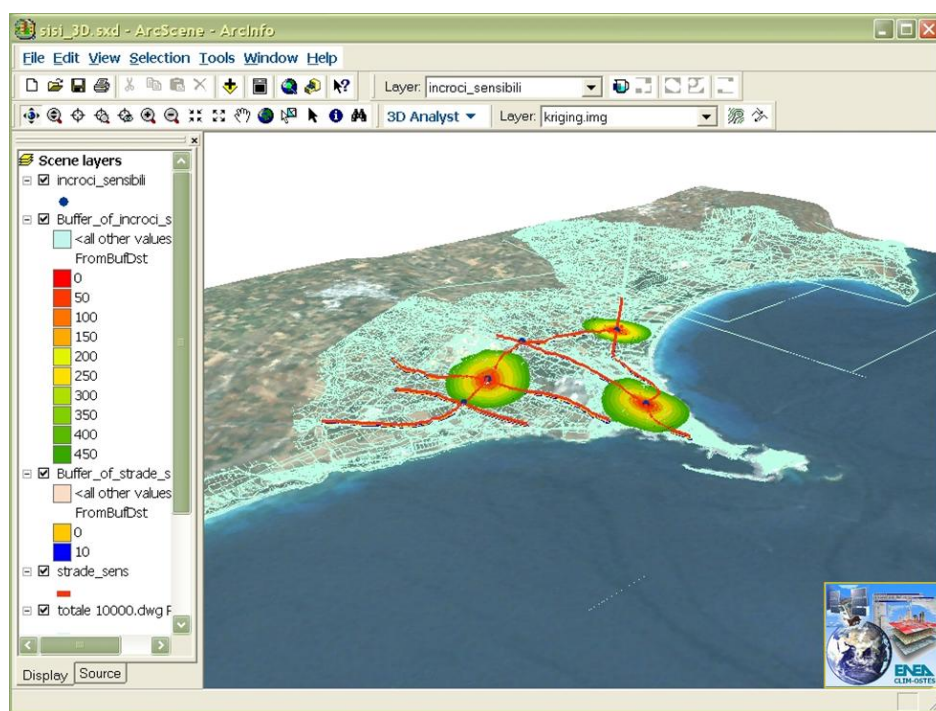
### 3. STRUMENTI TECNOLOGICI PER LE VALUTAZIONI DI IMPATTO E LA GOVERNANCE

Questo filone di attività persegue l'obiettivo generale della progettazione e realizzazione di sistemi informativi geografici, quali strumenti di supporto alle decisioni inerenti le politiche di salvaguardia e programmazione del territorio nella prospettiva dello sviluppo sostenibile.

Il contributo fornito da tali strumenti innovativi per valutare la vulnerabilità del territorio a fronte dei Cambiamenti Climatici (CC) e per pianificare conseguenti misure di adattamento riguarda la realizzazione di un sistema informativo geografico di nuova concezione dedicato alla analisi "diagnostica" del territorio piuttosto che ad indicare forme e modalità per la sua pianificazione. Finora nell'ambito dei sistemi informativi i dati territoriali sono stati elaborati prevalentemente per fini pianificatori. In questo caso, invece, si sta attuando un diverso ed originale approccio concettuale: progettare e sviluppare un sistema informativo (hardware e software) che attui la scansione sistematica del territorio nazionale, o parte di esso, analizzando le informazioni che lo descrivono e restituendo una sorta di "radiografia" che faccia emergere la localizzazione geografica di siti vulnerabili alle potenziali conseguenze calamitose dei CC. Da un'ottica di tipo puramente pianificatorio si passa, pertanto, ad una di tipo diagnostico, per la quale si rende preliminarmente necessario definire precisi fattori di criticità o vulnerabilità del territorio a fenomeni indotti dai CC (erosione dei suoli, stabilità dei pendii, esondazione dei corsi d'acqua, innalzamento del livello del mare, etc.).

Il sistema informativo, una volta eseguita la raccolta, l'archiviazione e la gestione di tutte le informazioni geografico-territoriali atte a fornire una descrizione "virtuale" del territorio (dettagliata ed aggiornata), ne esegue una "scansione" il cui risultato finale è la localizzazione e la mappatura dei cosiddetti "siti vulnerabili" individuati. Per "sito vulnerabile" si intende una zona circoscritta di territorio in cui coesistono strutture e/o infrastrutture antropiche (strade, edifici, impianti, ferrovie, ecc) e/o fattori/elementi ambientali (frane, corpi idrici, ecc) tali da generare potenziali situazioni di rischio in circostanze derivanti, soprattutto, dagli effetti dei CC (vedi fig. 57).

Figura 57 - Esempio di individuazione e mappatura di "siti vulnerabili" sul territorio (zone cerchiata) (da Della Rocca et al., 2006)



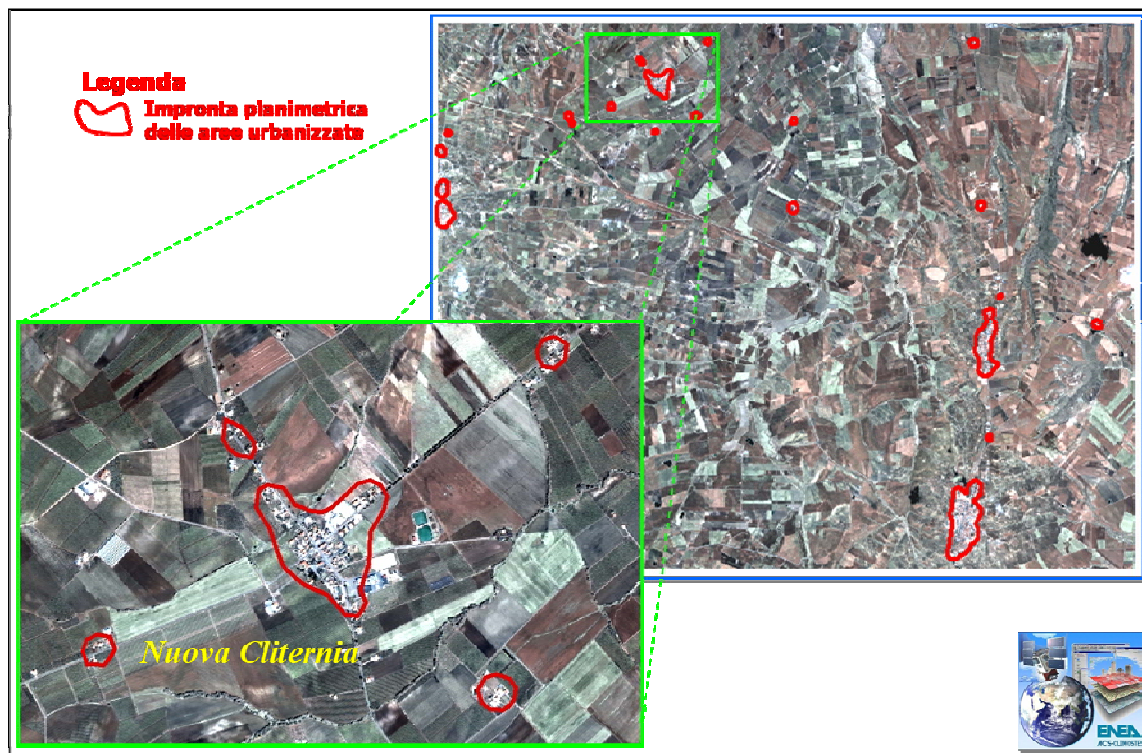
Per raggiungere tale obiettivo, è necessario l'impiego di elaboratori particolarmente dotati in termini di capacità di calcolo ed in grado di processare e gestire l'enorme mole di dati necessari allo scopo. A valle di tale scansione è possibile, laddove necessario, studiare provvedimenti mirati per la salvaguardia del territorio, della popolazione in esso residente e delle infrastrutture presenti. Tutto ciò si inserisce, altresì, in un'ottica di adattamento alle conseguenze dei CC, attuata tuttavia non in conseguenza diretta di un evento calamitoso già verificatosi ma con una prospettiva di tipo previsionale, i cui benefici in termini di salvaguardia di vite umane e di riduzione dei danni economici sono assai rilevanti.

Per studiare e fronteggiare efficacemente le complesse problematiche inerenti i fenomeni dei Cambiamenti Climatici (CC) è necessario disporre di una grande e aggiornata mole di dati e misure, sia sinottiche che di dettaglio, che devono essere elaborate e rese direttamente fruibili per la comprensione dei fenomeni stessi, per la calibrazione e la validazione della relativa modellistica, nonché per la valutazione dell'impatto dei cambiamenti sul territorio e per il supporto alla programmazione del suo sviluppo. Un insieme così articolato e pregnante di informazioni si ottiene solo con il concorso dei moderni sistemi di osservazione aerospaziale della Terra, unitamente alla capacità di predisporre sistemi informativi che sappiano porre in sinergia le riprese con una variegata molteplicità di dati cartografici e socio-economici. In questo quadro l'ENEA affronta organicamente le problematiche di studio e ricerca connesse con il processo di utilizzo e di mutua integrazione delle tecnologie e dei sistemi sopra citati, in modo da progettare e realizzare soluzioni d'avanguardia e funzionali rispetto alle esigenze del Paese e della sua Pubblica Amministrazione.

#### Un applicativo in aree urbane

Negli ultimi decenni gli agglomerati urbani hanno vissuto notevoli cambiamenti che, tra l'altro, hanno condotto ad un cospicuo aumento della loro estensione superficiale e ad una sua significativa variazione di morfologia e di riflettività del suolo (albedo). Tali trasformazioni, inoltre, sono state così rapide che spesso non hanno ancora riscontro nelle cartografie. Nella generalità dei casi l'*impronta planimetrica* di un agglomerato urbano è ben diversa dall'area racchiusa dai suoi confini amministrativi e risulta formata dalla effettiva distribuzione sul territorio di edifici e strutture urbane in senso lato (Perimetro dell'edificato). Conoscere l'andamento cartografico aggiornato di tale perimetro costituisce un presupposto indispensabile per la pianificazione e programmazione territoriale anche al fine di fronteggiare gli effetti dei CC. È importante quindi mettere a punto nuovi sistemi tecnologici con cui poter ricavare le informazioni suddette in modo efficace, rapido, accurato e più economico rispetto agli usuali strumenti. Il raggiungimento di questo obiettivo tecnico-scientifico è stato affrontato dall'ENEA attraverso l'acquisizione di un'immagine ad altissima risoluzione geometrica al suolo (ca. 70cm) ripresa dal satellite QuickBird, in un'area campione al confine tra Puglia e Molise, che è stata sottoposta ad un articolato processo di elaborazione appositamente progettato. L'innovativa metodologia di elaborazione si è articolata in numerosi passi che, partendo dal riconoscimento degli edifici condotto sulla base della loro forma geometrica e della loro contiguità con zone d'ombra, è proseguita col calcolo della loro rispettiva estensione superficiale, per concludersi con la stima della distribuzione territoriale della densità di edificato (intesa come metri quadrati di edifici per ogni metro quadrato di territorio). I valori puntuali di tale densità sono stati infine utilizzati per generare i poligoni che delimitano l'estensione delle aree urbanizzate. I risultati conseguiti sono illustrati nella Figura 58 che visualizza una scena ripresa dal satellite QuickBird di lato 16 km ca. Il riquadro verde, invece, è un ingrandimento di una porzione dell'area test e riporta in rosso l'impronta planimetrica stimata per l'aggregato urbano in essa presente.

Figura 58 - L'immagine QuickBird e l'impronta planimetrica degli agglomerati urbani (da La Porta et al., 2004)



#### *Ricostruzione dei modelli 3D degli edifici in aree urbane*

Dall'impronta planimetrica si passa ai parametri geografici necessari per descrivere a scala catastale la geometria 3D dei singoli edifici (lunghezza e altezza delle loro facciate), che costituisce una sentita esigenza da parte di numerosi pianificatori delle aree urbane per molte applicazioni, prime fra tutte quelle inerenti gli studi di impatto dei CC e di adattamento ai loro effetti. Gli usuali sistemi di aerofotogrammetria stereoscopica sono in grado di soddisfare egregiamente tale esigenza, ma richiedono ancora un notevole e faticoso impegno di fotointerpretazione e misurazione da parte di specialisti, sia pure assistiti da computer in grado e misura variabile.

In questo contesto, l'obiettivo principale delle attività di ricerca svolte da ENEA è quello di progettare e realizzare strumenti e metodi atti ad ottenere direttamente in formato digitale i suddetti parametri tridimensionali di aree urbane, riducendo drasticamente l'intervento dell'operatore umano ed i relativi costi e tempi di realizzazione. La problematica nel suo insieme è stata affrontata secondo un approccio teorico-sperimentale assolutamente originale, articolato in tre punti principali:

- generazione del modello digitale delle elevazioni (DEM) del suolo supposto privo di edifici.
- estrazione del DEM contenente le altezze degli edifici relative ad un riferimento assoluto (livello medio del mare).
- confronto numerico tra i due DEM precedentemente ottenuti.

In tal modo è stato possibile ottenere l'altezza netta degli edifici rispetto al piano stradale, nonché tutti i parametri geometrici e geografici dei singoli edifici.

Il passo successivo è consistito nello sviluppo e nella realizzazione di metodologie, finalizzate a rendere fotorealistica la ricostruzione dei prospetti degli edifici nonché di consentire la navigabilità in rete degli interi modelli virtuali 3D del tessuto urbano così realizzati (fig. 59). Tali modelli sono stati utilizzati *on line* per applicazioni prototipali di monitoraggio urbano (stima e controllo delle volumetrie degli edifici), nonché di pianificazione urbana (gestione del piano regolatore, valutazione di impatto ambientale, ecc.).



In sintesi, si può asserire che il punto centrale dei risultati conseguiti è costituito dal DataBase georeferenziato dell'area urbana (fig. 60). In esso, infatti, sono stati memorizzati un gran numero di dati, immagini ed elementi cartografici vettoriali, che - nel loro complesso - permettono di formare la ricostruzione 3D e fotorealistica della rete di edifici dislocati nella zona d'interesse.

Figura 59 - Il modello 3D di un'area test di Roma (in alto a destra) ed un esempio di restituzione visiva delle cortina urbana di Via Britannia (in basso a sinistra) (da Pollino et al., 2005)

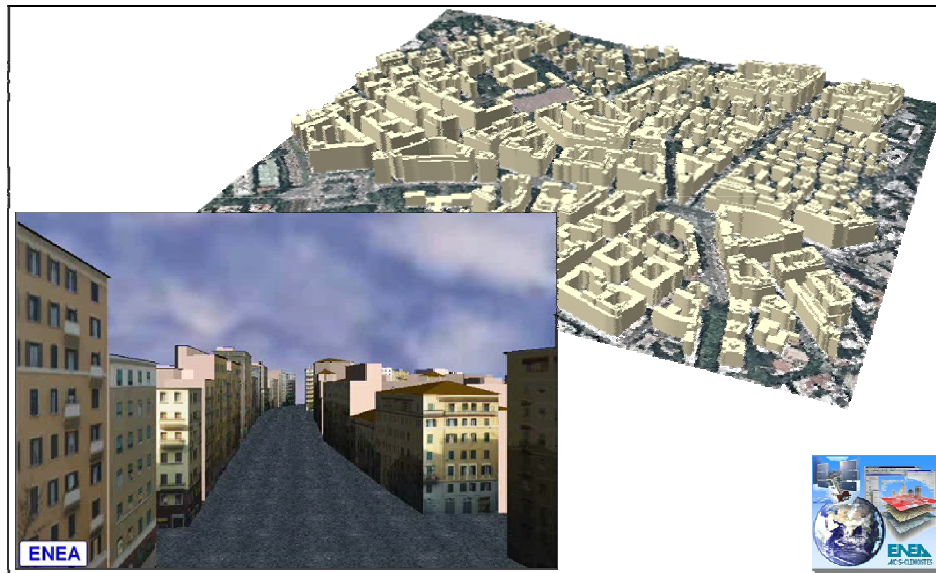
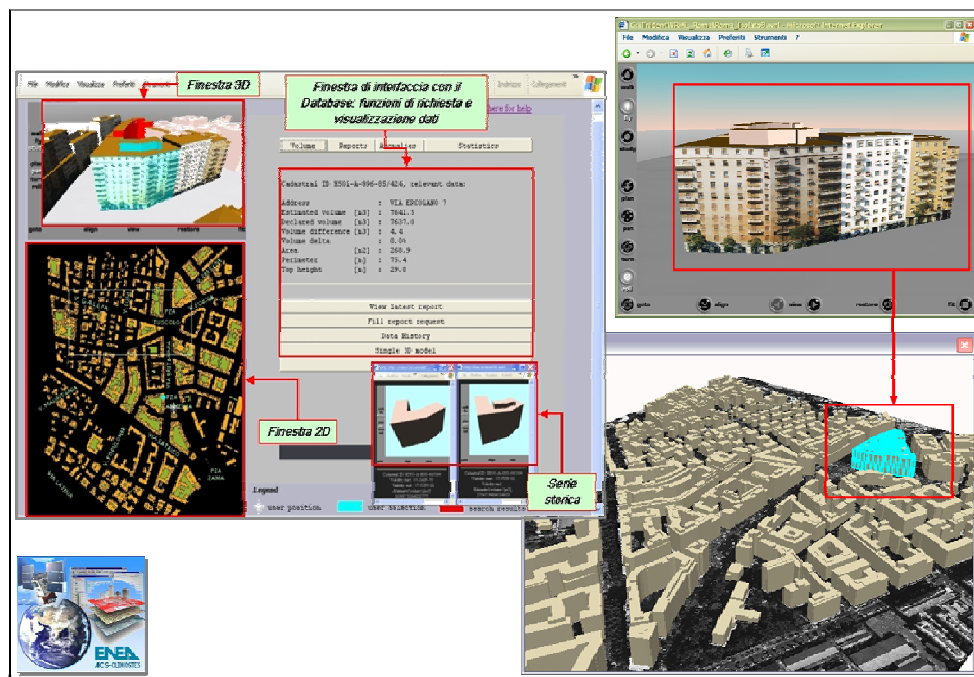


Figura 60 - Al modello urbano 3D è legato il Geo-Database georeferenziato contenente i dati geometrici e gli attributi descrittivi degli edifici (da Pollino et al., 2005)





#### 4. CONSEGUENZE ECONOMICHE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI: CASI DI STUDIO ENEA

In questo capitolo si riporta quanto fatto dall'ENEA nello sviluppo di approcci innovativi di analisi economica degli effetti derivanti dall'impatto dei Cambiamenti Climatici che, partendo dalla ricostruzione degli scenari di rischio atteso sul territorio italiano a medio-lungo periodo, portano alla valutazione socio-economica del danno conseguente.

##### 4.1 La piana di Fondi

Nell'ambito di una collaborazione tra ENEA e Ministero dell'Ambiente è stato effettuato nel 2003 uno studio multidisciplinare applicato alle conseguenze economiche delle variazioni attese del livello del mare nella Piana di Fondi (fig. 61) su proiezioni temporali del 2050 e 2100. La scelta è caduta su questa piccola Piana per la notevole depressione che raggiunge i -3 m, per la limitata superficie dell'area a rischio e per la conoscenza geologica da parte di ENEA che nel 1988 aveva prodotto la carta geomorfologica.

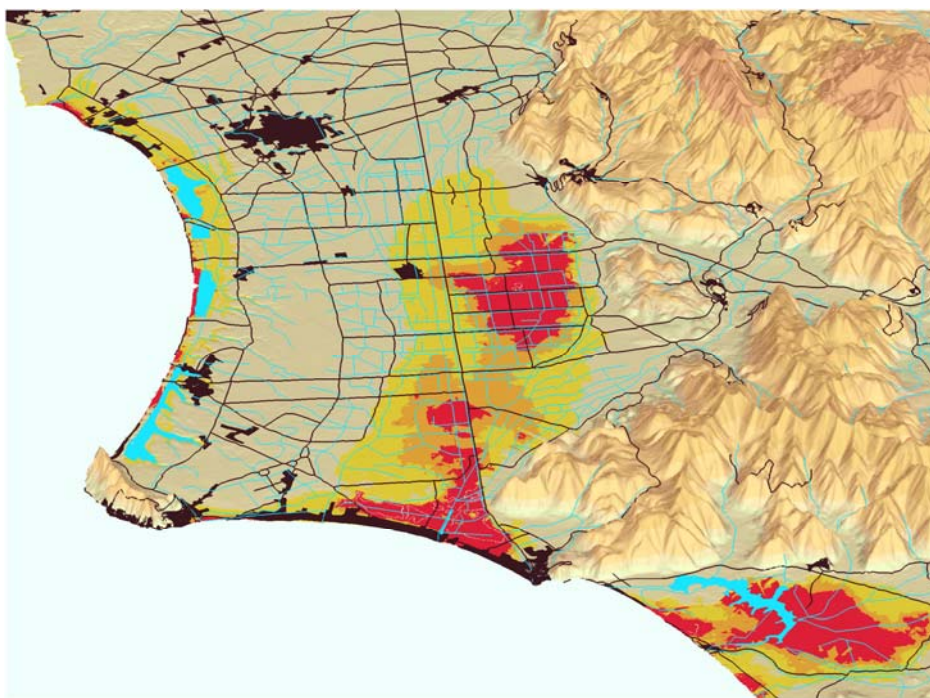
Questa ricerca ha avuto lo scopo di verificare l'opportunità di azioni di adattamento all'innalzamento del livello del mare nella Piana di Fondi, con un'ottica strettamente economica ed è concettualmente riconducibile al problema della minimizzazione dei costi totali dell'impatto dei cambiamenti climatici. Il problema è in questo caso semplificato perché:

- non si considerano costi di mitigazione, la cui inclusione non è significativa in studi a carattere locale.
- in caso di adattamento, il danno residuo è ipotizzato pari a zero; mettendo in atto opportune misure di protezione delle terre a rischio di allagamento, si assume che non vi sarà alcuna perdita di valore di tali aree in seguito all'innalzamento del livello del mare.

Date queste premesse, l'adattamento si giustifica, da un punto di vista di *cost efficiency*, se si verifica la seguente condizione:

$$\text{Costo adattamento} < \text{danno conseguente all'impatto}$$

Figura 61 - Le Pianure di Fondi e Pontina e le aree topograficamente depresse, con gradualità decrescente dal giallo al rosso (da F. Antonioli 2003)



Il danno conseguente all'impatto consiste nel valore economico della terraferma a rischio di allagamento. In altre parole, si assume che, nel caso di assenza di adattamento, tutta l'area che entro il 2100 sarà sotto il livello del mare andrà perduta.

Il valore attuale di tutta l'area a rischio di allagamento nell'orizzonte temporale 2002-2100, stando alle nostre ipotesi, varia in un range compreso fra circa 130 e 268 milioni di euro, a seconda dello scenario (low o high), del tasso di sconto (3% o 1%) e del limite superiore od inferiore dell'intervallo (per molte variabili è stato utilizzato un intervallo di valori anziché un valore puntuale).

È importante sottolineare come i valori ricavati siano molto sensibili ad eventuali modificazioni di destinazione d'uso del territorio.

Il fine ultimo dell'analisi è quindi stato quello di stabilire se l'adozione di misure di protezione delle aree sotto il livello del mare comporti un maggiore o minore dispendio di risorse rispetto all'ipotesi di non intervento.

I risultati ottenuti dall'applicazione della metodologia sopra descritta inducono a trarre le seguenti conclusioni:

- Il già ben sviluppato sistema di bonifica della piana di Fondi permetterà di raccogliere le sfide poste dal previsto innalzamento del livello del mare, con costi incrementali assai minori rispetto al valore del danno potenziale.
- L'analisi di altre piane esposte ad un maggior rischio di allagamento e/o con sistemi di difesa meno sviluppati potrebbe evidenziare una cost-inefficiency dell'adattamento (ossia, costi di adattamento > danno conseguente all'impatto).
- È auspicabile un'analisi interdisciplinare (desiderabilità socio-politica, studi tecnici, analisi economica, ecc.) quando si considerano opzioni di adattamento complesse.
- I costi per difendere le attuali posizioni della costa appaiono paragonabili al valore di quanto insiste sulle aree a rischio.

#### **4.2 La Regione Abruzzo**

Nel 2005 è stata stipulata una convenzione tra l'ENEA e la Regione Abruzzo per effettuare uno studio di fattibilità per la valutazione della vulnerabilità e degli impatti delle variazioni climatiche sulla regione, con relative ipotesi di adattamento. La ricerca, durata un anno, ha prodotto i risultati che vengono riassunti di seguito.

##### *Vulnerabilità delle coste*

Per individuare i movimenti relativi mare\costa è stato effettuato uno studio pilota presso la foce del fiume Sangro dove si trovano alcune aree costiere depresse. Lo studio ha preso in considerazione tutti i parametri necessari a valutare i movimenti relativi mare\costa. Conoscendo 1) il sollevamento eustatico globale del mare Adriatico (circa 1 mm\anno) dovuto in parte ad espansione termica ed in parte allo scioglimento dei ghiacci, 2) l'abbassamento isostatico (circa 0.3 m\anno), si è cercato di determinare la terza incognita, quella dovuta a cause tettoniche. È stato effettuato un sondaggio a poche centinaia di metri dalla linea di riva. Pur non avendo raggiunto recenti sedimenti marini, il sondaggio ha comunque permesso di stabilire che l'area costiera del Sangro, non ha subito negli ultimi 12.000 anni rilevanti movimenti tettonici di abbassamento. Gli attuali movimenti relativi del mare quindi sono stati valutati in circa 13 mm\anno. In seguito a valutazioni sull'accelerazione del sollevamento del mare dovuta all'effetto serra abbiamo stabilito un sollevamento compreso tra 30 e 80 cm per il 2100. Tale numero è stato immesso nel DEM della Piana del Sangro (insieme a numerose altre considerazioni) ed il risultato è stato quello di un moderato rischio di allagamento (in rosso nella mappa della Figura 62) sia da parte del mare che da parte del Sangro.

Figura 62 - Vulnerabilità integrata dell'area costiera della Valle del Sangro (da Rapporto ENEA per la convenzione ENEA - Regione Abruzzo)

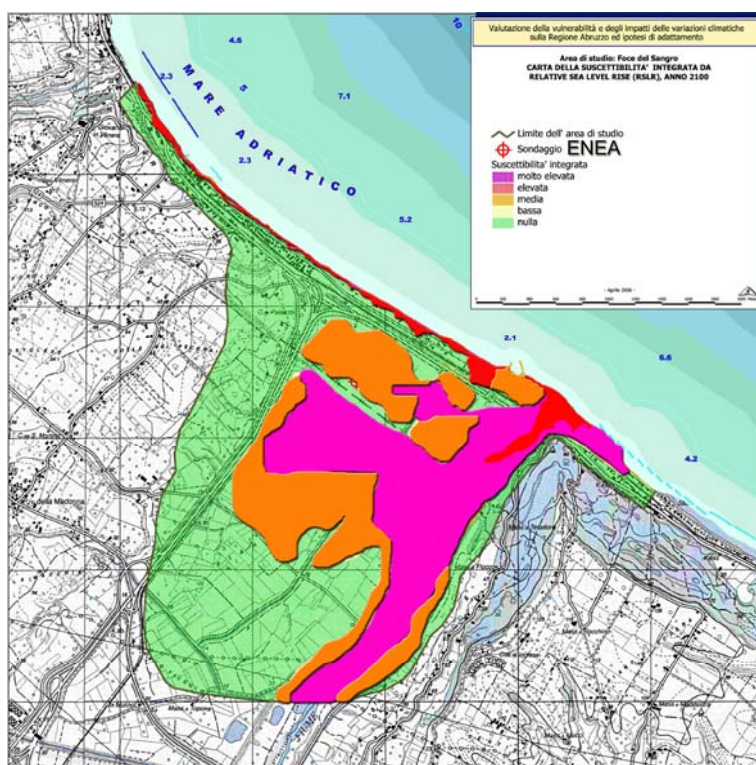
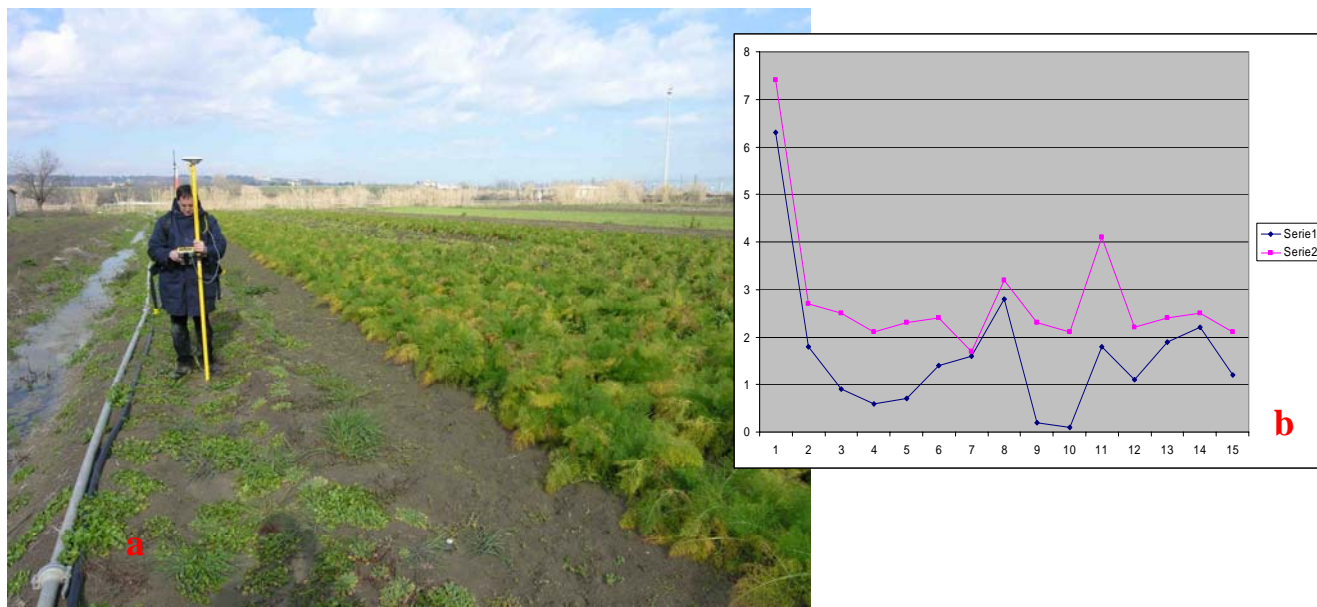


Figura 63 - Controlli della quota topografica effettuati con stazione totale nella pianura del Sangro (a) hanno evidenziato differenze tra le quote della mappa CRT e quelle misurate fino a 1,5 metri (b). (da Rapporto ENEA per la convenzione ENEA - Regione Abruzzo)



Precisi rilievi GPS effettuati dalla nostra equipe hanno però rilevato errori (rispetto alla CRT scala 1:5000 della Regione Abruzzo) nelle quote dell'area costiera dell'ordine del 100%. Differenze così grandi (dell'ordine del metro) possono chiaramente inficiare le valutazioni attese per il 2100 (fig. 63). Da segnalare che molte altre aree costiere Abruzzesi che presentano potenzialmente rischio di essere allagate, devono essere tettonicamente valutate.

### *Sistema atmosferico e marino*

Lo studio di fattibilità riguardante i cambiamenti climatici, in atto e futuri, sul territorio regionale ha preso in considerazione i parametri meteo-climatici superficiali più significativi: precipitazione e temperatura. Questo lavoro è un esempio di approccio metodologico al problema dei cambiamenti climatici a scala regionale. Per quanto riguarda i cambiamenti climatici in atto sono stati elaborati i dati di stazione messi a disposizione dalla Regione Abruzzo, per quel che concerne invece gli scenari futuri sono state analizzate le informazioni più recenti disponibili nella letteratura scientifica.

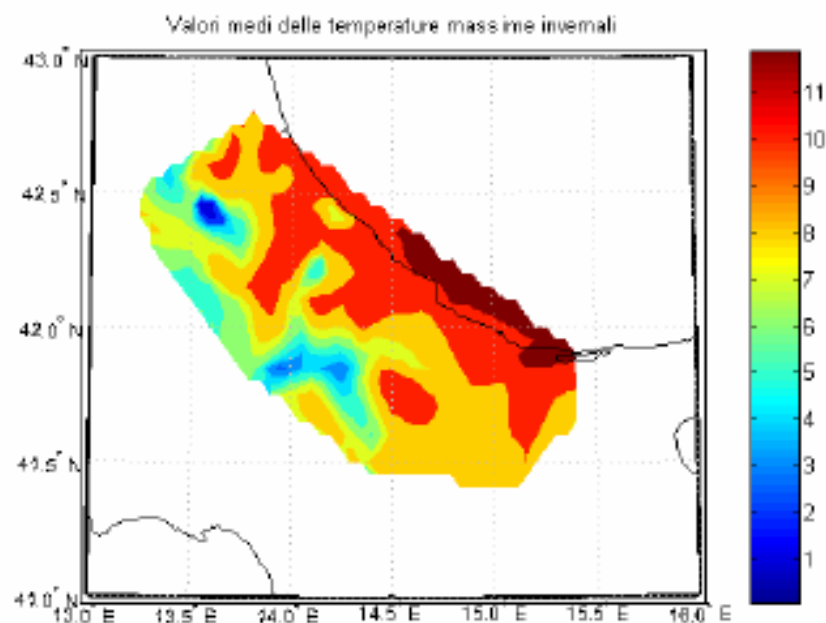
*Per quanto riguarda i cambiamenti climatici in atto, sintetizziamo i risultati per precipitazioni e temperature:*

precipitazioni, le due stagioni, in cui un numero significativo di stazioni hanno mostrato evidenza di cambiamenti, sono l'inverno e l'autunno. Durante l'inverno si registra anche un dato tendenziale regionale positivo per le medie, mentre in autunno il dato è negativo.

temperature superficiali (fig. 64), le due stagioni con significativi cambiamenti sono l'inverno e l'estate. Nel caso della temperatura massima si registra una tendenza all'aumento mediamente su tutto il territorio esaminato. In estate l'aumento sfiora un grado centigrado. Le temperature minime mostrano un aumento significativo solo in estate.

*Per quanto riguarda i cambiamenti climatici futuri (2071-2100), le tendenze sulla penisola italiana sono state estrapolate dalle mappe di tendenza disponibili nelle più recenti pubblicazioni scientifiche del progetto Europeo PRUDENCE. Il cambiamento climatico sulle temperature ha un segno positivo sia per il periodo invernale che per quello estivo, evidenziando un aumento delle temperature medie rispetto al periodo di controllo (1961-1990). Per quanto riguarda le precipitazioni, non vi è un segno univoco per il periodo invernale, mentre nel periodo estivo si osserva una tendenza media alla diminuzione delle precipitazioni.*

Figura 64 - Valori medi delle temperature massime invernali - si registra una tendenza all'aumento mediamente su tutto il territorio esaminato - da elaborazione dei dati forniti dalla regione Abruzzo (da Rapporto ENEA per la convenzione ENEA - Regione Abruzzo)





### *Problemi di vulnerabilità sul territorio montano ed intermontano*

Gli studi condotti dal gruppo di ricerca sul dissesto idrogeologico in relazione ai cambiamenti climatici, nell'ambito della convenzione ENEA-Regione Abruzzo, sono stati prevalentemente indirizzati alla definizione di un approccio metodologico, nella forma di linee guida, per la valutazione della pericolosità, vulnerabilità e rischio da frana e alluvione su due distinti livelli: una scala regionale ed un approccio applicabile a scala locale e/o di sito (singolo evento naturale).

Il modello è stato calibrato sulle seguenti criticità:

- le modificazioni nel tempo degli eventi estremi, principalmente di tipo meteorico, in termini di intensità/durata/localizzazione geografica, come pure il contributo che tali modificazioni possono provocare ai meccanismi di innesco di fenomeni quali alluvioni, frane, erosione costiera (pericolosità);
- il rapporto tra assetto socio-economico ed eventi estremi (vulnerabilità);
- il costo per il recupero funzionale degli ecosistemi (valore);
- il danno atteso per determinati scenari di pericolosità (rischio).

A scala regionale, partendo dai dati dei PAI attualmente in vigore, sono state elaborate 2 distinte metodologie per la valutazione della pericolosità, vulnerabilità e rischio attraverso un approccio dinamico in cui le variazioni climatiche e quelle legate agli scenari socio-economici sono state maggiormente sviluppate. A scala locale sono stati analizzati i casi di studio dell'area della foce del F. Pescara, per i fenomeni idraulici, e di Caramanico Terme per le dinamiche di versante, effettuando un'operazione di *down-scaling* della metodologia.

In conclusione, lo studio sul dissesto idrogeologico nella regione Abruzzo rispetto agli scenari climatici ha evidenziato:

- l'importanza di un rigoroso approccio metodologico, dalla ricerca dei dati fino alla loro elaborazione, in grado di superare ed aggiornare gli attuali riferimenti metodologici e legislativi relativi al rischio idrogeologico ed alla pianificazione territoriale;
- l'influenza, a scala regionale, delle variabili climatiche in rapporto alle tipologie di frana, individuando un possibile incremento nel futuro di fenomeni di frana soprattutto superficiali in terreni coesivi di natura argillosa;
- la possibilità, soprattutto a scala locale, di individuare soglie critiche di precipitazione per l'innesco di fenomeni franosi ed alluvionali;
- l'importanza della vulnerabilità strutturale e non strutturale per la valutazione dei rischi, anche a fronte di una sostanziale stabilità nel tempo degli scenari di pericolosità;
- la possibilità di realizzare, sia a scala regionale sia a scala locale, scenari dinamici di pericolosità, vulnerabilità e rischio integrato attraverso l'implementazione di DB e mappe tematiche aggiornabili nel tempo.

Infine, si vuole sottolineare che la pianificazione del territorio deve opportunamente considerare la possibilità di un incremento futuro dei danni derivati dagli eventi estremi sostanzialmente dovuti alle criticità attuali e future dei sistemi antropici rispetto alla pericolosità naturale del territorio abruzzese.

### *Problemi di vulnerabilità sull'uomo e sulle attività produttive*

La metodologia di valutazione dei costi del cambiamento climatico, proposta per la Regione Abruzzo e applicata al caso della Foce del Sangro, usa un approccio *multiscenario*, considerando scenari futuri di rischio derivante dal cambiamento climatico e di assetto socio-economico alternativi. L'analisi si riferisce a scenari futuri relativi all'anno 2100. Tale approccio permette di tenere in considerazione l'incertezza esistente sulla futura evoluzione del clima, nonché sulla possibile evoluzione del contesto socio-economico. In particolare, la metodologia di valutazione analizza i possibili costi diretti del Cambiamento Climatico, sulla base di diversi scenari di rischio di perdita di suolo, a seguito di un innalzamento del livello del mare o di un aumentato rischio alluvionale, che rappresentano due fattori di pericolosità importanti date le caratteristiche del territorio in esame. Per quanto riguarda gli scenari socio-economici futuri, lo studio ipotizza un incremento della valenza turistica dell'area costiera. Per



ciascuno scenario futuro considerato, la metodologia di valutazione stima il valore dei possibili danni diretti sul territorio, mentre si limita ad un'analisi qualitativa degli eventuali impatti indiretti.

Lo studio dimostra come la sovrapposizione dei soli effetti diretti conseguenti al cambiamento climatico, che considera solo la perdita di suolo senza analizzare eventuali impatti sulla produttività né danni ad infrastrutture ed impianti industriali, possa impattare le economie locali in modo considerevole, comportando perdite tali da suggerire l'eventuale adozione di misure di adattamento.

L'analisi di sensitività condotta per i diversi scenari di rischio individuati porta ad una quantificazione del solo danno diretto di 68 milioni di euro nel caso più ottimistico e di 78 milioni di euro per quello più pessimistico. In tali scenari, i settori che risulterebbero maggiormente colpiti dagli effetti del cambiamento climatico sarebbero il settore domestico con una perdita di suolo adibito ad insediamento residenziale variabile tra 38 milioni di euro e 45 milioni di euro ed il settore industriale con una perdita di suolo variabile tra 28 milioni di euro e 35 milioni di euro.

D'altro canto, anche l'analisi di sensitività relativa a possibili cambiamenti nell'assetto socio-economico futuro del territorio, che ipotizza in particolare un incremento della valenza turistica dell'area, mostra come l'entità dei danni sia fortemente dipendente da quelle che saranno le future condizioni socio-economiche dell'area esaminata, legate alle decisioni delle amministrazioni locali riguardanti la pianificazione e la destinazione d'uso del territorio.

Tra gli altri, la prevenzione del rischio idrogeologico (priorità ambientale in tutto il territorio nazionale) appare estremamente importante per evitare l'aggravarsi dei possibili impatti futuri di un eventuale innalzamento del livello del mare. Analogamente, una pianificazione territoriale attenta alle evoluzioni future del rischio ambientale, potrà scongiurare danni economici ingenti, ed anzi minimizzarli, ad esempio incentivando la riconversione della attuali attività produttive in attività in grado di assorbire meglio i possibili rischi indotti dal cambiamento climatico.

Questi risultati mettono quindi in luce il carattere strategico dell'analisi dei possibili impatti futuri del cambiamento climatico e la necessità che il processo decisionale, sia per la definizione dei consueti atti e documenti programmatici di amministrazione e gestione del territorio, sia per la definizione delle priorità di intervento in tema di prevenzione del rischio, considerino sin d'ora i risultati forniti da studi approfonditi sui possibili effetti del cambiamento climatico, come quello presente.

I risultati forniti dal presente studio, che ha finalità di supporto alle decisioni e che rappresenta una prima ed innovativa applicazione pilota della metodologia elaborata per la Regione Abruzzo, potranno in futuro essere estesi ad altre porzioni di territorio ed approfonditi onde fornire indicazioni di ulteriore dettaglio sui possibili costi economici, anche indiretti, del cambiamento climatico a livello locale.

## CONCLUSIONI

Le attività di ricerca sui cambiamenti globali e la simulazione degli impatti sugli insediamenti umani e sull'ambiente causati dal clima, richiedono un complesso sistema di integrazione fra differenti discipline scientifiche e socio-economiche. Non vanno sottovalutate le incertezze che tuttora sussistono nei meccanismi che regolano il sistema climatico e che influenzano l'attendibilità delle simulazioni sulla vulnerabilità del territorio nazionale.

L'ENEA ha un sinergico sistema di laboratori interdisciplinari con un'esperienza ultra-ventennale nelle ricerche sui cambiamenti climatici, che vanno dal monitoraggio allo studio della variabilità climatica in vari contesti ambientali e alle simulazioni per la produzione di scenari e la valutazioni dei relativi impatti. L'ENEA può quindi mettere a disposizione del sistema paese le sue competenze per supportare le conoscenze e le politiche di contrasto dei Cambiamenti Climatici (CC) e l'applicazione degli accordi di Kyoto e post Kyoto. Pertanto l'obiettivo è fornire strumenti per la pianificazione e gestione sostenibile degli interventi sul territorio, a fronte dei cambiamenti climatici attesi e dei relativi impatti. Ciò può concretizzarsi attraverso le seguenti proposte operative.

1. Mantenimento e implementazione di reti di osservazione per il monitoraggio a lungo termine di parametri significativi e lo studio della variabilità climatica e ambientale a scale differenti (mediterraneo, nazionale e locale); supporto ad una gestione coordinata dei dati per dare continuità e consistenza alle valutazioni di impatto a scala nazionale e locale.
2. Analisi dello stato attuale del territorio con produzione di cartografia a scala nazionale su alcune tipologie di processi ambientali, influenzati dai cambiamenti climatici (es. evidenza dei riscontri empirici su dissesto idrogeologico, desertificazione, erosione costiera, ecc.), in grado di offrire un quadro conoscitivo del territorio univoco ed organico a scala nazionale, quale base per un'analisi strategica.
3. Sviluppo di modelli accoppiati (idrosfera, atmosfera, biosfera) a scala mediterranea e locale per lo studio dell'evoluzione del clima nel prossimo futuro.
4. Definizione degli scenari di impatto sul territorio italiano, attraverso l'utilizzo dei suddetti modelli, integrati con l'analisi del danno potenziale sugli elementi a rischio (popolazione, strutture, infrastrutture) - Analisi della vulnerabilità.
5. Sviluppo di modelli socio-economici innovativi (economia dei disastri naturali) per la ricostruzione degli scenari di rischio atteso sul territorio italiano a medio-lungo periodo, derivanti dall'impatto dei Cambiamenti Climatici.

### *Ricadute potenziali*

Le attività, gli strumenti ed i prodotti proposti permetteranno in sede politica di:

- Implementare eventuali strumenti normativi per strutturare la conoscenza dei rischi derivanti dal Cambiamento Climatico (banche dati, cartografie, politiche di indirizzo a carattere generale);
- Privilegiare l'indirizzo di risorse finanziarie specifiche nelle aree di maggiore vulnerabilità del territorio a fronte degli scenari di rischio atteso, anche utilizzando gli strumenti normativi attualmente in vigore (es. L. 179/2002 per il finanziamento di opere per la difesa del suolo), evitando finanziamenti a pioggia indifferenziati;
- Pianificare un monitoraggio continuo delle dinamiche di impatto nelle aree a maggiore vulnerabilità e rischio, attraverso strumenti tecnologici avanzati e processi innovativi;
- Favorire un migliore coordinamento delle politiche di protezione e sviluppo sostenibile del territorio nei settori dell'ambiente, dell'agricoltura e dell'energia.
- Fornire supporto agli enti locali, integrando il problema degli impatti dovuti ai Cambiamenti Climatici, nei settori chiave della pianificazione sostenibile, quali: pianificazione strategica e locale delle strutture e infrastrutture, agricoltura, turismo.

Il trasferimento di questi strumenti a livello locale implica un adattamento di tipo spaziale e temporale alle esigenze puntuali di coloro a cui compete, localmente, la pianificazione e gestione del territorio.

## Bibliografia

Antonioli F., Silenzi S., Frisia S., 2001 - Tyrrhenian Holocene palaeoclimate trends from spelean serpulids *Quaternary Science Reviews*. 20/15, 1661-1670.

Antonioli F., Silenzi S., Gabellino M., Mucedda M., 2005 - High resolution climate trend over the last 1000 years from a stalagmite in Sardinia (Italy) *Quaternaria Nova*, VII, 35-48.

Antonioli F., Bard E., Silenzi S., Potter E. K., Imbrota S., 2004 - 215 KYR history of sea level based on submerged speleothems. *Global and Planetary Change*, 43, 57-68.

Apadula, F., Artuso F., Chamard P., De Nile F., di Sarra A., Lauria L., Longhetto A., Monteleone F., Piacentino S., Santaguida R., Vannini C., 2005 - The network for background CO<sub>2</sub> measurement in Italy, 12th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide Concentration and Related Tracer Measurement Techniques, World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch Report n. 161 (WMO TD no. 1275), 173-175.

Artuso F., Chamard P., Piacentino S., di Sarra A., Meloni D., Monteleone F., Sferlazzo D. M., Thiery F., 2007 - Analysis of Atmospheric Methane Measurements in Lampedusa during 1995-2005, *Atmospheric Environment*, in press.

Bard E., Delaygue G., Rostek F., Antonioli F., Silenzi S., Schrag D.P., 2002 - Hydrological conditions over the western Mediterranean basin during the deposition of the cold sapropel 6 event. *Earth and Planetary Science Letters*. vol. 202, 481-494.

Brook E.J., 2006 - Tiny bubbles tell all. *Science* 310, 1285-1287.

Chamard P., Thiery F., di Sarra A., Ciattaglia L., De Silvestri L., Grigioni P., Monteleone F., Piacentino S., 2003 - Interannual variability of atmospheric CO<sub>2</sub> in the Mediterranean: measurements at the island of Lampedusa. *Tellus* 55B, 83-93.

Cocito S., Ferdeghini F., 2001 - Carbonate Standing Stock and Carbonate Production of the Bryozoan *Pentapora fascialis* in the North-Western Mediterranean. *Facies*, 45: 25-30.

Cocito S., Sgorbini S., Peirano A., Valle M., 2003 - 3-D reconstruction of biological objects using underwater video technique and image processing. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 297: 57-70.

Colonna N., Palucci A., Iannetta M., a cura di, 2006 - Salinizzazione e qualità delle acque: ipotesi di mitigazione. ENEA, ISBN 88-8286-191-0, Roma.

Cupido R., Cocito S., Bordone A., Sgorbini S., 2006 - Conseguenze delle anomalie termiche del 1999 e del 2003 sulla popolazione della gorgonia *Paramuricea clavata* nel Golfo di La Spezia (Mar Ligure). *Rapp. Tecn. ENEA*, ISSN/0393-3016: 1-23.

Delfanti R., Klein B. and Papucci C., 2003 - Distribution of <sup>137</sup>Cs and other transient tracers in the Eastern Mediterranean: relationship to the deep water transient. *J. Geophysical Res.* 108, C9, 8108, doi:10.1029/2002JC001371.

Della Rocca A.B. et alii - Utilizzo di immagini satellitari ad alta risoluzione per la realizzazione di mappe dei limiti delle aree edificate nei piccoli agglomerati urbani, ATTI 9a Conferenza Nazionale ASITA, 2005

Delmonaco G., Leoni G., Margottini C., Puglisi C., 2002 - La propensione del territorio italiano ai fenomeni franosi. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1 - 1(2002).

Delmonaco G., Leoni G., Margottini C., Puglisi C., Spizzichino D., 2003 - Large scale debris-flows hazard assessment: a geotechnical approach and GIS modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (3), 443-455.

Di Sarra A., Cacciani M., Chamard P., Cornwall C., DeLuisi J. J., Di Iorio T., Disterhoft P., Fiocco G., Fuà D., Monteleone F., 2002 - Effects of desert dust and ozone on the ultraviolet irradiance at the Mediterranean island of Lampedusa during PAUR II. *Journal of Geophysical Research* 107(D18), 8135, doi: 10.1029/2000JD000139.

Di Sarra A., Pace G., De Silvestri L., Meloni D., Monteleone F., Piacentino S., 2007 - Surface shortwave radiative forcing of different aerosol types estimated at Lampedusa island by ground base optical measurements, *Geophysical Research Letters*, submitted.

Di Donfrancesco G., Cairo F., Buontempo C., Adriani A., Viterbini M., Snels M., Morbidini R., Piccolo F., Cardillo F., Pommereau J. P., Garnier A., 2006 - Balloonborne lidar for cloud physics studies, *Applied Optics*, 45(22), 5701-5708.

Ferranti L., Antonioli F., Amorosi A., Dai Prà G., Mastronuzzi G., Mauz B., Monaco C., Orrù P., Pappalardo M., Radtke U., Renda P., Romano P., Sansò P., Verrubbi V., 2006 - Elevation of the last interglacial highstand in Italy: A benchmark of coastal tectonics. *Quat. Int.* 145-146, 30-54.

Giordano L., Giordano F., Grauso S., Iannetta M., Sciortino M., Bonati G., Borfecchia F., De Cecco L., Felici F., Martini S., Schino G., 2002 - Desertification vulnerability in Sicily (Southern Italy). *Congress Proceeding: 52-53*, (2nd International Conference "New trends in water and environmental engineering for safety and life", Giugno 2002), ISBN 88-900282-2-X.

Giordano L., Trotta C., Menegoni P., Schino G., Borfecchia F., 2006 - Nuove tecnologie per lo studio della vegetazione in relazione ai cambiamenti climatici. ENEA, ISBN 88-8286-153-8, Roma.

Giraudi C., 1998 - Late pleistocene and Holocene lake level variations in Fucino Lake (Abruzzo - Central Italy) inferred from geological, archaeological and historical data. *ESF Workshop "Palaeohydrology as reflected in lake-level changes as climatic evidence for Holocene times"*. *Palaoklimaforschung*, 25, 1-17. Gustav Fisher Verlag Ed.

Giraudi C., 2004 - The Upper Pleistocene to Holocene sediments on the Mediterranean island of Lampedusa (Italy) - *Journal of Quaternary Science*, 19(6), 537-545.

Giraudi C., 2005 - Middle to Late Holocene glacial variations, periglacial processes and alluvial sedimentation on the higher Apennine massifs (Italy). *Quaternary Research* 64,176-184.

Giraudi C. & Frezzotti M., 1997 - Late Pleistocene glacial events in the Central Apennine, Italy. *Quaternary Research*, 48 (3),280-290.

Iannetta M., Giordano L., Giordano F., Borfecchia F., De Cecco L., Felici F., Martini S., Schino G., 2004 - Discriminazione, tramite dati telerilevati e misure a terra, delle aree agricole irrigue e non irrigue della Provincia di Agrigento. In: *La siccità in Italia*. Atti dei Convegni Lincei, N° 204; pp. 303-312. Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.

Iannetta M., Enne G., Zucca C., Colonna N., Innamorato F., Di Gennaro A., 2005 - Il progetto Riade: i processi di degrado delle risorse naturali in Italia ed i possibili interventi di mitigazione. In: "Lotta alla siccità e alla desertificazione", a cura di P. Gagliardo. *Geotema* 25: 99-108.

Iannetta M., 2006 - La desertificazione in Italia e il progetto Riade. ENEA, ISBN 88-8286-143-0, Roma.

IPCC 4<sup>th</sup> Assessment Report "Climate Change 2007"

Lambeck K., Anzidei M., Antonioli F., Benini A., Esposito E., 2004a - Sea level in Roman time in the Central Mediterranean and implications for modern sea level rise. *Earth and Planetary Science Letter*, 224, 563-575.

Lambeck K., Antonioli F., Purcell A., Silenzi S., 2004b - Sea level change along the Italian coast for the past 10,000 yrs. *Quaternary Science Review*, 23, 1567-1598.

Latini A., Sperandei M., Rasi C., Cantale C., Sharma S., Arcangeli C., Iannetta M., Dettori M., Ammar K., Galeffi P., 2005 - Molecular responses to water-stress: Expression of the *tddrf1* gene in four durum wheat and one triticale genotypes. *J. Experimental Botany*, December 2005.

Laureano P., Burgi M., Iannetta M., Quaranta G., a cura di, 2006 - Lettura dinamica delle relazioni tra territorio, insediamenti umani ed utilizzo delle risorse naturali: sistematizzazione e riproposizione in chiave innovativa delle conoscenze e tecniche tradizionali. ENEA, ISBN 88-8286-146-5, Roma.

Lombardi C., Cocito S., Occhipinti-Ambrogi A., Hiscock K., 2006 - The influence of seawater temperature on zooid size and growth rate in *Pentapora fascialis* (Bryozoa: Cheilostomata). *Mar. Biol.* 149 (5): 1103-1009.

Mariotti A., Struglia M.V., Zeng N., Lau K.-M., "The Hydrological Cycle in the Mediterranean Region and Implications for the Water Budget of the Mediterranean Sea" *Journal of Climate* 15 pp. 1674-1690.

Marullo et al., 2007 - contribution to the 38th CIESM Congress - Istanbul, Turkey, 9-13 April 2007.

Meinesz A., Belsher T., Thibaut T., Antolic B., Ben Mustapha K., Boudouresque C.-F., Chiaverini D., Cinelli F., Cottalorda J.-F., Djellouli A., El Abed A., Orestano C., Grau A.M., Ivesa L., Jaklin A., Langar H., Massuti-Pascual E., Peirano A., Tunesi L., De Vaugelas J., Zavodnik N. e Zulevic A., 2001 - The introduced green alga *Caulerpa taxifolia* continues to spread in the Mediterranean. *Biological invasions*, 3: 201-210.

Meloni D., di Sarra A., Biavati G., DeLuisi J. J., Monteleone F., Pace G., Piacentino S., Sferlazzo D. M., 2007 - Seasonal behavior of Saharan dust events at the Mediterranean island of Lampedusa in the period 1999-2005, *Atmospheric Environment*, in press.

Menegoni et al., 2007 - Le specie vegetali a rischio di estinzione come bioindicatori di fenomeni di cambiamento. Un'analisi ecologica e degli habitat nelle regioni dell'Italia meridionale a rischio di desertificazione, in press.



Narcisi B., 2000 - *Late Quaternary eolian deposition in Central Italy*. Quaternary Research, 54 (2), 246-252.

Pace G., di Sarra A., Meloni D., Piacentino S., Chamard P., 2006 - Aerosol optical properties at Lampedusa (Central Mediterranean). 1. Influence of transport and identification of different aerosol types, Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 697-713.

Peirano A., Morri C., Bianchi C.N. e Rodolfo-Metalpa R., 2001 - Biomass, Carbonate Standing Stock and Production of the Mediterranean Coral *Cladocora caespitosa* (L.). *Facies*, 44: 75-80.

Peirano A., Morri C., Bianchi C.N., Aguirre J., Antonioli F., Calzetta G., Carobene L., Mastronuzzi G., Orru' Orrù P., 2004 - The Mediterranean coral *Cladocora caespitosa*: a proxy for past climate fluctuations? *Global and Planetary Change*, 40: 195-200.

Piazzi L., Meinesz A., Verlaque M., Akçali B., Antolić B., Argyrou M., Balata D., Ballestreros E., Calvo S., Cinelli F., Cirik S., Cossu A., D'archino R., Djellouli A.S., Javel F., Lanfranco E., Mifsud C., Pala D., Panayotidis P., Peirano A., Pergent G., Petrocelli A., Ruitton S., Žulević A., Ceccherelli G., 2005 - Invasion of *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea* (Caulerpales, Chlorophyta) in the Mediterranean Sea: an assessment of the spread. *Cryptogamie, Algol.*, 26 (2): 189-202.

Pollino M. et alii, 2005 - "Aerofotogrammetria, DEM e realtà virtuale: ricostruzione fotorealistica tridimensionale di edifici in aree urbane", Cartographica - Il notiziario dei dati geografici, Ed. MondoGIS, n° 11 - Febbraio 2005.

Progetto CRESCO (Centro Computazionale di RicErca sui Sistemi Complessi) - Sottoprogetto SP.III.6: Sistema Informativo per la Salvaguardia delle Infrastrutture e della popolazione (SISI), ENEA - PON 2000-2006 Misura II.2 Azione a.

Rapporto ENEA, 2006 - "Convenzione ENEA - Regione Abruzzo per lo studio di fattibilità per la valutazione della vulnerabilità e degli impatti delle variazioni climatiche sulla Regione Abruzzo ed ipotesi di adattamento.

Rodolfo-Metalpa R., Bianchi C.N., Peirano A. e Morri C., 2000 - Coral mortality in NW Mediterranean. *Coral Reef*, 19 (1): 24.

Rossi et al., 2006 - Valutazione dello stato ed evoluzione della copertura vegetale in Italia mediante immagini telerilevate. Progetto Vecit del CNLSD.

Schino G., Borfecchia F., De Cecco L., Dibari C., Iannetta M., Martini S. and Pedrotti F., 2003 - Satellite estimate of grass biomass in a mountainous range in central Italy. *Agroforestry Systems* 59: 157-162, 2003.

Schröder K., Gasparini G. P., Tangherlini M., Astraldi M., 2006 - Deep and Intermediate Water in the Western Mediterranean under the influence of the Eastern Mediterranean Transient. *Geophys. Res. Lett.* 33, doi:10.1029/2006GL02712.

Sciortino M., Iannetta M., et al., 2002 - Individuazione delle zone sensibili alla desertificazione nella regione Siciliana. In "Valutazione e mitigazione della desertificazione nella Regione Sicilia: un caso di studio", pagg. 27-47. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. ISBN 88-8286-015-9. Novembre 2002.

M. Sciortino, G. Fattoruso, E. Caiaffa, G. Salvetti, M. Bucci, 2007 - Draft simulation tools for water availability and demand analysis, Project DeSurvey Deliverable n° 1.6.1.4, 2007.

Silenzi S., Antonioli F., Chemello R., 2004 - A new marker for sea surface temperature trend during the last centuries in temperate areas: vermetid reef. *Global and Planetary Change*, 40, 105-114.

Sparnocchia S., Schiano M.E., Picco P., Bozzano R., Cappelletti A., 2006 - The anomalous warming of Summer 2003 in the surface layer of the Ligurian Sea (Western Mediterranean). *Ann. Geophys.* 24: 443 - 452.

Speicher E. A., Moran S. B., Burd A. B., Delfanti R., Kaberi H., Kelly R. P., Papucci c., Stavrakakis S., Torricelli L., Zervakis V., 2006 - Particulate organic carbon export fluxes and size-fractionated POC/234Th ratios in the Ligurian, Tyrrhenian and Aegean Seas. *Deep Sea Res. I*, 53: 1810 -1830.

Valpreda E., Simeoni U., 2003 - Coastal erosion susceptibility assessment at national scale: the Italian case.- JCC.258

Valpreda E., 2003 - GIS and natural Hazards - Cap. 22 in: "Natural Disaster and Sustainable Development" C. Margottini - Springer-Verlag.

Valpreda E., Simeoni U., Gragnaniello S., Corbou C., 2004 - Valutazione del rischio di natura geologica connesso con reperti a mare nel litorale ionico lucano - Rapporto tecnico Progetto ARCHEOMAR

Valpreda E., 2006 - Una banca dati geografica per la classificazione delle dune costiere a scala nazionale- Studi Costieri, 11, Firenze.

Valpreda E., Cardinali S., 2007 - Resilienza e rischio di erosione del litorale molisano in relazione all'evoluzione naturale ed antropica ed alla presenza di beni paesaggistici. Studi Costieri 13, Firenze, in press.

