



VERSO LA STRATEGIA NAZIONALE PER LA BIODIVERSITÀ

Esiti del tavolo tecnico

CAMBIAMENTI CLIMATICI E BIODIVERSITÀ. STUDIO DELLA MITIGAZIONE E PROPOSTE PER L'ADATTAMENTO





*Ministero dell' Ambiente
della Tutela del Territorio e del Mare*



CAMBIAMENTI CLIMATICI E BIODIVERSITÀ. STUDIO DELLA MITIGAZIONE E PROPOSTE PER L'ADATTAMENTO.

Verso la Strategia Nazionale per la Biodiversità

RIFERIMENTI AUTORI

Fabio Attorre², Franco Bruno², Roberto Danovaro³, Ireneo Ferrari⁴, Marino Gatto¹, Antonio Navarra⁵, Riccardo Valentini⁶

Coordinamento scientifico:

Marino Gatto¹

Coordinamento tecnico:

Eva Alessi

WWF Italia ONLUS

Contributi di:

Andrea Agapito Ludovici[°], Gianfranco Bologna[°], Rossano Bolpagni⁷, Fabrizio Bulgarini[°], Sergio Castellari⁵, Giulio De Leo⁷, Giulia Fiorese⁸, Fabio Francesconi², Silvana Galassi⁹, Silvio Gualdi⁵, Bruno Maiolini¹⁰, Michele Mistri¹¹, Rosario Mosello¹², Anna Occhipinti-Ambrogi¹³, Bruno Petriccione¹⁴, Antonio Pusceddu¹⁵, Giampaolo Rossetti⁴, Angela Stanisci¹⁶, Fabio Stoch¹⁷, Jean Paul Theurillat¹⁸, Roberto Valenti², Pierluigi Viaroli⁴, Adriana Zingone⁸

¹ Dipartimento di Elettronica ed Informazione, Politecnico di Milano;

² Dipartimento di Biologia Vegetale, Università degli Studi di Roma la Sapienza

³ Dipartimento di Scienze del Mare, Università Politecnica delle Marche, Ancona;

⁴ Dipartimento di Scienze Ambientali, Università di Parma;

⁵ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, sede di Bologna e Centro Euromediterraneo per i Cambiamenti Climatici;

⁶ Dipartimento di Scienze dell'Ambiente Forestale e delle sue risorse, Università della Tuscia, Viterbo;

⁷ Dipartimento di Scienze Ambientali, Università degli Studi di Parma;

⁸ Laboratorio di Ecologia ed Evoluzione del Plancton, Stazione Zoologica A. Dohrn, Napoli;

⁹ Dipartimento di Biologia, Università degli Studi di Milano,

¹⁰ Sezione di Zoologia degli Invertebrati ed Idrobiologia, Museo Tridentino di Scienze Naturali, Trento;

¹¹ Dipartimento di Biologia ed Evoluzione, Università di Ferrara;

¹² Sezione di Idrobiologia ed Ecologia delle Acque Interne, CNR Istituto per lo Studio degli Ecosistemi;

¹³ Dipartimento di Ecologia del Territorio, Università degli Studi di Pavia;

¹⁴ Corpo Forestale dello Stato, Divisione 6^a - Servizio CONECOFOR (Ispettorato Generale, Servizio II);

¹⁵ Dipartimento di Scienze del Mare, Università Politecnica delle Marche;

¹⁶ Dipartimento Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e Territorio, Università del Molise;

¹⁷ Museo Civico di Storia Naturale di Verona;

¹⁸ Dipartimento di Biologia, Università degli Studi Roma Tre;

[°] WWF Italia ONLUS

SOMMARIO

PREMESSA	1
1. INTRODUZIONE	2
1.1 La biodiversità e l'impatto dell'uomo	2
1.2 Aumento delle concentrazioni di gas serra e cambiamenti climatici globali	2
1.3 Gli impatti del cambiamento climatico globale sugli ecosistemi	3
2. QUADRO CLIMATOLOGICO DELLA REGIONE DEL MAR MEDITERRANEO	4
2.1 La regione Mediterranea	4
2.2 I modelli e gli scenari climatici nel Mediterraneo	4
2.3 Scenari nel Mediterraneo	5
3. QUADRO DELLE EVIDENZE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA BIODIVERSITÀ E SUL FUNZIONAMENTO DEGLI ECOSISTEMI	7
3.1 Impatti dei cambiamenti climatici globali sulla fauna	7
3.2 Impatti sulla flora e la vegetazione	9
4. QUADRO DELLE EVIDENZE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUGLI ECOSISTEMI	13
4.1 Ecosistemi marini	13
4.2 Ecosistemi di acque interne e ambienti di transizione	14
4.3 Ecosistemi forestali	19
4.4. Sinergie con altri impatti dell'azione umana	22
5. SCENARI E PROPOSTE PER LA STRATEGIA NAZIONALE PER LA BIODIVERSITÀ	24
5.1. Proposte per l'adattamento degli ecosistemi marini	24
5.2. Proposte per l'adattamento degli ecosistemi di acque interne e ambienti di transizione	25
5.3. Proposte per l'adattamento della vegetazione e degli ecosistemi forestali	28
5.4 Proposte per l'adattamento degli ambienti di alta quota	29
5.5. Un'importante priorità: connessione e ripristino ecologico	30
BIBLIOGRAFIA	32

PREMESSA

Questo documento intende fornire alcuni contributi al percorso della Strategia Nazionale per la Biodiversità, ed è stato realizzato nell'ambito del progetto Verso una Strategia Nazionale per la Biodiversità: i contributi della Conservazione Ecoregionale.

I contributi raccolti nel presente documento costituiscono delle proposte tecnico-scientifiche basate sull'analisi del contesto e sulle problematiche oggi esistenti. Non hanno l'ambizione di essere prescrittive, ma bensì quelle di costituire una base di lavoro per il necessario coinvolgimento di attori istituzionali, tecnici e politici che dovranno avere parte attiva nella costruzione e implementazione della Strategia Nazionale per la Biodiversità.

Su scale temporali molto lunghe (decine e centinaia di migliaia di anni) il cambiamento climatico ha sempre caratterizzato la storia del nostro pianeta. Nel periodo geologico dell'Olocene (all'incirca negli ultimi 11.000 anni) si è verificata una situazione di discreta stabilizzazione climatica che ha anche facilitato l'ampia diffusione della nostra specie sul pianeta.

Tuttavia, nel corso degli ultimi decenni, il clima terrestre è andato modificandosi rapidamente non solo per cause naturali, ma anche come risultato dell'azione della specie umana. Come indicato anche dal IV Rapporto dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) le ricerche scientifiche sul cambiamento climatico e i suoi impatti dimostrano come il riscaldamento globale sia già una realtà dei giorni nostri che non farà, peraltro, che accentuarsi in futuro.

Il cambiamento del clima comporterà senza dubbi un cambiamento nella distribuzione degli habitat e delle specie anche nel nostro Paese. Senza dubbio molte specie saranno invece favorite, ad esempio tutte quelle specie ubiquitarie, poco esigenti da un punto di vista ecologico e legate agli ambienti che si vanno espandendo. La preoccupazione non deve essere tanto focalizzata sulla scomparsa di una specie o dell'altra, quanto sul rischio di un impoverimento in termini di ricchezza e biodiversità delle comunità animali e vegetali e quindi dall'indebolimento dei processi evolutivi che garantiscono la vita sul nostro Pianeta.

Inoltre, il IV Rapporto dell'IPCC lascia pochi dubbi sulla responsabilità umana: "L'incremento globale della concentrazione di biossido di carbonio è principalmente dovuto all'uso di combustibili fossili e ai cambiamenti nell'utilizzo dei suoli, mentre gli incrementi di metano e protossido di azoto sono principalmente dovuti all'agricoltura".

In questo documento si intende:

- a) fornire alcuni elementi derivanti dalle più recenti ricerche scientifiche pubblicate, soprattutto dopo il IV Rapporto dell'IPCC, in merito al quadro climatologico del riscaldamento a livello globale, con particolare riferimento alle realtà italiane;
- b) descrivere, sulla base delle più recenti ricerche scientifiche pubblicate, quali sono gli impatti del cambiamento climatico sulla biodiversità e sugli ecosistemi a livello globale e a livello nazionale;
- c) indicare alcune proposte per la strategia nazionale di adattamento agli impatti del cambiamento climatico sulla biodiversità e sulla funzionalità degli ecosistemi.

Gli aspetti legati all'interazione tra gli effetti dei cambiamenti climatici e la biodiversità, sono stati affrontati anche dal tavolo "Tutela delle specie migratrici e dei processi migratori" con la proposta di un obiettivo strategico specifico denominato: "Attuazione di misure di adattamento rispetto ai cambiamenti climatici" finalizzato a rimuovere e/o mitigare le cause profonde all'origine dei cambiamenti climatici di natura antropica e attuare contemporaneamente una strategia di adattamento volta a ridurre l'impatto dei cambiamenti climatici sulle specie migratrici e sugli habitat utilizzati, nonché a sviluppare un'azione di monitoraggio permanente delle specie migratrici in relazioni ai cambiamenti climatici.

Gli esperti coinvolti sono stati individuati sulla base della loro competenza, documentata attraverso pubblicazioni o partecipazione a progetti e conferenze a carattere nazionale e internazionale, ma anche sulla base della loro disponibilità alla partecipazione e al confronto.

1. INTRODUZIONE

1.1. La biodiversità e l'impatto dell'uomo

La specie umana dipende completamente dal capitale biologico costituito dagli organismi viventi, che tuttavia è in gran parte ancora sconosciuto: le specie descritte finora sono quasi 2 milioni, ma si stima che il numero totale di specie presenti sul pianeta sia molto maggiore. Metodi diversi, validi essenzialmente per gli ecosistemi terrestri, valutano come tale numero sia compreso fra i 3 e i 30 milioni. Il valore più attendibile è 14 milioni (Hawksworth e Kalin-Arroyo, 1995). In particolare gli ecosistemi marini sono molto poco conosciuti. Le specie marine finora descritte sono circa 250.000, ma recenti stime (Bouchet, 2006) valutano come i mari potrebbero ospitare fino a 10 milioni di specie. Questa ricca varietà di geni, specie ed ecosistemi (la biodiversità) fornisce all'uomo cibo, legname, fibre, energia e materie prime, contribuendo in maniera fondamentale all'economia mondiale. Attraverso la diversità è garantito il funzionamento degli ecosistemi e quindi sono garantiti importanti servizi naturali di cui l'uomo usufruisce, tra cui: la regolazione del ciclo idrologico e dei cicli biogeochimici di carbonio e azoto, la funzione di filtro di numerosi ambienti naturali per la qualità di acqua, suolo e aria, la protezione dalle alluvioni, la disponibilità di varietà genetiche per l'agricoltura, l'impollinazione naturale e la stabilità degli ecosistemi (Schröter *et al.*, 2005; Duffy e Stachowicz, 2006). La biodiversità dei paesi mediterranei è particolarmente alta e l'Italia è uno dei paesi presenti nella lista degli *hotspot* mondiali (Myers *et al.*, 2000) in quanto ospita un numero molto elevato di specie animali e vegetali uniche in Europa e nel mondo.

La specie umana da sempre interagisce con l'ambiente che la circonda: attraverso le proprie attività ha modificato e adattato alle proprie esigenze l'ambiente naturale, continuando al contempo a usufruire dei servizi forniti. Dalla seconda metà del Settecento, l'uomo ha preso il sopravvento sull'ambiente e, nel corso dell'ultimo secolo, la struttura degli ecosistemi è andata modificandosi molto più rapidamente del passato (MEA, 2005). Secondo il *Global Environment Outlook* (UNEP, 2007), il pianeta sta vivendo la sesta grande estinzione che, a differenza delle precedenti cinque (avvenute da quando, 3,8 miliardi di anni fa, la biodiversità ha iniziato a evolversi), non è dovuta a cambiamenti globali naturali, ma piuttosto all'attività antropica (Crutzen, 2005). L'uomo ha immesso nell'atmosfera una grande quantità di gas serra, principalmente anidride carbonica (o biossido di carbonio, CO₂) che, come verrà di seguito precisato, ha portato a un'alterazione del sistema climatico terrestre. In effetti, se si valutano quantitativamente le cause più importanti di perdita di biodiversità, risulta come l'aumento della concentrazione di CO₂ e i conseguenti cambiamenti climatici siano la causa principale. Il cambiamento di uso del suolo, che in parte contribuisce anch'esso ai cambiamenti climatici, risulta essere la seconda causa per importanza.

1.2. Aumento delle concentrazioni di gas serra e cambiamenti climatici globali

Nel corso degli ultimi decenni, il clima terrestre è andato modificandosi rapidamente, non solo per cause naturali, ma anche (e soprattutto) come risultato dell'azione dell'uomo che ha determinato un enorme aumento della concentrazione di alcuni gas serra (biossido di carbonio CO₂, metano CH₄, protossido d'azoto N₂O, idrofluorocarburi HFC, perfluorocarburi PFC ed esafluoruro di zolfo SF₆), capaci di catturare la radiazione infrarossa terrestre e reirraggiarla verso la superficie del pianeta.

Il IV rapporto dell'*Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC, 2007) lascia pochi dubbi sulla responsabilità dell'uomo: "L'incremento globale della concentrazione di biossido di carbonio è principalmente dovuto all'uso di combustibili fossili e ai cambiamenti nell'utilizzo dei suoli, mentre gli incrementi di metano e protossido di azoto sono principalmente dovuti all'agricoltura". Nel settembre del 2008 sono stati resi noti, dall'autorevole programma internazionale *Global Carbon Project*, i risultati del *Carbon Budget 2007* (Global Carbon Project, 2008), secondo cui l'incremento annuale di CO₂ nella composizione chimica dell'atmosfera per il 2007 è risultato pari a 2,2 ppmv (parti per milione di volume) contro gli 1,8 ppmv del 2006, mentre nell'ultimo ventennio è stato pari a 1,5 ppmv. Questo incremento ha portato la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera a 383 ppmv nel 2007, cioè il 37% al di sopra di quella esistente all'inizio della Rivoluzione Industriale (pari a circa 280 ppmv). Gli ultimi dati di misure di concentrazione atmosferica di CO₂, pubblicati sul sito web dell'*US National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), mostrano come, nel 2008, la concentrazione globale media di anidride carbonica abbia già superato le 383 ppmv (<http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>). La comunità scientifica ha documentato come l'attuale concentrazione sia la più alta degli ultimi 800.000 anni (Lüthi *et al.*, 2008).

Le emissioni di carbonio¹, dovute all'utilizzo dei combustibili fossili, sono salite dai 6,2 miliardi di tonnellate del 1990 alle 8,5 miliardi di tonnellate nel 2007. Il tasso di crescita è stato del 3,5% l'anno nel periodo 2000-2007, un incremento di quasi quattro volte rispetto allo 0,9% annuo del periodo 1990-1999. L'attuale tasso di crescita delle emissioni per il periodo 2000-2007 eccede i più alti scenari di crescita delle emissioni per il decennio 2000-2010 presentati dallo "*Special Report on Emissions Scenarios*" (SRES) realizzato dall'IPCC (IPCC, 2000). I maggiori incrementi delle emissioni si sono avuti nei paesi di nuova industrializzazione, *in primis* Cina e India. Le emissioni dovute ai combustibili fossili e alle industrie cementifere hanno rilasciato approssimativamente 348 miliardi di tonnellate di carbonio nell'atmosfera dal 1850 al 2007.

La capacità dei sistemi naturali, in particolare quella degli oceani, di "catturare" tutto questo carbonio sta progressivamente riducendosi. L'efficienza della capacità di sequestro da parte dei sistemi naturali è scesa del

¹ Ogni tonnellata di carbonio equivale a 3,67 tonnellate di anidride carbonica.

5% nell'arco degli ultimi 50 anni: cinquant'anni fa per ogni tonnellata di anidride carbonica emessa in atmosfera i "serbatoi" naturali ne sequestravano 600 kg. Oggi ne rimuovono 550 kg. Negli ultimi 15 anni, circa la metà delle emissioni di CO₂ derivate dall'attività umana è stata assorbita dalle terre e dagli oceani. Ma la capacità di questi "serbatoi" naturali sta diminuendo (La Quere *et al.*, 2007) a ritmi più elevati di quelli previsti negli studi precedenti. Vale a dire che una crescente percentuale della CO₂ emessa dalle attività umane rimarrà nell'atmosfera contribuendo al riscaldamento globale (Canadell *et al.*, 2007; Raupach *et al.*, 2007). Infatti, secondo la quasi totalità degli scienziati del clima e secondo l'IPCC l'incremento dei gas serra è il principale responsabile del fenomeno del riscaldamento globale, ovvero dell'aumento della temperatura media superficiale del nostro pianeta. L'incremento della temperatura registrato nell'ultimo secolo (1906-2005) è, secondo le più recenti misure, di 0,74±0,18°C, in aumento rispetto al trend corrispondente per il periodo 1901-2000, ovvero 0,6±0,20°C (IPCC, 2007). Dal 1950 in poi, la temperatura è aumentata in media di 0,13°C ogni dieci anni. I 14 anni più caldi a partire dal 1850, da quando accurate misure strumentali della temperatura sono diventate disponibili, si sono tutti verificati dal 1990 a oggi. Il 1998 e il 2005 sono stati gli anni più caldi. Infine, negli ultimi 100 anni, la temperatura in Europa è aumentata di 0,95°C contro gli 0,74°C registrati a livello globale (EEA, 2004). Il riscaldamento globale è stato accompagnato da altri cambiamenti delle variabili climatiche, quali la diminuzione della copertura nevosa dell'emisfero settentrionale, l'aumento del livello medio dei mari, la diminuzione del volume dei ghiacci marini artici. L'individuazione a livello globale e regionale di *trend* di variazione per la precipitazione è più complicata rispetto all'individuazione di altri trend. Tuttavia, un significativo aumento delle precipitazioni è stato osservato in Europa settentrionale, nel Nord e nel Sud America orientali, nell'Asia centrale e settentrionale (IPCC, 2007). Un incremento della siccità è stato osservato nel Mediterraneo, nel Sahel, nell'Africa meridionale e in alcune aree dell'Asia meridionale (IPCC, 2007).

Gli scienziati del *Global Carbon Project* ricordano come i mutamenti del ciclo del carbonio, che stanno producendo questo grande *forcing* del sistema climatico, procedano in una maniera molto più rapida di quanto precedentemente atteso (si vedano a riguardo i già citati siti internet <http://www.globalcarbonproject.org> e <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>). Un riesame degli impatti climatici, riportati nel IV Rapporto dell'IPCC, indica come siano necessari, entro il 2050, tagli dell'ordine del 50-85% nelle emissioni globali di gas serra, rispetto ai livelli del 2000, al fine di contenere l'aumento medio delle temperature globali probabilmente sotto i 2°C (rispetto al periodo preindustriale) e di limitare gli impatti climatici entro livelli più "accettabili". Un taglio di tale entità farebbe stabilizzare la concentrazione atmosferica di gas serra a 445-490 ppmv di CO₂ equivalenti. Tuttavia, anche un abbattimento dell'80% delle emissioni non sarebbe in grado di annullare completamente i danni e comunque richiederebbe molti più sforzi di quelli attualmente pianificati per evitare quelli più gravi (Parry *et al.*, 2008). Un recentissimo lavoro scientifico firmato da illustri climatologi (Solomon *et al.*, 2009) dimostra come il cambiamento climatico, che sta avendo luogo a causa dell'incremento della concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera, sarà ampiamente irreversibile per i 1.000 anni successivi all'eventuale blocco delle emissioni attuali.

1.3. Gli impatti del cambiamento climatico globale sugli ecosistemi

L'aumento della temperatura, il cambiamento del regime delle precipitazioni e dei venti e le variazioni di frequenza e intensità degli eventi estremi sono i principali elementi che agiscono sulle specie animali e vegetali, regolando caratteristiche ambientali quali la disponibilità dei nutrienti fondamentali per lo sviluppo dei produttori primari, la copertura dei ghiacci e, in mare, l'intensità dei moti convettivi e avvertivi, la trasparenza e il livello stesso delle acque. Le specie possono rispondere a tali variazioni adattandosi alle nuove condizioni, in virtù della loro plasticità fenotipica, ovvero attraverso la selezione di varianti genetiche la cui fisiologia permetta la sopravvivenza nelle nuove condizioni. Una risposta alternativa o complementare è lo spostamento nel tempo delle fasi del loro ciclo di vita oppure nello spazio, cioè verso latitudini o profondità della colonna d'acqua dove le condizioni siano ancora adeguate o lo siano divenute. Il complesso di cambiamenti fisiologici, fenologici, demografici, geografici di singoli individui o specie porta inevitabilmente a modificare le relazioni trofiche, competitive e, più in generale, interspecifiche. Tutto ciò determina il realizzarsi di impatti complessi e, in ultima analisi, la modificazione degli ecosistemi e della loro biodiversità.

Tralasciando i processi che avvengono su tempi propri dell'evoluzione biologica, gli effetti del cambiamento climatico su specie ed ecosistemi possono essere raggruppati nelle seguenti principali categorie (Hughes, 2002; Walther *et al.*, 2002): a) impatti sulla fisiologia e sul comportamento; b) impatti sul ciclo vitale; c) impatti sulla distribuzione geografica; d) impatti sulla composizione e sulle interazioni delle specie nelle comunità ecologiche.

È necessario considerare i tempi di risposta che caratterizzano i diversi processi influenzati dal cambiamento climatico, dai tempi brevi per gli impatti sulla fisiologia (giorni-mesi) a quelli più lunghi per le variazioni di areale (anni-decenni), fino alle scale tipiche dei processi evolutivi (centinaia di anni-millenni). In alcuni casi, come ad esempio lo spostamento dell'areale di distribuzione di alcune specie di farfalla (Parmesan *et al.*, 1999), i tempi di risposta sono comparabili con quelli del cambiamento climatico, tanto che gli eventi registrati possono essere considerati *fingerprint* (impronte digitali ecologiche) e, quindi, indizi del cambiamento climatico stesso (Parmesan e Yohe, 2003; Roth *et al.*, 2003). Alcuni eventi che riguardano le specie sono addirittura indicatori precoci di cambiamenti in atto a fronte di un segnale climatico non molto evidente, come nel caso della colonizzazione di specie termofile nel mare e di altre "sentinelle" di cambiamenti (Duarte *et al.*, 1999; Diaz-Almela *et al.*, 2007; Francour *et al.*, 1994). Gli effetti del cambiamento climatico hanno oggi conseguenze particolarmente gravi nell'alterazione degli ecosistemi, soprattutto nei biomi artico, boreale e alpino, dove il clima è il principale regolatore dell'ecosistema, e lo saranno sempre più tra 50 anni e oltre.

2. QUADRO CLIMATOLOGICO DELLA REGIONE DEL MAR MEDITERRANEO

2.1. La regione Mediterranea

La regione mediterranea rappresenta una frazione relativamente piccola dell'area totale del nostro pianeta e, quindi, non rientra nelle regioni che possono determinare variazioni consistenti nel clima globale. Fa eccezione il ruolo che riveste nel mantenimento dell'equilibrio salino dell'Oceano Atlantico, attraverso i flussi in entrata e uscita allo stretto di Gibilterra. Il Mar Mediterraneo stesso è un bacino evaporativo con un deficit di precipitazione stimato in circa 1 metro l'anno; la differenza viene compensata con l'afflusso di acqua atlantica, relativamente poco salina.

Diversi sistemi complessi di orografia delimitano la regione. Le Alpi, le montagne dell'Atlante e dell'Anatolia e anche i più modesti, ma ripidi, rilievi della penisola Iberica e dei Balcani, complicano il quadro dinamico. La presenza del Mar Mediterraneo introduce un altro fattore di complessità rappresentato dai forti gradienti termici che naturalmente influenzano il ciclo idrico del bacino. Le caratteristiche complessive del ciclo idrico della regione e la sua potenzialità come sorgente di umidità per il centro e nord Europa è stato investigato da Mariotti e collaboratori (2002).

La regione, spesso oggetto di ciclogenese² locale, modificata dalla presenza di rilievi montuosi e di interazioni aria-mare, è sede di processi dinamici specifici. La stagionalità della regione è caratterizzata da una forte polarizzazione sulle stagioni estreme, con transizioni rapide e variabili. Le precipitazioni sono concentrate nel periodo invernale esteso (novembre/marzo) e le estati sono in genere secche e calde. Nel periodo invernale, la regione è dominata dalla circolazione delle medie latitudini, risentendo delle *storm track* atlantiche (ossia delle traiettorie preferenziali percorse dalle perturbazioni), mentre nel periodo estivo questa viene a cadere sotto l'influsso delle circolazioni tropicali, con subsidenza³ prevalente su tutta la regione.

La precipitazione media annuale nel periodo 1979-1993 ha assunto valori compresi tra circa 331 e 477 mm/anno a seconda dei vari archivi di precipitazioni osservate che possono essere usati. Il ciclo stagionale delle precipitazioni ha un'ampiezza di circa 700 mm/anno e l'evaporazione supera le precipitazioni di circa 500 mm/anno, dando luogo a un bacino evaporativo che, producendo acqua molto salina, contribuisce in maniera determinante all'equilibrio salino dell'oceano Atlantico. La regione risente fortemente delle variazioni climatiche a larga scala, specialmente della variabilità potenziale nel ciclo stagionale, ma sono presenti significativi processi locali che possono a loro volta modificare gli effetti della circolazione a grande scala. Nel periodo 1948-1998 il deficit idrico del Mediterraneo è stato fortemente correlato alle anomalie di circolazione dell'Atlantico (*North-Atlantic Oscillation*, NAO) che è passata in una fase prevalentemente positiva dagli anni '70 (Mariotti *et al.*, 2002).

La circolazione della regione è dominata dall'alternanza stagionale. Durante l'inverno l'area è dominata dai regimi meteorologici delle medie latitudini e dalle perturbazioni che arrivano dall'Atlantico. Le traiettorie preferenziali percorse dalle perturbazioni (*storm track*) si dividono sull'Atlantico orientale in due percorsi principali. Il primo si dirige verso il Nord Europa e la Scandinavia, mentre il secondo percorre l'intera lunghezza del Mediterraneo, dalla penisola Iberica al Medio Oriente. L'inverno ha, quindi, le caratteristiche della meteorologia delle medie latitudini con intensi sviluppi baroclini⁴, anche locali, scatenati dalla complessa orografia delle Alpi e delle altre catene montuose, sviluppo di fronti e precipitazioni intense.

Il ciclo stagionale procede in estate con l'espansione delle zone subtropicali verso nord, spingendo le correnti delle medie latitudini a loro volta verso latitudini più settentrionali e sfavorendo la *storm track* Mediterranea rispetto a quella nord-europea. Il Mediterraneo viene effettivamente isolato dalle perturbazioni barocliniche atlantiche che penetrano con difficoltà nella regione. La subsidenza tende a dominare l'area nel periodo estivo, sfavorendo le precipitazioni e causando le tipiche estati calde e secche. La circolazione subtropicale che si crea è tipica delle basse latitudini dominate dalla cella di Hadley⁵. La delicata alternanza di regimi dinamici tra inverno ed estate è la causa principale del clima mediterraneo che tanto apprezziamo. Le estati sono calde e secche, ma le risorse idriche sono relativamente abbondanti grazie alle precipitazioni invernali.

2.2. I modelli e gli scenari climatici nel Mediterraneo

Il nostro pianeta, come già più volte sottolineato nel presente documento, si trova oggi in una situazione del tutto nuova rispetto al suo recente passato. Si tratta di uno stato eccezionale, nel senso che la situazione attuale non ha precedenti, né dal punto di vista dei valori assoluti di concentrazione dei gas serra, né dal punto di vista della rapidità con la quale questa si è creata. Inoltre, esistono pochi dubbi sul fatto che l'aumento di anidride carbonica sia essenzialmente di origine antropica a causa dell'uso massiccio di combustibili fossili (IPCC, 2007). Se i meccanismi di emissione di gas serra sono chiari, altra cosa è, però, cercare di comprendere nel dettaglio quello che l'aumento di questi stessi gas (non solo l'anidride carbonica, ma anche altri, come il metano) potrà causare a parametri macroscopici quali l'alternarsi delle stagioni, la distribuzione delle piogge fino ad arrivare agli impatti sulla distribuzione delle malattie infettive o agli effetti sulla agricoltura e, ancora più in generale, sull'economia.

² Insieme dei processi che portano alla formazione di un ciclone.

³ Moto discendente di una massa d'aria che ne provoca il suo stesso riscaldamento.

⁴ Un fluido si dice baroclinico quando le superfici di uguale pressione non sono parallele a quelle di uguale densità.

⁵ Circolazione di masse di aria che, nei pressi dell'equatore, si riscaldano e salgono fino a un'altezza di circa 10-15 km. Si spostano, quindi, verso i tropici dove, a causa del progressivo raffreddamento, ridiscendono verso la superficie, e tornano nuovamente verso l'equatore. Questa circolazione è strettamente collegata alla formazione dei venti alisei.

Per rispondere a queste domande i ragionamenti qualitativi non bastano. Occorre usare sofisticati metodi matematici, i modelli di simulazione, che ci forniscono i dettagliati parametri necessari ad affrontare questo tipo di problematiche. La quantità e qualità delle interazioni in gioco nel sistema climatico sono però di portata tale che le proiezioni numeriche risultano tuttora afflitte da sostanziali incertezze, che devono essere prese in considerazione nel momento in cui si analizzano i risultati.

Inoltre, la scienza dei cambiamenti climatici non può seguire lo stesso percorso delle altre scienze naturali, non disponendo di un laboratorio o di un tavolo sul quale eseguire test sperimentali: è impossibile eseguire esperimenti con il clima della Terra. La verifica sperimentale di varie ipotesi può essere fatta solo attraverso l'uso dei modelli numerici di circolazione generale che, quindi, rappresentano il nostro principale strumento di investigazione quantitativa dei cambiamenti climatici. Così come tutte le grandi installazioni scientifiche, i modelli sono in continua evoluzione e perfezionamento e il loro progresso è assolutamente necessario al fine della comprensione del funzionamento del sistema climatico stesso.

I modelli climatici permettono di studiare le variazioni del clima rispetto a modificazioni anche drastiche dei parametri del pianeta, come l'orografia, la distribuzione e la stessa composizione dell'atmosfera. Negli ultimi 20 anni, i modelli sono stati usati per individuare la risposta del sistema terrestre all'aumento dell'anidride carbonica (si vedano ad esempio Cubasch *et al.*, 1992; 1997; Manabe *et al.*, 2001; Meehl *et al.*, 2004). Questi studi hanno mostrato come sia possibile riprodurre il clima globale del pianeta e la sua risposta a diversi scenari di aumento della CO₂. Tuttavia, la grande variabilità spaziale del clima rende difficilmente trasportabili i risultati globali a scale spaziali più ridotte. Quella che nella modellistica climatica viene definita come scala regionale, e che in realtà è una scala continentale o sub-continentale, costituisce forse la scala minima ove sia possibile definire un clima stabile statisticamente e rappresenta quella che ha suscitato il maggiore interesse. Il motivo di questo interesse risiede nel fatto che le strategie di mitigazione sono per loro natura globali mentre le strategie e le politiche di adattamento devono essere necessariamente locali, creando quindi una forte domanda di informazioni più localizzate rispetto agli indici globali del cambiamento climatico.

Il caso del Mediterraneo è emblematico. Trattasi di una regione con orografia complessa, inserita al bordo tra le aree meteorologiche tropicali e quelle delle medie latitudini, teatro di delicate interazioni oceano-atmosfera e con la presenza di grandi contrasti termici. I modelli globali generalmente danno una rappresentazione molto approssimativa della regione e del suo clima, ma sono attualmente in corso di preparazione modelli globali ad alta risoluzione (circa 60-80 km) che permetteranno di produrre ed esaminare scenari climatici regionali sul Mediterraneo in modo fisicamente consistente.

Il problema può anche essere affrontato usando delle tecniche che permettano di trasportare i risultati globali alle scale più piccole: i cosiddetti metodi di *downscaling*. Il *downscaling* può essere effettuato in modo dinamico, ovvero usando un modello ad alta risoluzione, ma il cui dominio riguardi solo la porzione d'interesse, in questo caso il Mediterraneo. Modelli ad area limitata di questo tipo sono stati largamente usati nelle previsioni meteorologiche con la stessa filosofia, ma il loro uso nelle applicazioni climatiche è stato introdotto da Giorgi e Mearns (1999) e sono oggi largamente utilizzati (Giorgi *et al.*, 2004a e 2004b). È possibile utilizzare anche metodi statistici per effettuare la stessa operazione, ottenendo il cosiddetto *downscaling* statistico (Wilby *et al.*, 1998). Sono anche stati considerati modelli globali a risoluzione variabile (Cubasch *et al.*, 1995; Déqué e Pielke, 1995; Gobeil e Déqué, 2004) tali che la risoluzione viene intensificata in modo continuo sull'area di interesse.

Gli approcci al clima regionale, attraverso un modello globale o un *downscaling*, hanno ambedue difetti e vantaggi. Si è già accennato al costo nel caso dei modelli globali, mentre per i *downscaling* la propagazione degli errori da parte delle condizioni al contorno e la relazione del dominio prescelto con gli errori sistematici del modello usato per ottenere le condizioni al contorno sono generalmente elementi di seria preoccupazione.

2.3. Scenari⁶ nel Mediterraneo

Gli studi sugli effetti dei cambiamenti climatici sulla regione mediterranea sono relativamente scarsi. In genere, sono stati inclusi come parte delle analisi di scenari globali della regione europea (ad es., Rowell, 2005) oppure, più spesso, usando *downscaling*. Frequentemente, però, negli studi europei il dominio viene scelto in modo da non rappresentare in modo ottimale la regione Mediterranea, non comprendendola interamente oppure posizionandola eccessivamente vicino ai bordi, cosa che determina quindi la creazione di un *bias*⁷ (polarizzazione) rispetto alle condizioni al contorno.

Il *downscaling* dinamico è stato largamente usato sulla regione europea e diversi progetti finanziati dall'Unione Europea hanno affrontato questo problema in modo sistematico, come ad esempio il progetto PRUDENCE (<http://prudence.dmi.dk> e anche Christensen *et al.*, 2007; Deque *et al.*, 2007; Rummukainen *et al.*, 2004). Le analisi si sono principalmente concentrate sui cambiamenti nella temperatura (Rowell e Richard, 2006) e nella precipitazione (Tapiador e Sanchez, 2008) e sui cambiamenti attesi nella variabilità, specialmente come variazioni nella distribuzione di probabilità degli eventi intensi (Frei *et al.*, 2006). Dopo l'estate anomala del 2003,

⁶ Uno scenario è una descrizione plausibile di cosa potrebbe accadere nel Sistema Terra come lo conosciamo, basato su un insieme coerente ed internamente consistente di assunzioni sulle forze che lo guidano (soprattutto economiche, tassi di sviluppo tecnologico, andamento dei mercati, ecc.).

⁷ In altre parole, il fatto di non avere studi centrati sul Mediterraneo, ma sempre estrapolati da ricerche che riguardano regioni più ampie, che contengono il Mediterraneo solo in parte o che lo contengono ma mai al centro, fa sì che le conclusioni siano necessariamente deviate in maniera sistematica, perturbate in un senso ben preciso e non casuale.

molto lavoro è stato fatto sulla caratterizzazione del cambiamento della statistica delle onde di calore negli scenari (Schär *et al.*, 2004; Carril *et al.*, 2008; Rowell e Richard, 2006). Le precipitazioni sono state anche investigate rispetto al cambiamento della ciclogenesi mediterranea (Lionello *et al.*, 2008; Pinto *et al.*, 2006) e al conseguente spostamento delle *storm track*. Il Mar Mediterraneo, comunque, è assente da tutti questi modelli, sia globali sia regionali, oppure è descritto in maniera così primitiva da rendere poco affidabile la simulazione. In altre parole, poco o nulla si conosce sui possibili cambiamenti della circolazione del Mar Mediterraneo nei vari scenari di emissione. Non è chiaro se nel Mediterraneo esistano dei veri meccanismi di interazione, tali che l'atmosfera e l'oceano si influenzino vicendevolmente, oppure se l'influenza va solo in una direzione, dall'atmosfera all'oceano (Valero *et al.*, 2004).

Aumentare il livello di dettaglio rispetto alla scala tipica dei modelli climatici (circa 200-300 km nell'ultimo rapporto IPCC) non è però una questione semplice. Il costo computazionale, ovvero il numero di ore di calcolo necessarie alle simulazioni, aumenta in modo quadratico con la risoluzione, rendendo molto difficile un consistente aumento della risoluzione. Inoltre, l'articolata natura del problema dei cambiamenti climatici richiede competenze che vanno oltre le discipline scientifiche che tradizionalmente si sono occupate della fisica degli oceani e dell'atmosfera. Ad esempio, la valutazione dei costi degli impatti dei cambiamenti climatici si basa su sofisticati modelli econometrici, mentre la valutazione degli impatti sull'agricoltura richiede conoscenze specifiche agronomiche. Il CMCC (Centro EuroMediterraneo per i Cambiamenti Climatici⁸) ha sviluppato un modello globale basato su un modello spettrale atmosferico a risoluzione di circa 120 km, accoppiato a un modello oceanico e a un modello del ghiaccio marino (Gualdi *et al.*, 2003; 2008). I modelli sono globali e sono stati utilizzati per produrre scenari climatici secondo il protocollo SRES⁹ A2 e A1B, oltre che alle simulazioni corrispondenti ai periodi pre-industriali e alla riproduzione del clima del XX secolo. Le proiezioni del CMCC indicano come l'effetto dell'aumento dei gas serra potrà esprimersi in una diminuzione del 20-25% delle precipitazioni invernali sul Mediterraneo e in un aumento sostanziale delle temperature estive, rendendo più probabili le anomalie estive, come quella del 2003 (Schar *et al.*, 2004). La combinazione di scarse precipitazioni e alte temperature rende più facile la disidratazione dei suoli, specialmente per il sud della penisola e le isole.

Questi risultati attendono di essere ulteriormente verificati con il modello ad alta risoluzione e con il Mar Mediterraneo attivo, attualmente in preparazione al CMCC. La rappresentazione del Mediterraneo è, infatti, l'elemento più insoddisfacente nell'attuale generazione di modelli del clima. Un'insufficiente rappresentazione del Mar Mediterraneo infatti comporta una distorsione del bilancio idrico regionale che può influenzare l'evoluzione della temperatura al suolo. I risultati del modello CMCC sono tipici sia delle simulazioni globali sia di quelle regionali effettuate con altri modelli. Esistono sostanziali incertezze nell'intensità e nella distribuzione di questi effetti da un modello all'altro, specialmente se si considera la variabilità, come quella interannuale che certi modelli indicano in aumento, mentre altri indicano sostanzialmente inalterata. Tuttavia, i modelli concordano sull'aspetto di fondo della diminuzione delle precipitazioni, specialmente invernali, e l'aumento delle temperature, particolarmente quelle estive, nel bacino del Mediterraneo.

⁸ Attivo dal 2005, il Centro EuroMediterraneo per i Cambiamenti Climatici è un consorzio di Università, enti pubblici e privati di ricerca, di cui l'Istituto Nazionale di Geologia e Vulcanologia è il socio principale. Il Centro è partito sulla base di un finanziamento del MIUR e del Ministero dell'Ambiente e di un cofinanziamento del 30% da parte degli enti partecipanti. Il Centro è riuscito ad attrarre altri progetti europei e nazionali ed ha ultimato le procedure per l'acquisizione di un supercalcolatore tra i primi in Italia e in Europa in questo settore, conquistando il rispetto e la considerazione della comunità internazionale.

⁹ SRS sta per *Special Report on Emission Scenarios*, trattati di Scenari di emissione, formulati dall'IPCC, che si basano su stime verosimili di cambiamenti futuri nelle politiche, nelle tecnologie, nell'uso del suolo, nello stile di vita, nella demografia, nella crescita economica ecc., ogni combinazione delle quali dà origine a un diverso andamento delle emissioni di gas effetto serra e di altri inquinanti, che a sua volta serve a valutarne gli effetti sul clima. La famiglia di scenari A1 descrive un mondo futuro caratterizzato da una crescita economica molto rapida, con la popolazione globale che raggiungerà un massimo a metà secolo per poi declinare, e con una rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficienti. I temi dominanti sono le convergenze regionali, la *capacity building* e l'aumento delle interazioni culturali e sociali, con una sostanziale diminuzione delle differenze regionali di reddito pro-capite. La famiglia di scenari A1 si sviluppa in 3 gruppi che si distinguono dalla loro enfasi tecnologica in: fossile intensivo (A1FI), fonti di energia non fossile (A1T) o un bilancio fra tutte le fonti (A1B). La famiglia di scenari A2 descrive un mondo molto eterogeneo, con il tema dominante dell'auto-sufficienza e preservazione delle identità locali. La natalità fra le regioni converge molto lentamente, con un conseguente continuo aumento della popolazione. Lo sviluppo economico è orientato su base regionale e la crescita economica pro-capite e i cambiamenti tecnologici sono molto frammentati e più lenti rispetto alle altre trame. La famiglia di scenari B1 descrive un mondo convergente con la stessa popolazione globale come per la trama A1 e da molta importanza alle soluzioni globali per l'economia, alla sostenibilità sociale ed ambientale, includendo un miglioramento dell'equità, ma senza ulteriori iniziative climatiche. La famiglia di scenari B2 descrive un mondo in cui l'enfasi è sulle soluzioni locali per la sostenibilità economica, sociale ed ambientale. E' un mondo in cui la popolazione globale cresce a un tasso minore della famiglia A2, con livelli intermedi di sviluppo economico e cambiamenti tecnologici meno rapidi e più diversificati rispetto alle trame B1 e A1. Mentre anche lo scenario è orientato verso la protezione ambientale e l'equità sociale, si focalizza sui livelli locali e regionali (Quarto Rapporto di Valutazione IPCC, III Gruppo di Lavoro, sintesi per i decisori politici).

3. QUADRO DELLE EVIDENZE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SULLA BIODIVERSITÀ E SUL FUNZIONAMENTO DEGLI ECOSISTEMI

Considerato il ruolo primario della biodiversità nel funzionamento degli ecosistemi (Diaz *et al.*, 2006; Duffy e Stachowicz, 2006), una delle domande più rilevanti è se il riscaldamento globale porterà a un aumento o a una diminuzione di biodiversità. In genere, le strategie di conservazione della biodiversità si basano sul presupposto che le specie si modifichino su scale temporali molto lunghe. Oggi, con i rapidi cambiamenti climatici in atto quest'assunzione non è più valida e risulta necessario conoscere come specie ed ecosistemi si comporteranno su una scala temporale molto più breve (Araújo e Rahbek, 2006). Basti pensare che, nei secoli recenti, le attività antropiche hanno aumentato i tassi di estinzione fino a mille volte quelli tipici della storia della Terra (MEA, 2005).

Per studiare gli impatti attesi dei cambiamenti climatici sulla biodiversità è necessario conoscere sia come le variabili climatiche evolveranno nel futuro sia come il funzionamento di un ecosistema o di una specie si modificherà in relazione alle variazioni climatiche stesse. I modelli più utilizzati a questo scopo sono i modelli bioclimatici (*climate envelope*, in letteratura scientifica). Essi derivano empiricamente la presenza e la distribuzione delle specie tramite una regressione tra variabili climatiche e presenza/assenza di una o più specie. Su grande scala, la distribuzione di una specie è essenzialmente correlata a variabili climatiche quali temperatura, precipitazioni e stagionalità; utilizzando, come ingresso nel modello, il clima previsto secondo gli scenari forniti dai modelli dei cambiamenti climatici si ottiene la distribuzione attesa della specie studiata, anche sulla base di ipotesi sulla capacità di dispersione della specie stessa. Attraverso questi modelli è possibile studiare il rischio di perdita di specie vegetali che, ad esempio, in Europa è stimato essere molto elevato: per 7 scenari di cambiamento climatico al 2080, su 1.350 specie studiate (pari al 10% circa della flora nota in Europa) risultano a rischio di estinzione fino al 50% di queste; esiste, comunque, elevata variabilità a seconda dello scenario di cambiamenti climatici considerato (Thuiller *et al.*, 2005). In ogni caso, le aree montane risultano più a rischio (fino al 60% di perdita di specie). Anche l'area del Mediterraneo è considerata tra le più vulnerabili ai cambiamenti climatici poiché soggetta a numerosi impatti, ad esempio: scarsità di risorse idriche, aumento del rischio di incendi, diminuzione della capacità di immagazzinamento del carbonio, spostamento di specie verso latitudini maggiori. Più in generale, un'applicazione dei modelli bioclimatici a oltre 1.000 specie distribuite sul 20% della superficie terrestre prevede che il rischio di estinzione al 2050 (dovuto alla contrazione delle aree idonee alle specie studiate), vari tra il 18%, nel caso ottimistico di cambiamenti climatici contenuti, e il 35%, nel caso pessimistico di cambiamenti climatici elevati (Thomas *et al.*, 2004). Va comunque sottolineata l'elevata incertezza delle stime a causa della grande variabilità dei modelli bioclimatici stessi (Botkin *et al.*, 2007).

Secondo Leemans e van Vliet (2004) gli impatti ecologici dei cambiamenti climatici sono tipicamente sottostimati poiché le analisi scientifiche hanno come ingresso scenari futuri di cambiamento climatico nel medio-lungo termine e non tengono invece conto degli effetti che gli eventi estremi (come ondate di calore, siccità, alluvioni) hanno sul breve termine. Tali eventi possono comportare gravi conseguenze sugli ecosistemi e sui sistemi socio-economici. Allo stesso tempo, però, le piccole, continue e progressive variazioni di temperatura o di altre variabili climatiche sono in grado di modificare gli organismi, influenzando sulla loro capacità di risposta e di adattamento. Ad esempio, se la temperatura aumentasse di 0,3°C per decennio (3°C al 2100) solo il 30% degli ecosistemi riuscirebbe ad adattarsi; se, invece, la temperatura aumentasse di 0,1°C (1°C al 2100) per decennio la percentuale di ecosistemi che riuscirebbe ad adattarsi salirebbe al 50% (Leemans ed Eickhout, 2004).

3.1. Impatti dei cambiamenti climatici globali sulla fauna

I cambiamenti climatici in atto hanno un effetto diretto sulla fenologia delle specie. Eventi che scandiscono nell'arco dell'anno il ciclo di vita (riproduzione, deposizione di uova, migrazione e letargo) possono essere anticipati o ritardati a seconda dell'aumento delle temperature, in particolare delle minime. Nelle specie animali, i fenomeni biologici stagionali spesso dipendono dalla "temperatura accumulata", ovvero dal calore necessario all'organismo per passare da uno stato all'altro del proprio ciclo di vita (Peñuelas e Filella, 2001) e si possono manifestare con l'anticipo della riproduzione o dell'emergere dallo stadio larvale di alcune specie (Walther *et al.*, 2002).

Cambiamenti nella fenologia sono stati osservati anche e, tipicamente, nei tempi di migrazione (Peñuelas e Filella, 2001). Per gli uccelli migratori l'arrivo su territorio di riproduzione o di svernamento è determinante per il successo riproduttivo, la sopravvivenza e la *fitness* (Pendlebury *et al.*, 2004). Di fatto la fenologia delle specie migratorie risente delle modifiche regionali del clima di tutte le aree in cui le specie trascorrono parte dell'anno (Jonzén *et al.*, 2006; Both, 2007). Ad esempio, in un sito in Oxfordshire, U.K., si è visto che, per 17 su 20 specie studiate, sia le date di arrivo sia quelle di partenza si sono anticipate di 8 giorni negli scorsi 30 anni. L'arrivo è anticipato per l'aumento delle temperature invernali nell'Africa Sub-Sahariana, mentre la partenza per le elevate temperature registrate nel sito di arrivo (Cotton, 2003).

Un'ottima ricognizione delle relazioni esistenti tra gli uccelli e i cambiamenti climatici è contenuta in "Birds and Climate Change" (Moller *et al.*, 2004). Gli uccelli migratori mostrano adattamenti nella fenologia, biologia riproduttiva e strategia migratoria in risposta al mutamento di parametri climatici come piovosità e temperatura. Infatti grazie anche al loro metabolismo molto attivo e alla loro vagilità, gli uccelli sono molto sensibili ai cambiamenti climatici e sono stati investigati da anni. Sono state individuate due ipotesi di come i cambiamenti climatici influenzano le dimensioni di popolazione: *tub-hypothesis* che suppone una forte interferenza nel periodo non-riproduttivo condizionando la sopravvivenza nel periodo invernale, in particolare per le specie nidicole; *tap-*

hypothesis che suppone l'interferenza durante il periodo riproduttivo condizionando il reclutamento di nuovi individui l'anno successivo, soprattutto per le specie nidifughe.

Come già anticipato, la previsione degli impatti attesi dei cambiamenti climatici sulla biodiversità e, quindi, in particolare sulla componente faunistica, è basata sull'utilizzo di modelli che legano l'andamento delle variabili climatiche al funzionamento di una popolazione o di una comunità di popolazioni all'interno di un ecosistema (Thuiller, 2007). Naturalmente l'attendibilità delle previsioni dipende sia dalla bontà dei modelli climatici regionalizzati, che tracciano gli scenari delle variabili climatiche future, sia dalla bontà dei modelli che legano fauna e clima. Questi ultimi possono essere classificati in diverse categorie. In primo luogo possono essere statici o dinamici. I modelli statici usano relazioni empiriche che legano i fattori climatici alle variabili biotiche. La biosfera è considerata all'equilibrio e le relazioni sono di solito ottenute mediante metodi statistici (regressione logistica, GLM, ecc.). I modelli dinamici simulano invece condizioni climatiche non stazionarie e la risposta variante nel tempo delle variabili faunistiche (ad es. presenza della specie, distribuzione spaziale, abbondanza). In secondo luogo i modelli possono essere per una singola specie o per una comunità di specie. I primi simulano singole popolazioni come se non interagissero con altre specie pure soggette ai cambiamenti climatici, i secondi includono le interazioni e simulano quindi variazioni nel funzionamento della comunità ecologica. In terzo luogo, i modelli possono essere a scala geografica locale o globale. I modelli che utilizzano direttamente i risultati dei modelli climatici globali (AOGCM), che impiegano griglie di migliaia di chilometri quadrati, non possono che predire in maniera rozza la presenza/assenza di una specie su una scala geografica di bassa risoluzione. Sono i cosiddetti modelli bioclimatici (*climate envelope*, nella letteratura scientifica). I modelli locali invece utilizzano gli scenari climatici regionalizzati e possono dettagliare l'abbondanza e la demografia delle specie animali e, nei modelli più avanzati, anche i processi fisiologici e le interazioni ecologiche.

Premesso che i modelli previsionali per la fauna sono molto più rari di quelli per la vegetazione, va anche detto che la grande maggioranza dei modelli esistenti sono statici, per singole specie e a scala globale. In particolare, per quanto riguarda l'uso di modelli quantitativi per la fauna italiana, i casi di studio sono ancora molto pochi. Naturalmente tendenze molto generali e semplificate possono venire colte utilizzando semplici modelli concettuali che semplicemente proiettano nel tempo tendenze già osservate nel recente passato. Le specie che tenderanno a spostare maggiormente il proprio areale di distribuzione saranno quelle che vivono in ambienti fortemente limitati dalla temperatura (specie alpine) e quelle caratterizzate da elevata mobilità (insetti, uccelli migratori o invertebrati marini). Risulteranno più vulnerabili specie con areali di distribuzione molto piccoli, con limitata tolleranza alle variazioni e con limitate capacità di dispersione. Spesso queste caratteristiche sono in contrapposizione: ungulati alpini di grande taglia hanno buone capacità di dispersione, ma areali piccoli e frammentati che saranno ulteriormente ridotti dalla necessità di portarsi a quote più elevate. Negli ecosistemi di acqua dolce gli impatti saranno dovuti all'aumento della temperatura dell'acqua e ai cambiamenti del regime idrico dei fiumi. Portate idriche ridotte nei periodi estivi saranno critiche per la sinergia che si creerà tra alte temperature atmosferiche e scarsa capacità termica di piccoli volumi d'acqua. Spostamenti dell'areale di distribuzione e declino di popolazioni sono stati osservati ad esempio per la trota fario (*Salmo trutta*) nel reticolo fluviale svizzero (Hari *et al.*, 2006). Dobbiamo aspettarci simili effetti anche per la fauna ittica italiana sia nelle regioni alpine sia, a maggior ragione, nelle regioni mediterranee durante il periodo estivo. In ambiente marino, sarà probabile un'accentuazione dei processi già osservati in Mediterraneo: l'introduzione e il successivo insediamento di specie di origine tropicale provenienti dall'Atlantico o dalla regione indo-pacifica (tropicalizzazione) e lo spostamento verso nord di specie ad affinità calda (meridionalizzazione). Specie esotiche tropicali potranno, inoltre, essere più facilmente introdotte con le acque di zavorra oppure fra gli organismi che colonizzano le chiglie delle navi o che si accompagnano accidentalmente a specie importate per il mercato alimentare, per l'acquariologia o anche per scopi scientifici. Qui di seguito sono segnalate e brevemente descritte alcune delle analisi quantitative condotte sulla fauna italiana.

Studi sulla processionaria del pino (*Thaumetopoea pityocampa*) mostrano come questo defoliatore stia espandendo il proprio areale di distribuzione in conseguenza dell'aumento delle temperature minime che consentono una maggiore sopravvivenza delle larve. L'areale di distribuzione della specie è, infatti, determinato dalla temperatura invernale e dalla radiazione solare. Si è osservato uno spostamento di 110-230 m in quota nel periodo 1975-2004 in Italia e di 87 km in Francia nel periodo 1972-2004 (Buffo *et al.*, 2007; Battisti *et al.*, 2005). Questi effetti sono imputabili ai progressivi aumenti di temperatura negli anni indicati. L'ondata di calore del 2003 invece ha permesso, grazie a una più sostenuta attività di volo, la rapida occupazione di nuovi siti verso quote più elevate e di nuove piante ospiti, quale il pino mugo (Battisti *et al.*, 2006), oltre al pino nero e al pino silvestre, ospiti abituali. La buona capacità del parassita di conquistare nuovi siti e piante è dovuta, oltre all'adattabilità tipica di una specie colonizzatrice, alla mancanza di fattori di limitazione naturale che invece esistono nelle aree tradizionalmente occupate. L'esempio mette in luce la vulnerabilità degli ecosistemi forestali agli attacchi di insetti, fenomeno in aumento a causa dei cambiamenti climatici. Come già accennato, infatti, gli insetti sono in grado di rispondere in modo diretto e veloce all'aumento della temperatura grazie ai rapidi cicli di sviluppo, all'alto potenziale riproduttivo, alla elevata capacità di adattamento fisiologico alle mutate condizioni ambientali. Simili risultati di espansione dei confini di lepidotteri (farfalle e falene) sono stati trovati in altre regioni d'Europa, per le quali Parmesan (2006) riassume i risultati principali. Infine, è evidente come questo fenomeno non sia limitato agli ecosistemi forestali, ma possa essere esteso ad esempio alla diffusione di parassiti di colture agricole o di agenti patogeni causa di gravi malattie per l'uomo (ad es., la trasmissione dell'encefalite o della malattia di Lyme tramite zecche).

Si è visto che l'espansione dell'areale di distribuzione della processionaria del pino è stata favorita anche dalla assenza di fattori di limitazione naturale. Ma i cambiamenti climatici possono anche favorire specie aliene, come è stato osservato in Italia centrale e settentrionale per la tartaruga *Trachemys scripta*, rettile delle paludi sud orientali degli Stati Uniti, (Ficetola *et al.*, 2009). L'introduzione di *T. scripta* negli ambienti naturali è frutto di rilasci di individui commercializzati; *T. scripta* infatti è stata venduta diffusamente in numerosi paesi come animale da compagnia ed è diventata una delle 100 specie aliene più invasive al mondo secondo l'IUCN. Tuttavia, solo un sottinsieme delle popolazioni introdotte riesce a riprodursi. Dato l'impatto che la diffusione di questa specie può causare agli ecosistemi di acqua dolce, è importante sapere quali popolazioni hanno maggiori possibilità di divenire riproduttive in modo da poter intervenire. Ficetola e colleghi (2009) hanno trovato, attraverso l'applicazione di modelli bioclimatici, che le popolazioni riproduttive di *T. scripta* sono associate ad aree con clima più caldi, maggiori radiazioni solari e maggiori precipitazioni rispetto alle popolazioni in cui la riproduzione non è stata osservata: tutte condizioni favorite dai cambiamenti climatici. Infatti, si prevede un aumento notevole delle aree adatte alle popolazioni riproduttive proprio come conseguenza dei cambiamenti climatici.

Come terzo esempio si può citare il caso dello stambecco (*Capra ibex*), animale con un forte valore emblematico dato che ha evitato l'estinzione con la costituzione del Parco Nazionale del Gran Paradiso, primo parco nazionale italiano. Ora è presente in piccole aree frammentate disseminate su tutte le Alpi, grazie ai numerosi prelievi dall'unica colonia residua, situata sul massiccio del Gran Paradiso. Le costanti attività di censimento condotte dal 1956 nel Parco hanno permesso di collezionare una serie di dati ecologici eccezionalmente lunga, che è stata oggetto di numerosi studi alcuni dei quali hanno indagato la relazione tra le dinamiche di popolazione e le condizioni climatiche (Jacobson *et al.*, 2004; Bianchi *et al.*, 2006; Corani e Gatto, 2007). Queste ricerche forniscono una base di conoscenza preziosa su cui sviluppare analisi d'impatto dei cambiamenti climatici. In particolare è stato messo a punto un modello (Jacobson *et al.*, 2004; Corani e Gatto, 2007) del numero totale di individui in cui il tasso annuale di crescita dipende dallo spessore nevoso medio invernale e da un fattore di interazione tra lo spessore nevoso e la densità di stambecchi. In scenari futuri di cambiamenti climatici, le variazioni attese del regime delle precipitazioni e della temperatura influiranno sullo spessore nevoso, influenzando quindi la dinamica della popolazione. In particolare, a causa della riduzione attesa dello spessore del manto nevoso, i modelli di dinamica della popolazione prevedono un aumento del numero di individui (De Leo *et al.*, 2008). Tuttavia, i risultati contrastano con osservazioni di campo che mostrano un aumento della mortalità dei cuccioli probabilmente legata al degrado della qualità del pascolo per l'anticipo dello scioglimento della neve nei mesi primaverili (Pettorelli *et al.*, 2007). È, inoltre, stato osservato un cambiamento delle abitudini di pascolo (riduzione del tempo dedicato al pascolo con conseguenze sullo stato di salute dell'individuo) della specie dovuto all'aumento della temperatura e della radiazione solare (Aublet *et al.*, 2009). Bisogna anche considerare che i cambiamenti climatici possono influire sulle specie modificandone l'habitat vocato. Per quanto riguarda lo stambecco, un modello di vocazionalità faunistica sviluppato per il Parco dell'Adamello, sulle Alpi Retiche lombarde, mostra un notevole impatto dei cambiamenti climatici sull'habitat (Fiorese *et al.*, 2005; Pedrotti e Tosi, 1996). Il riscaldamento globale aumenta l'habitat disponibile invernale dello stambecco, ma provoca una consistente riduzione dell'habitat potenziale in estate, creando così un collo di bottiglia che influirà negativamente sulla capacità portante degli stambecchi nell'area del Parco.

Da quanto esposto emergono alcune osservazioni importanti: prima di tutto, è chiara la necessità di individuare e integrare nei modelli gli effetti diretti e quelli indiretti (ad es., nel caso dello stambecco, lo spessore nevoso e l'effetto dell'anticipo della primavera sulla qualità dei pascoli). In secondo luogo, emerge la necessità di integrare risultati di modelli differenti per poter spiegare risultati a prima vista contrastanti. Sempre per quanto riguarda lo stambecco, il risultato di un modello di dinamica di popolazione mostra un aumento atteso del numero di individui; tuttavia questo risultato dovrebbe essere letto insieme ai risultati dei modelli vocazionali che indicano una contrazione notevole dell'habitat. La stima della capacità portante della popolazione ottenuta da modelli di vocazionalità va quindi integrata nei modelli demografici per ottenere previsioni realistiche. Questa integrazione è ancora carente negli attuali modelli di impatto.

3.2. Impatti sulla flora e la vegetazione

È noto fin dall'antichità come le piante siano molto sensibili al clima e ne rivelino le variazioni: se da un lato la distribuzione sul territorio dei tipi vegetazionali indica la presenza di zone o fasce bioclimatiche, dall'altro il ritmo fenologico di singole specie è strettamente dipendente dall'andamento meteorologico stagionale. Ne deriva che potenziali cambiamenti climatici in futuro determineranno modifiche sulla distribuzione geografica delle specie e modificazioni temporali nella comparsa delle fenofasi dei vegetali, con probabili conseguenze sulla produttività delle colture e in generale sul paesaggio vegetale.

Le osservazioni e i calendari fenologici sono usati in agricoltura e in altre attività umane da migliaia di anni e serie storiche importanti di osservazione possono essere trovate in molti documenti. Esistono, infatti, importanti archivi storici, come quello che ci proviene ad esempio dal Giappone, con dati registrati risalenti fin dai primi anni del 1800 (Lauscher, 1978), o quella ancora prima dall'Europa, cominciata agli inizi del 1700 (Sparks e Carey, 1995). Più recentemente, nel corso degli ultimi quindici anni, la fenologia ha ritrovato nuovo impulso e interesse da parte della comunità scientifica, dapprima per applicazioni in studi sulle dinamiche stagionali della vegetazione (Myneni *et al.*, 1997; Lucht *et al.*, 2002), e sull'elaborazione di modelli fenologici in grado di utilizzare i dati raccolti per predire capacità e produttività in determinate regioni agricole (Beaubien e Freeland, 2000), e in seguito come fonte di robusti indicatori delle variazioni climatiche a medio e lungo periodo, come proposto anche dall'*European Topic Centre on Air and Climate Change* (ETC-ACC) dell'Agenzia Europea sull'Ambiente (EEA).

Alle medie e alte latitudini l'avvento di fasi fenologiche primaverili, come la germogliazione, il dispiegamento fogliare, e la fioritura, sono regolate principalmente dalle temperature, tanto che un cospicuo numero di studi ha trovato buone correlazioni tra le fenofasi primaverili e la temperatura dell'aria (Menzel e Fabian, 1999; Wielgolaski, 1999; Abu-Asab *et al.*, 2001; Chmielewski e Rötzer, 2002; Fitter e Fitter, 2002; Sparks e Menzel, 2002; Chmielewski *et al.*, 2004), mentre è ancora poco chiaro il segnale climatico che controlla la fenologia autunnale (Whalther *et al.*, 2002).

La grande quantità di dati disponibili ha portato l'Europa ad avere una posizione preminente negli studi di questo genere condotti a scala nazionale. In Estonia, ad esempio, l'inizio della primavera ha mostrato un avanzamento di circa 8 giorni negli ultimi 80 anni, con una rapidità doppia dei secondi 40 anni rispetto ai primi, e con differenze anche spaziali dovute all'influenza del mar Baltico tanto da favorire l'inizio della primavera nelle zone costiere rispetto a quelle più interne (Ahas, 1999). Identici risultati sono stati conseguiti in Germania (Menzel *et al.*, 2001) analizzando dati riferibili a un periodo di 45 anni (1951-1996), dove indicatori specifici hanno evidenziato l'avanzamento primaverile in 8-10 giorni e un prolungamento autunnale registrato in 1,3-4,5 giorni, con un andamento non lineare, ma esponenziale anche qui, con gli ultimi 23 anni più marcati (1974-1996). L'inizio della fioritura è stato l'indicatore utilizzato in Inghilterra utilizzando dati osservati su 385 specie durante sei decenni, mostrando in media 4,5 giorni di anticipo a partire dagli anni '80 dopo quattro decenni di modeste variazioni (Fitter e Fitter, 2002).

Per quanto riguarda il resto del pianeta, in un periodo di 61 anni (1936-1945 e 1976-1998), sono state studiate 55 fenofasi nel Wisconsin meridionale, nell'America Settentrionale (Bradley *et al.*, 1999), con una media di 7,3 giorni di anticipo per le 55 fenofasi, ma con la caratteristica che l'avanzamento è risultato più marcato per quelle fasi che avvengono all'inizio della primavera. Ad Edmonton in Alberta, Canada, la fioritura di *Populus tremuloides* è anticipata di 8 giorni negli ultimi 10 anni, e di ben 24 nell'ultimo secolo (Beaubien e Freeland, 2000). Delle 100 specie osservate in 30 anni in Washington, DC, si è visto come 89 hanno mostrato una media di 4,5 giorni di anticipo sul tempo della prima fioritura (le altre 11 hanno subito un ritardo), e il fenomeno era correlato con l'incremento locale della temperatura minima (Abu-Asab *et al.*, 2001). Negli USA Occidentali si è visto come osservazioni degli ultimi 50 anni sulla fioritura di *Syringa vulgaris* e *Lonicera japonica* la comparsa dei primi fiori è anticipata di 5-10 giorni e solo negli ultimi 30 anni (Cayan *et al.*, 2001). Mentre Nel Nord-Est degli USA, basandosi su dati provenienti da 72 località e riferiti al periodo 1965-2001, è stato registrato un anticipo di 8-10 giorni della fioritura e della comparsa delle prime foglioline del lillà, del melo domestico e della vite vinifera (Wolfe *et al.*, 2005).

In linea con gli studi Europei e Americani è il lavoro condotto in Seoul, Corea, dove 80 anni di osservazioni (1922-2004) sulla prima fioritura degli arbusti *Forsythia coreana* e *Rhododendron mucronulatum* e delle specie arboree *Prunus yedoensis*, *Prunus persica* e *Robinia pseudoacacia*, hanno mostrato un generale anticipo, più marcato per le specie a fioritura precoce, come le prime quattro, di circa 16 giorni, e meno spinto per *Robinia pseudoacacia* con circa 4 giorni, associato a un incremento della temperatura dell'aria di circa 2°C registrato nello stesso periodo. Risulta interessante riportare, infine, quello che è emerso in alcune regioni delle alte latitudini e altitudini. Ad esempio, nella penisola di Kola, nella taiga della Russia Settentrionale, la lunghezza della stagione vegetativa è decresciuta durante il periodo analizzato (1930-1998) a causa del ritardo primaverile di circa 16 giorni e all'anticipo del periodo autunno-invernale di circa 13 giorni (Kozlov e Berlina, 2002). Simili osservazioni sono state fatte in Colorado Rocky Mountain, USA, dove non è stato trovato alcun significativo cambiamento nell'inizio della stagione di crescita nel periodo 1975-1999.

In conclusione, risulta evidente come studiare le caratteristiche del *trend* esistente tra la variabilità interannuale di una fenofase e i cambiamenti climatici sia reso sicuramente molto più complicato dalla concomitante presenza di effetti dovuti, ad esempio, ai cambiamenti di altre variabili ambientali, come: i livelli di CO₂ (Houghton *et al.*, 2001), i cicli dell'attività solare e le oscillazioni di tipo El Niño Meridionale e dell'Atlantico del Nord (Jones *et al.*, 1997). In ogni caso questi studi hanno registrato, perlomeno alle medie latitudini dell'emisfero settentrionale, un anticipo dell'avvento delle fenofasi primaverili, e che questi cambiamenti sono stati più profondi per gli eventi fenologici propri delle primissime fasi dell'inizio della stagione vegetativa (ad es., rottura delle gemme, prima fioritura), e dove è stato possibile utilizzare anche dati riguardanti fenofasi autunnali, pochi casi in verità vista l'incertezza legata alle osservazioni di questa stagione, si è visto che l'anticipo primaverile è accompagnato da un ritardo dell'inizio autunnale con conseguente allungamento della stagione vegetativa in tutte e due le estremità. A questi cambiamenti sono associati gli incrementi delle temperature invernali e inizio primavera che sono stati più pronunciati rispetto agli altri periodi dell'anno (Sparks e Menzel, 2002; Fitter e Fitter, 2002), e che le piante legnose si sono dimostrate meno sensibili ai cambiamenti climatici rispetto a quelle erbacee (Post e Stenseth, 1999; Arft *et al.*, 1999). Inoltre, le regioni che sono interessate da un raffreddamento climatico (Folland e Karl, 2001), in netto contrasto con la generale tendenza al surriscaldamento degli ultimi decenni, non hanno evidenziato alcun anticipo fenologico, ma ritardi nell'avvento della stagione vegetativa. Tra queste regioni, oltre a quelle già ricordate sopra, citiamo: i Balcani (Menzel, 2000), gli Urali (Ahas *et al.*, 2002), Virginia e Nord Carolina (Fitzjarrald *et al.*, 2001).

Vista l'importanza di avere a disposizione importanti basi di dati di osservazioni fenologiche, va citata a livello nazionale l'esperienza condotta nell'ambito dell'iniziativa *Count Down 2010* del progetto "*Mappa della Primavera*", che ha realizzato un monitoraggio triennale dello sviluppo delle foglie, dei fiori e dei frutti di alcune specie vegetali naturali nelle principali aree protette del paese, rappresentando di fatto un "test" interessante per comprendere meglio le evidenti anomalie climatiche registrate negli ultimi anni nel nostro paese e i loro effetti sulle piante. Da

questo studio sono emerse alcune interessanti tendenze osservate. Si è visto, infatti, come l'inizio della fioritura di *Sambucus nigra* sia anticipata di 5 giorni per ogni °C di innalzamento della temperatura media registrata nel trimestre febbraio-marzo-aprile, e che questo sviluppo florale sia cominciato nel sud e si sia propagato verso latitudini maggiori con un ritmo osservato di circa 500 km ogni 17 giorni. Per *Spartium junceum*, invece, la risposta all'incremento per ogni °C della temperatura media del trimestre marzo-aprile-maggio è stata l'anticipo dell'inizio della fioritura di 4 giorni, con una propagazione del fenomeno da sud verso nord di 500 km ogni 19 giorni.

Accanto ai risultati di questa esperienza bisogna segnalare altre realtà che possono vantare oggi molti più anni di attività nel nostro Paese come: la Rete Fenologica Italiana, che raccoglie informazioni relative alle date di fioritura di un set di specie vegetali selezionate presenti in 11 giardini distribuiti sul territorio nazionale. La Rete dei Giardini Fenologici che consta di circa 50 giardini attivi, gestita da differenti Enti: Regioni, Università, ARPA e CNR. La Rete CONECOFOR gestita dal Corpo Forestale dello Stato (www.corpoforestale.it), basata su 31 aree permanenti comprendenti tutti i principali tipi di ecosistemi forestali italiani, nelle quali, tra le altre ricerche, sono svolti rilievi fenologici con frequenza settimanale a partire dal 2003. E infine, su iniziativa dell'Ufficio Centrale di Ecologia Agraria (UCEA), del Ministero per le Politiche Agricole e Forestali, è stato portato a termine un progetto finalizzato di ricerca in campo fenologico, con fini applicativi per l'agricoltura, denominato PHENAGRI.

In conclusione, risulta estremamente importante rafforzare questi *network* di aree di monitoraggio a scala nazionale e standardizzare le loro attività su specie indicatrici delle varie regioni climatiche (Alpina, Temperata e Mediterranea) mediante l'adozione di metodologie standard di monitoraggio. Tali specie possono essere sia di interesse agrario che specie naturali ed è fondamentale il coinvolgimento delle Associazioni di Categoria e delle Aree Protette al fine di aumentare il più possibile la rete di monitoraggio e mediante questa esperienza veicolare l'attività di sensibilizzazione dell'opinione pubblica sul tema dei cambiamenti climatici.

3.2.1 Impatti sulla flora di alta quota

Gli ambienti di alta quota alpini e appenninici sono considerati un importante *hotspot* di biodiversità per la loro elevata diversità floristica e la ricchezza di specie endemiche (Nagy *et al.*, 2003; Körner, 2004). Alcuni distretti montuosi delle Alpi meridionali, come ad esempio le Alpi marittime, le Prealpi bergamasche, le Alpi sudorientali sono state nel periodo delle glaciazioni pleistoceniche delle isole emergenti dai grandi ghiacciai, distanti tra loro decine di chilometri, e hanno sviluppato una flora di alta quota particolarmente ricca di endemismi (Gerdol *et al.*, 2008). Anche la dorsale appenninica è costituita da "isole" orografiche della regione alpina nel Mediterraneo centrale, che sono occupate da molti endemismi e popolazioni frammentate e di ridotte dimensioni. Molti studi hanno messo in evidenza come questi ecosistemi, di tale importanza in termini di biodiversità, siano effettivamente molto sensibili agli effetti del riscaldamento climatico, e recenti ricerche hanno rivelato che gli effetti riguarderanno il cambiamento della distribuzione delle specie e delle comunità vegetali d'altitudine, e l'estinzione di alcune specie microterme ed endemiche dalle montagne dell'Europa meridionale (ad es., Guisan *et al.*, 1995; Körner 1999; Pauli *et al.*, 2001, Theurillat e Guisan 2001; Dirnbock *et al.*, 2003).

Tra le specie più minacciate di tali ambienti, vi sono in primo luogo le specie microterme¹⁰ (che vivono esclusivamente alle quote più elevate). Per le Alpi, sono principalmente delle specie endemiche rare a distribuzione stretta e delle specie artico-alpine rare legate a degli ambienti poco estesi. Tuttavia, anche le specie microterme a distribuzione più ampia possono essere regionalmente minacciate come è stato valutato nelle Alpi svizzere (Guisan e Theurillat 2001).

Per la catena appenninica, si hanno molte specie endemiche e alcune specie artico-alpine, circumboreali, orofitiche europee al limite sud del loro areale di distribuzione. Tra queste si possono citare *Soldanella minima* Hoppe, *Soldanella alpina* L., *Veronica alpina* L., *Salix erbacea* L., *Alopecurus alpinus* Vill., *Androsace vitaliana* (L.) Lapeyr. subsp. *praetutiana* (Sünd.) Kress, *Cerastium thomasi* Ten., *Galium magellense* Ten., *Ranunculus magellensis* Ten., *Taraxacum glaciale* E. e A. Huet ex Hand-Mazz., *Viola magellensis* Porta e Rigo ex Strobl., *Leontopodium nivale* (Ten.) Huet ex Hand-Mazz., *Alyssum cuneifolium* Ten. subsp. *cuneifolium*, *Androsace mathildae* Levier, *Artemisia umbelliformis* Lam. subsp. *eriantha* Ten. Vallès-Xirau e Branas, *Adonis distorta* Ten., *Kobresia myosuroides* (Vill.) Fiori, *Ranunculus seguierii* Vill. subsp. *seguierii*, *Sibbaldia procumbens* L., *Silene acaulis* subsp. *bryoides* (Jord.) Nyman (Conti *et al.*, 2005; Rossi *et al.*, 2004; Stanisci *et al.*, 2006). Molte di queste specie, pur essendo già annoverate nelle *checklist* delle specie da proteggere a livello regionale e nazionale (alcune anche nelle IUCN), potrebbero essere in pericolo di estinzione per effetto dei cambiamenti climatici per cause molteplici: scomparsa di habitat idonei, impossibilità di migrazione verso l'alto in quanto non è presente un habitat idoneo a quote più elevate, risalita di specie termofile competitive provenienti dalle fasce bioclimatiche inferiori (Guisan e Theurillat 2001; Grabherr *et al.*, 2001; Rossi *et al.*, 2004; Petriccione, 2005; Stanisci *et al.*, 2005; Pauli *et al.*, 2007; Parolo *et al.*, 2008).

¹⁰ Citiamo ad esempio *Androsace brevis* (Hegetschw.) Ces., *A. wulfeniana* W.D.J. Koch, *Braya alpina* Stern. e Hoppe, *Campanula zoysii* Wulfen, *Draba dolomitica* Buttler, *Gentiana brentae* Prosser e Bartoli, *G. rostanii* Verl., *Moehringia concarenae* F. Fen. e F. Martini, *Pedicularis julica* E. Mayer, *Phyteuma humile* Gaudin, *Primula glaucescens* Moretti, *P. grignensis* D. M. Moser, *P. spectabilis* Tratt., *Ranunculus traunfellneri* Hoppe, *Saxifraga aphylla* Sternb., *S. facchini* W. D. J. Koch, *S. presolanensis* Engl., *Senecio halleri* Dandy, *S. persoonii* De Not., *Viola comolia* Massara; per le secunde *Carex atrofusca* Schkuhr, *C. bicolor* All., *C. maritima* Gunnerus, *C. microglochin* Wahlenb., *Juncus arcticus* Willd., *Saxifraga cernua* L., *Tofieldia pusilla* (Michx.) Pers. (Aeschmann *et al.*, 2004).

Osservazioni specifiche effettuate sugli Appennini Centrali (Petriccione, 2005) evidenziano una tendenza all'adattamento degli ecosistemi di alta quota a un aumento dell'aridità: sulla base dei dati rilevati negli ultimi 9-16 anni in aree permanenti tra 1.000 e 2.300 m s.l.m., sono stati documentati recenti cambiamenti nella composizione e abbondanza di specie nelle comunità vegetali alpine degli Appennini Centrali. Un'analisi comparativa preliminare dei cambiamenti nella composizione di specie, nelle forme biologiche, nelle strategie di vita e nei tipi morfologico-funzionali consente di riconoscere un cambiamento del 10-20% nella composizione di specie che si è verificato nelle comunità poste al di sopra del limite naturale degli alberi, in connessione con un incremento significativo di specie xerofitiche e stress-tolleranti. Questi dati possono essere spiegati considerando la forte riduzione del periodo di innevamento, l'incremento significativo delle temperature minime giornaliere e mensili e la riduzione delle precipitazioni estive, ampiamente documentati da puntuali osservazioni meteorologiche a lungo termine.

La sensibilità diversa delle diverse specie ai cambiamenti climatici potrebbe, quindi, avere un impatto significativo sulla biodiversità e sull'integrità degli ecosistemi alpini. Mentre le specie più comuni diverranno più abbondanti, quelle rare tenderanno a scomparire (Korner e Walther, 2001). Si verificherà insomma, a causa della diversa sensibilità e capacità di migrazione delle specie, la progressiva disgregazione delle biocenosi. Un elemento di particolare criticità è rappresentato dalla rapida risposta alla riduzione della copertura nevosa prolungata (Galen e Stanton, 1995; Huelber *et al.*, 2006; Inouye, 2008). Questo effetto potrà essere maggiormente marcato a medio-basse latitudini, in quanto l'aumento della temperatura porterà alla progressiva diminuzione di aree con prolungata copertura nevosa. Ciò determinerà rapidi cambiamenti nella distribuzione di diverse specie sensibili a tale parametro ambientale, come nel caso della specie artico-alpina *Salix herbacea*.

Utilizzando diversi approcci, sono già state osservate sulle Alpi, modificazioni nel pattern di distribuzione delle specie indotte dal riscaldamento climatico e/o da cambiamenti di uso del suolo che possono agire in maniera sinergica esacerbando gli effetti (Grabherr *et al.*, 1994; Gottfried *et al.*, 1999; Walther *et al.*, 2005; Pauli *et al.*, 2007; Vittoz *et al.*, 2008a). Uno degli effetti più significativi causato dalla riduzione del carico di bestiame negli ultimi decenni negli ambienti d'alta quota, di concerto con il riscaldamento climatico in atto, è stato l'innalzamento del limite degli alberi e l'espansione della fascia degli arbusteti prostrati così da ridurre la superficie disponibile alla sopravvivenza delle specie di alta quota (Motta e Nola, 2001; Gehrig-Fasel *et al.*, 2007; Vittoz *et al.*, 2008b).

Oltre a questi processi gli ambienti alto montani sono soggetti spesso a una pressione antropica associata al turismo prevalentemente invernale, che comporta la realizzazione di vie di comunicazione e impianti di risalita in altitudine, che possono determinare il degrado ambientale di vari habitat e minacciare fortemente alcuni ambienti particolarmente fragili, quali quelli associati alla vegetazione di torbiere, ruscelli e sorgenti. Un altro importante punto evidenziato dalle ricerche scientifiche degli ultimi anni è che tali opere rappresentano una via preferenziale per l'ingresso di specie aliene in un ambito a elevata naturalità come quello di alta montagna.

4. QUADRO DELLE EVIDENZE DEGLI IMPATTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUGLI ECOSISTEMI

Gli impatti del cambiamento climatico vanno al di là delle società umane e coinvolgono gli ecosistemi di tutto il mondo, agendo in maniera negativa e significativa sulle loro struttura e funzioni. Tutti i modelli climatici attualmente disponibili prevedono un aumento della temperatura media dovuto all'innalzamento della concentrazione atmosferica dei gas serra. Con i cambiamenti del clima si produrranno effetti e impatti di varia entità, alcuni dei quali potranno essere benefici, mentre altri saranno negativi e presumibilmente irreversibili. Lo studio degli impatti dei cambiamenti climatici coinvolge numerosi settori. Il panorama italiano della ricerca legata ai cambiamenti climatici comprende vari aspetti: dalle osservazioni climatiche, agli studi di modellistica, alle valutazioni degli impatti dei cambiamenti climatici sul nostro territorio.

Lo studio degli impatti è particolarmente complesso e tale complessità aumenta con il dettaglio, temporale e spaziale, richiesto dall'analisi. I paragrafi che seguono riassumono le evidenze degli impatti dei cambiamenti climatici in Italia e il capitolo successivo le azioni che andrebbero intraprese per fronteggiare tali cambiamenti.

4.1. Ecosistemi marini

4.1.1 Cambiamento climatico e biodiversità in ambienti costieri e profondi del Mar Mediterraneo

Sebbene occupi solo circa lo 0,82% degli oceani mondiali e lo 0,32% del volume complessivo, il Mediterraneo è un *hotspot* di biodiversità ed è uno dei bacini meglio studiati al mondo. La sua ricchezza di specie (circa 8.500) rappresenta il 7,5% di tutte le specie marine descritte finora (tra il 4 e il 18%, in funzione dei gruppi considerati). I popolamenti marini nel Mediterraneo mostrano una limitatissima similarità con quelli Atlantici. Il Mar Mediterraneo è estremamente diversificato per la presenza di acque "calde" a latitudini temperate in grado di ospitare specie tipiche di ambienti sia temperati sia subtropicali. Inoltre, il bacino è stato ulteriormente diversificato da una complessa storia geologica: negli ultimi 5 milioni di anni, il Mediterraneo ha sviluppato 10 distinte regioni biogeografiche (Bianchi e Morri, 2000; Giaccone, 1999). La bassa profondità media del Mediterraneo (in media circa 1.450 m) e il tempo di ricambio delle masse d'acqua profonde (circa 40-50 anni contro gli oltre 80 anni di altri sistemi oceanici), accoppiati a un elevato livello di endemismi del biota marino (circa il 25% delle specie Mediterranee sono endemiche [Tortonese, 1985; Giaccone, 1999]), evidenziano il rischio di gravi ripercussioni legate al cambiamento climatico in atto, che si ritiene avranno qui un impatto più rapido ed evidente rispetto ad altre aree marine. Questo rende il Mediterraneo un buon modello di studio per valutare la risposta diretta e indiretta degli oceani ai cambiamenti di temperatura e ad altre variabili ambientali legate ai cambiamenti globali.

4.1.2 Impatto sugli ambienti marini costieri e del largo

L'impatto dei cambiamenti climatici sulla biodiversità e sul funzionamento degli ecosistemi marini è associabile a diversi fattori, tra cui: innalzamento del livello del mare, delle temperature superficiali e della profondità del termoclino, cambiamento del regime idrologico (ad es., correnti) e del ciclo biologico degli organismi e acidificazione delle acque. Il previsto aumento dell'erosione costiera avrà effetti negativi sulle praterie di fanerogame (*Posidonia oceanica*, *Nanozostera noltii* e *Cymodocea nodosa*), che costituiscono l'habitat chiave per il reclutamento di organismi marini. Il riscaldamento del Mar Mediterraneo, per quanto concerne le masse d'acqua sia superficiali sia profonde (Bethoux *et al.*, 1990; Astraldi *et al.*, 1995; Bethoux e Gentili, 1996; Walther *et al.*, 2002), ha già determinato cambiamenti in termini di biodiversità (Francour *et al.*, 1994) tra cui: a) migrazione verso nord di specie dal sud del Mediterraneo (ad es., *Astroides calycularis*, *Sparisoma cretense* [Bianchi, 1997; 2007; Bianchi e Morri, 1993; 1994; Guidetti e Boero, 2001]); b) introduzione di specie esotiche (ad es., *Fistularia commersonii*, *Caulerpa spp.* [Dulcic *et al.*, 2008; Zibrowius, 1991]), incluse specie che causano *bloom* tossici (ad es., tra le alghe *Ostreopsis ovata*, *Fibrocapsa japonica*); c) *bloom* di meduse pericolose, quali *Carybdea marsupialis* [CIESM, 2002]); d) introduzione di altre specie bentoniche (Occhipinti-Ambrogi, 2001). Specie relitte con affinità nordica del Nord Adriatico (*Fucus virsoides*, *Tricyclusa singularis*) rischiano di essere sostituite da vicarianti con affinità per acque più calde. L'anomalo e prolungato aumento delle temperature estive (di 2-3°C) e lo sprofondamento del termoclino hanno indotto una mortalità massiva della fauna bentonica di fondi duri (ad es., spugne e gorgonie, quali *Paramuricea clavata*, *Eunicella singularis*, *Lophogorgia ceratophyta* ed *Eunicella cavolini* [Cerrano *et al.*, 2000]) con impatto su 28 specie di invertebrati e cambiamenti radicali nella struttura del popolamento bentonico (Garrabou *et al.*, 2001; Romano *et al.*, 2000). Analoghi impatti sono attesi per ambienti a coralligeno delle piattaforme carbonatiche pugliesi o nelle teggue in Adriatico. Anomalie termiche minacciano la biodiversità delle grotte marine portando alla sostituzione di specie endemiche tra cui alcune specie di crostacei (ad es., misidacei stenotermi) con altre ad affinità per acque più calde (Chevaldonne e Lejeune, 2003). Alterazioni della temperatura modificano anche la circolazione delle acque con impatto sia sul reclutamento delle larve sia sulla capacità di dispersione di reclute e forme giovanili di organismi marini (Company *et al.*, 2008). L'impatto dei cambiamenti climatici globali su produttori primari, secondari e terziari è differente e può generare effetti a cascata sulle reti trofiche (Boero, 2001; Dulcic e Grbec, 2000; Guidetti *et al.*, 2002). Studi recenti hanno evidenziato come anche il Mediterraneo profondo si stia scaldando con tassi presumibilmente più rapidi di altri oceani (Bethoux *et al.*, 1990). Spostamenti nel funzionamento ecosistemico sono già stati osservati in associazione con variazioni della NAO (*North Atlantic Oscillation* [Molinero *et al.*, 2005]). Continui incrementi di temperatura e salinità sono stati osservati a partire dal 1960, specialmente nel bacino profondo del Mediterraneo occidentale (Bethoux e Gentili, 1996; Bethoux *et al.*, 2002). Ma l'analisi e l'interpretazione di questi cambiamenti sono complicate dalla crescente frequenza di eventi episodici di sprofondamento di masse d'acqua più dense fino

a profondità batiali (ad es., il transiente del Mediterraneo orientale; gli eventi di "cascading" nel Margine Catalano [Canals *et al.*, 2006]). L'entità e l'estensione di queste alterazioni sono tali da essere chiaramente rilevabili su scala decennale e da determinare cambiamenti potenzialmente rilevanti nelle caratteristiche ambientali ed ecologiche. Importanti anomalie climatiche hanno: modificato le caratteristiche fisico-chimiche delle acque profonde del Mediterraneo orientale, causando un immediato accumulo di materia organica al fondo; alterato i cicli di carbonio e azoto; avuto effetti negativi su procarioti e fauna bentonica (Danovaro *et al.*, 2001). Le alterazioni termoaline profonde hanno anche modificato significativamente la biodiversità bentonica causando una diminuzione della diversità funzionale (Danovaro *et al.*, 2004). Recenti studi hanno dimostrato come la biodiversità marina profonda sia intimamente legata al funzionamento ecosistemico (ovvero alla quantificazione dell'insieme dei processi ecosistemici [Danovaro *et al.*, 2008]). Alti livelli di biodiversità sostengono livelli di funzionamento, esponenzialmente più elevati di sistemi a bassa biodiversità. La relazione tra biodiversità e funzionamento è determinata dall'effetto che un maggior numero di specie genera nell'efficienza con cui vengono svolti i processi ecosistemici. Il legame esponenziale tra biodiversità e funzione dell'ecosistema marino, comune a tutti i sistemi oceanici, suggerisce come anche perdite minime di biodiversità (20-25%) possano avere effetti profondi sul funzionamento ecosistemico, portando a una riduzione dei processi pari al 50-80%, a seconda degli habitat. Gli oceani svolgono un ruolo chiave nella produzione di beni e servizi ecosistemici, rappresentando un importante *sink* (pozzo) di carbonio, contribuendo alla regolazione del clima (nuclei condensazione delle nuvole (Charlson *et al.*, 1987) e alla produzione di biomassa, geni, energia, risorse minerarie, abbattimento di inquinanti, turismo ecc. (Wilson *et al.*, 2009). Gli oceani forniscono il 16% delle proteine utilizzate per l'alimentazione umana (FAO, 2007) e il 63% del valore finanziario dei servizi ecosistemici (Costanza *et al.*, 1997). Ciò rende l'eventuale perdita di biodiversità cruciale per il sostentamento dei beni e delle risorse che gli ecosistemi marini ci offrono.

L'impatto dei cambiamenti in atto sarà diverso da regione a regione (Anadon *et al.*, 2007): questi cambiamenti non avranno effetti solo su erosione costiera e infrastrutture, ma colpiranno in primo luogo il funzionamento naturale degli ecosistemi marini. Ad esempio, in Adriatico, a causa delle specifiche caratteristiche morfobatimetriche (ha una superficie pari a 1/25 di quella del Mediterraneo, a fronte di 1/125 del suo volume) e della presenza di una costa tipicamente bassa (con le eccezioni di Conero, Gargano e Salento), l'impatto dei cambiamenti globali è atteso essere più forte ed esteso rispetto ad altri sistemi (con un aumento delle temperature superficiali di oltre 1,5°C negli ultimi decenni a fronte 0,6°C negli ultimi 140 anni negli oceani mondiali). Il Mare Adriatico rappresenterà, quindi, un sistema ad altissima vulnerabilità climatica (Russo *et al.*, 2002; Kamburska e Fonda, 2006; Conversi *et al.*, 2009).

Gli impatti previsti sui sistemi marini includono: a) aumento della variabilità di tutti i processi che interessano gli ecosistemi marini; b) aumento della stratificazione delle masse d'acqua che potrebbe ridurre la connessione tra ambienti profondi e costieri con alterazione dei cicli biogeochimici; c) alterazione della produzione primaria e di risorse alleitiche; d) cambiamento nella struttura e distribuzione di comunità planctoniche e bentoniche marine costiere e profonde; e) alterazione dei cicli vitali e riproduttivi delle specie di vertebrati e invertebrati marini con aumento della loro vulnerabilità e dei tassi di estinzione; f) alterazione delle reti trofiche marine dovuta alla mancata sincronizzazione dei processi di produzione e consumo; g) alterazione della distribuzione e degli effetti dei contaminanti e dell'impatto dell'inquinamento; h) diminuzione della capacità di contrasto all'ingresso di specie non indigene; i) aumento di fenomeni epidemiologici a carico degli organismi marini. Recenti studi suggeriscono come alcuni di questi cambiamenti in ambiente marino possano essere non reversibili (Danovaro *et al.*, 2004). Gli effetti sopraelencati comprometteranno la capacità degli ecosistemi marini di produrre beni e servizi indispensabili a contrastare i cambiamenti in atto, ed essenziali alla nostra economia (si pensi ad esempio a turismo, pesca e risorse energetiche) e al nostro benessere complessivo.

4.2. Ecosistemi di acque interne e ambienti di transizione

La complessità delle interazioni tra cambiamenti climatici e relativi impatti sugli ambienti di acque dolci è efficacemente affrontata in una *review* di Meyer e collaboratori (1999) focalizzata sull'analisi di esperienze di ricerca su fiumi e laghi delle principali regioni geografiche degli Stati Uniti. Gli autori segnalano la difficoltà di individuare la specificità e intensità di tali impatti in un contesto massicciamente antropizzato, che ha portato ad alterazioni profonde degli usi del suolo e a cambiamenti drammatici delle quantità e della qualità della risorsa idrica, quella disponibile per i bisogni dell'uomo e quella necessaria per la conservazione dei beni e dei servizi inclusi negli ecosistemi. Sottolineano le evidenze incontrovertibili degli effetti del riscaldamento globale (dai cambiamenti del regime di rimescolamento dei laghi all'alterazione della stagionalità dei regimi idrologici dei fiumi e alla riduzione drastica delle aree occupate da zone umide), ma lamentano la nostra modesta capacità di prevedere e identificare gli impatti dei cambiamenti climatici e di esprimere pareri scientificamente fondati sulla validità di opzioni gestionali alternative. Gli autori giungono alla conclusione che servono basi più estese di dati e modelli (climatici, idrologici, bioenergetici, biogeochimici, di reti trofiche...) operativamente efficaci a più scale di spazio e tempo, che consentano di relazionare la variabilità dei regimi idrologici ai processi ecosistemici (produttività, dinamica dei nutrienti), alle interazioni ecologiche (predazione, invasioni di specie aliene), alla qualità delle acque. Questa *review* di Meyer e collaboratori conserva, a distanza di dieci anni, piena e straordinaria attualità, anche per altri contesti biogeografici.

Un altro contributo significativo viene da autori nord europei (Heino *et al.*, 2009), che richiamano le evidenze relative alla estrema vulnerabilità degli ambienti di acque dolci e agli elevati tassi di estinzione di specie, documentati su base paleontologica e storica, associati ai cambiamenti climatici; e nel contempo raccomandano lo sviluppo di indagini sull'ecologia degli organismi dulcicoli per far fronte all'insufficiente base di informazioni sulla

loro distribuzione. Heino e collaboratori sostengono come tali indagini, oltre che alla conoscenza delle risposte delle diverse specie ai cambiamenti climatici di lungo e breve termine, siano essenziali ai fini della gestione adattativa delle aree protette, partendo dalla constatazione che queste sono state e continuano a essere generalmente progettate con scarsa attenzione alla conservazione degli habitat e delle specie acquatiche. È da dire come a questa esigenza di espansione e aggiornamento del quadro conoscitivo di base rispondano positivamente varie iniziative di qualificato livello scientifico: ci si limita a citare i risultati del progetto *Freshwater Animal Diversity Assessment* (FADA) su biodiversità, distribuzione ed endemicità di un largo spettro di taxa animali investigati a scala regionale e a scala globale (Balian *et al.*, 2008).

I temi più rilevanti attinenti agli impatti ambientali su biodiversità e funzioni degli ecosistemi acquatici possono essere trattati con riferimento alle consuete tipologie di corpi d'acqua: bacini fluviali, laghi, piccole acque lentiche, ambienti di transizione a mare. Questa partizione corrisponde a un'esigenza di ordine pratico e in ogni caso riflette il quadro delle differenti competenze specialistiche praticate nello studio degli ambienti acquatici; ma deve essere riassorbita nel concetto unificante di *Integrated River Basin Management* (Gestione integrata dei bacini fluviali) e, più in largo, se si pensa alle lagune costiere, in quello di *Integrated Coastal Area and River Basin Management* (Gestione integrata delle aree costiere e dei bacini fluviali). Si ricorda che in Italia esiste una radicata tradizione di ricerche idrobiologiche ed ecologiche sui laghi, storicamente riconducibile all'influenza della Scuola di Pallanza (Istituto Italiano di Idrobiologia, ora Istituto per lo Studio degli Ecosistemi CNR); ricerche di profilo ecologico-funzionale sui corsi d'acqua e sugli ambienti di transizione sono state condotte con successo negli ultimi 2-3 decenni; di notevole interesse è anche lo sviluppo di una linea di ricerca autonoma sulle piccole acque (stagni, pozze, sorgenti, fontanili).

4.2.1 Fiumi

Sono ampiamente documentate le criticità dei nostri fiumi e torrenti, relativamente alla precarietà degli assetti idraulici e geomorfologici e ai rischi di esondazioni calamitose, così come all'elevata frequenza con cui sono segnalati livelli scadenti di qualità delle acque e prelievi esorbitanti di risorsa idrica per usi talora sconsiderati. L'attuale stato ecologico di gran parte dei nostri corsi d'acqua è anzitutto il risultato delle opere di canalizzazione e artificializzazione, ispirate alle leggi ferree dell'ingegneria idraulica tradizionale, ed è andato aggravandosi, nell'ultimo cinquantennio, per le trasformazioni radicali che hanno interessato il nostro territorio, tra cui l'impiego di tecnologie ad alto impatto ambientale nell'industria e in agricoltura, l'espansione di processi insediativi incontrollati, la semplificazione estrema dei paesaggi delle piane alluvionali, l'aumento spropositato di consumi idrici. È destinato, peraltro, a subire un ulteriore deterioramento in relazione al persistere delle tendenze, consolidate negli ultimi decenni ed evidentemente associate ai cambiamenti climatici globali: aumento della temperatura, riduzione delle portate medie, intensificarsi di eventi estremi, protrarsi per mesi delle crisi idriche, emergenza di piene improvvise e distruttive.

In merito ai corsi d'acqua di alta quota, in particolare quelli delle Alpi meridionali, sono state formulate previsioni realistiche e puntuali in ordine agli effetti dei cambiamenti climatici. L'attesa è per un più alto livello di evaporazione e una maggior proporzione di precipitazioni liquide rispetto a quelle solide. Nella fase di riduzione delle masse glaciali si avranno maggiori portate estive associate a più ampie fluttuazioni giornaliere nei corsi d'acqua dominati dal contributo glaciale (Kajfež Bogataj, 2007). In seguito, quando le masse glaciali saranno ridotte, si avranno minori portate estive associate a moderate fluttuazioni giornaliere (Hagg e Braun, 2004). Lo spostamento verso l'alto del limite delle precipitazioni nevose farà aumentare le portate invernali e diminuire la disponibilità di acqua in estate. Le tipologie fluviali tipiche dei corsi d'alta quota alpini, con consistenti deflussi dominati da contributi glaciali e da sorgenti, tenderanno a perdere la loro peculiarità uniformandosi a sistemi prevalentemente alimentati da nevai e piogge. Agli effetti diretti del cambiamento climatico si sommeranno quelli indiretti, dovuti a richieste di acqua per produzione di neve artificiale nel periodo invernale e a maggiori richieste irrigue nel periodo estivo. In questo scenario si colloca la condizione attuale dei sistemi idrografici alpini, che si connotano per un'accentuata frammentazione e cospicui deficit di integrità e funzionalità (Maiolini e Bruno, 2007). Si teme che la biodiversità delle acque correnti alpine possa subire una forte contrazione in tempi brevi (Schröter *et al.*, 2005), considerando come essa includa molte forme stenoece fredde che vivono quasi al limite dei rispettivi areali. La conoscenza della valenza ecologica delle specie è fondamentale per la previsione di possibili futuri scenari: alcune specie (è il caso dei molti endemismi alpini) sono destinate all'estinzione locale o totale o a forti contrazioni numeriche e ulteriore frammentazione delle popolazioni. Un'accelerazione dei processi indotti dal cambiamento climatico può venire dalla produzione idroelettrica, attraverso le captazioni in alta quota, lo stoccaggio nei bacini e infine la restituzione intermittente a valle delle centrali, in genere collocate a quote medio-basse. Nel loro insieme questi impatti inducono profondi cambiamenti sui regimi idrologici e termici dei corsi d'acqua: quanto alla temperatura, si ha un aumento delle variazioni giornaliere e delle medie annuali alle quote alte e medie, per le minori portate dovute alle captazioni; sui corsi d'acqua di fondovalle si registrano un raffreddamento estivo e un riscaldamento invernale, dovuti al rilascio di acque turbinate provenienti dallo strato ipolimnico dei bacini d'alta quota (Carolli *et al.*, 2008).

Gli effetti dei cambiamenti climatici su funzioni chiave di ecosistemi di acque correnti studiati alla scala di bacino idrografico sono stati descritti in numerose ricerche. Ci si limita a citare i risultati di lavori di Rogora e Mosello (2007) e Rogora e collaboratori (2008) su torrenti e fiumi alpini, in cui è evidenziata l'intensificazione di processi di mineralizzazione e nitrificazione, e di conseguenza una maggiore deposizione di azoto, correlate all'aumento della temperatura e all'allungamento dei periodi di siccità registrati negli ultimi decenni. Altre evidenze sono fornite da un recente volume CNR (Carli *et al.*, 2007), che raccoglie numerosi contributi sugli impatti dei

cambiamenti climatici e sulle relative misure di mitigazione e adattamento. Nello studio delle interazioni tra cambiamenti climatici e funzioni ecologiche nei fiumi e nei reticoli idrografici afferenti, l'anello debole è per lo più rappresentato dal modesto livello di conoscenze dettagliate sulla biodiversità. Si dispone di repertori faunistici aggiornati per le faune a vertebrati, per l'ittiofauna in particolare (Zerunian, 2002), ma è ancora limitato il numero di casi di studio di ecologia e dinamica di popolazioni che consentano analisi accurate dei pattern di variabilità delle specie in relazione ai cambiamenti ambientali. L'applicazione generalizzata dell'Indice Biotico Esteso per la valutazione di qualità delle acque ha propiziato la raccolta di una mole imponente di dati sul macrozoobenthos, ma raramente questi dati si prestano alla determinazione di indici di biodiversità specifica. Quasi completamente sconosciuta è la composizione delle comunità microbiotiche di produttori e decompositori (sia planctoniche sia bentoniche) le cui attività hanno un ruolo fondamentale nella modulazione delle performance metaboliche degli ecosistemi fluviali. L'azione che si ritiene prioritaria riguarda pertanto la progettazione e attuazione di piani di monitoraggio che forniscano quadri conoscitivi esaurienti sullo stato della biodiversità degli ambienti fluviali e sulla sua evoluzione in relazione alle dinamiche del cambiamento ambientale. È quanto prescrive la Direttiva Europea sulle Acque, che per le procedure di valutazione dello stato ecologico si affida a indicatori tratti dall'analisi di composizione e struttura di biocenosi.

Sembrano opportune altre puntualizzazioni su aspetti rilevanti non solo per i bacini fluviali, ma anche per le altre tipologie di ambienti acquatici prese in considerazione. Si accenna anzitutto al problema delle specie aliene. I dati bibliografici mostrano un aumento generalizzato del numero di introduzioni di specie aliene con conseguenze, in molti casi, di proliferazioni abnormi (invasioni biologiche), che possono portare all'estinzione locale di specie native, a spostamenti significativi degli equilibri esistenti tra comparti e livelli trofici fino all'affermarsi di tendenze all'omogeneizzazione e banalizzazione della struttura delle comunità. La variazione dell'assetto biogeografico della distribuzione delle specie, spesso accoppiata con il declino della biodiversità, interagisce con il cambiamento climatico (Occhipinti-Ambrogi, 2007). L'aumento della temperatura può determinare condizioni di vantaggio competitivo delle specie introdotte rispetto a quelle native (Harris e Tyrrell, 2001; Parmesan, 2006). Le strategie tradizionali per la conservazione sono spesso messe in crisi dalla minaccia congiunta di cambiamenti climatici e specie invasive (Rahel *et al.*, 2008; Rahel e Olden, 2008). Anche le acque interne sono vulnerabili al fenomeno delle bioinvasioni che assume particolare rilevanza a causa dell'intensità e varietà delle attività umane che vi insistono e dell'elevata capacità di dispersione, facilitata dalla continuità dei corpi idrici della rete fluvio-lacustre (Ricciardi, 2001), di gran parte delle specie non indigene. Il numero di specie aliene rinvenute in Italia è particolarmente elevato: 112 (64 di invertebrati e 48 di vertebrati), il 2% della fauna dulciacquicola italiana (Gherardi *et al.*, 2008). È da segnalare che nella fauna aliena delle acque interne italiane si trovano ben 17 delle 100 specie classificate dal consorzio DAISIE (*Delivering Alien Invasive Species Inventories for Europe*) fra le più pericolose in Europa e 7 delle 100 più pericolose nel mondo secondo la IUCN (Lowe *et al.*, 2000). A titolo d'esempio, fra le specie più pericolose e maggiormente diffuse sul nostro territorio, si cita il gambero rosso della Louisiana *Procambarus clarkii*, che rappresenta uno dei casi più studiati di invasione biologica in gran parte d'Europa (Gherardi, 2006).

4.2.2 Laghi

Le più nette evidenze sugli effetti dei cambiamenti climatici sullo stato degli ambienti di acque dolci sono fornite da ricerche svolte su laghi per i quali sono disponibili robuste serie di dati ecologici di lungo termine. Risultati di straordinario interesse sono stati ottenuti dall'impiego di tecniche paleolimnologiche che consentono la ricostruzione a diverse scale temporali dell'evoluzione di parametri fisici, chimici e biologici correlabili a significativi cambiamenti ambientali dovuti a cause naturali o antropiche. Le ricerche paleoclimatologiche consentono di separare gli effetti sull'ecosistema delle variazioni climatiche da quelle determinate dalle attività umane di impatto locale e rappresentano un prerequisito essenziale per la comprensione dell'evoluzione futura del sistema climatico del pianeta e delle potenziali conseguenze dei futuri cambiamenti globali (Brauher e Guilizzoni, 2004; Guilizzoni *et al.*, 2007). Di particolare rilievo appaiono i risultati di ricerche paleolimnologiche in ambienti estremi (aree polari o di alta quota) fortemente sensibili alle alterazioni legate sia all'attività antropica sia ai cambiamenti climatici: questi ambienti possono essere utilizzati quali indicatori dei cambiamenti in atto (Musazzi *et al.*, 2007).

Anche le ricerche di ambito idrochimico e idrobiologico sui laghi artici e alpini hanno prodotto risultati significativi. Rogora e collaboratori (2003 e 2007) hanno evidenziato in laghi delle Alpi Centrali (valli Ossola e Sesia) effetti importanti della maggiore esposizione di rocce e suoli ai processi di *weathering*, dovuta alla riduzione dei tempi di copertura nevosa, sul pH e sul contenuto in soluti delle acque; a questi effetti concorrono anche le variazioni indotte da processi biologici a loro volta influenzati da fattori meteo - climatici. Uno studio comparato su serie storiche di dati di struttura dei popolamenti lacustri (plancton, benthos, pesci) in ambienti artici e alpini ha consentito un'analisi dei prevedibili impatti del cambiamento climatico globale su fenologia e dinamica delle popolazioni e delle comunità (Primicerio *et al.*, 2007): il tema dei cambiamenti di composizione e struttura delle comunità in relazione al variare dei regimi termici e alla concomitante azione di altri fattori di impatto è affrontato con attenzione particolare al ruolo chiave di regolazione di specie ittiche, che possono risentire direttamente delle variazioni di temperatura, sulla struttura e dinamica di popolazioni che occupano livelli trofici inferiori.

Un caso di studio di rilievo primario è rappresentato dall'evoluzione della vicenda termica stagionale nei laghi subalpini. Si osserva nel tempo una tendenza all'aumento della temperatura alla quale avviene la piena circolazione invernale, ma soprattutto si nota una forte rarefazione nel tempo di questo fenomeno. Questa tendenza è stata osservata su ampia scala in altri laghi italiani, europei e di altri continenti e appare

evidentemente sostenuta dai cambiamenti climatici in atto. Nel Lago Maggiore, in particolare, si sono avuti quattro eventi di piena circolazione durante il cinquantennio 1956-2006: con temperatura di 5,8°C nel 1956, di 5,9°C nel 1963, di 6,0°C nel 1970; l'evento successivo di piena circolazione, a 6,22°C, si è avuto dopo ben 36 anni, nel 2006. Il riscaldamento della massa lacustre e la riduzione progressiva del mescolamento completo e dell'omogeneizzazione della colonna d'acqua contribuiranno a un ulteriore isolamento dell'ipolimnio profondo, favorendo la stagnazione e processi di meromissi come quelli noti per i laghi di Lugano, Idro e Iseo (Ambrosetti *et al.*, 2007). Alle modificazioni di carattere idrologico e idrodinamico sono associati cambiamenti nelle vie e nei tempi di flusso e riciclo dei nutrienti che influenzano le successioni stagionali dei popolamenti planctonici. Nel Lago Maggiore sono state osservate anomale fioriture di diatomee in primavera e di cianobatteri in estate: sul determinismo di questi fenomeni sono state condotte ricerche, rispettivamente, da Morabito (2007) e da Bertoni e collaboratori (2007); sono state anche analizzate le modificazioni intervenute recentemente a carico della componente zooplanctonica. Manca e collaboratori (2007a e 2007b) hanno riscontrato nel Lago Maggiore, in presenza di alte temperature, densità di popolazioni zooplanctoniche tipicamente registrate in situazioni di aumentata trofia (Schindler, 2001); non accolgono, per altro, l'idea di ricondurre gli effetti del riscaldamento a processi assimilabili a quelli implicati nell'eutrofizzazione, rimandando a un'analisi più attenta dei complessi meccanismi trofodinamici responsabili dei cambiamenti di fenologia delle popolazioni.

Anche in una vasta area particolarmente piovosa come quella del bacino del Lago Maggiore, i cambiamenti climatici stanno portando alla luce problemi complessi legati ai diversi utilizzi della risorsa idrica (Ciampittiello e Rolla, 2007). Mooij e collaboratori (2005), un gruppo di esperti olandesi, ritengono che gli effetti più rilevanti dei cambiamenti climatici sui piccoli laghi si esprimeranno, tra l'altro, in termini di: riduzione delle specie target di uccelli e diffusione di malattie nell'avifauna; invasione di specie ponto-caspiche; stabilizzazione della dominanza dei cianobatteri nel fitoplancton, riduzione della trasparenza delle acque e aumento complessivo della *carrying capacity* di queste componenti; influenza prevalente di meccanismi *bottom-up* e scadimento del ruolo di regolazione dei livelli trofici superiori; destabilizzazione dei laghi ad acque trasparenti con buona copertura di macrofite; impatto complessivamente negativo sulla biodiversità.

4.2.3 Piccole acque (pozze, stagni, acquitrini, ecc.)

Vi è in Europa una crescente consapevolezza dell'importanza che le piccole acque (pozze, stagni, acquitrini per lo più temporanei) svolgono nella conservazione della biodiversità acquatica: esse ospitano complessivamente un numero ben più alto di specie di invertebrati, e in particolare un maggior numero di specie rare e minacciate, rispetto agli altri corpi di acque dolci. Le aree ricche di piccole acque fungono inoltre da corridoi ecologici nelle reti di ambienti acquatici e sono considerate "sistemi sentinella per il monitoraggio del *global change*" (Cereghino *et al.*, 2008). Esse non godono di forme di tutela e protezione da parte delle direttive europee Habitat e Uccelli (fatta eccezione per gli stagni costieri temporanei e le torbiere in cui sono presenti specie di piante, anfibi e uccelli di pregio naturalistico); non sono contemplate nemmeno dalla Direttiva Acque e non sono pertanto soggette ad alcuna attività di monitoraggio. Anche per questo motivo, le conoscenze faunistiche ed ecologiche di base, in particolare sulla componente a invertebrati, sono gravemente carenti in Italia: negativi sono i risvolti di tipo protezionistico, se si pensa che numerose specie esclusive degli habitat di piccole acque sono gravemente minacciate (Ruffo e Stoch, 2005).

Il cambiamento climatico globale crea drastiche alterazioni del ciclo idrologico di questi ambienti, tipicamente stagionali, prolungando i periodi di siccità soprattutto nella regione biogeografica mediterranea. Il protrarsi, inoltre, di lunghi periodi piovosi determina cambiamenti rilevanti nelle faune, causando un arricchimento in elementi banali che sostituiscono le specie a elevato valore conservazionistico. Questo problema si va ad aggiungere al generale degrado e alla progressiva scomparsa di questi ambienti, già stimata tra il 60% e l'80% in molte aree italiane, per effetto dell'impatto antropico (Stoch, 2005).

4.2.4 Ambienti di transizione

Le condizioni ambientali prevalenti degli ambienti di transizione, le tendenze evolutive in atto e quelle attese in rapporto ai cambiamenti climatici sono state oggetto, negli ultimi anni, di intense attività di ricerca. Risultati significativi sono stati ottenuti su più fronti, da quello delle conoscenze di base, su biodiversità e funzioni ecosistemiche in relazione alle variabili geomorfologiche e idrodinamiche, a quello delle prospettive di risanamento e gestione sostenibile di ambienti segnati da pressioni antropiche di forte impatto a diverse scale territoriali. Di particolare interesse è la più recente produzione scientifica sulle lagune costiere sud-europee (Eisenreich, 2005; Viaroli *et al.*, 2005; Aliaume *et al.*, 2007; Viaroli *et al.*, 2007; Zaldivar *et al.*, 2007; Razinkovas *et al.*, 2008; Viaroli *et al.*, 2008). Le lagune sono caratterizzate dall'estrema variabilità delle condizioni fisiche e chimiche, legate agli scambi discontinui con il mare e con le acque interne, dalla vulnerabilità a un ampio spettro di tipologie di impatto umano nonché dall'imprevedibilità delle risposte ai cambiamenti locali e globali a livello di popolazioni, comunità e funzioni ecosistemiche. L'accento è messo sulle tendenze successionali rilevate da studi sulla dominanza delle diverse componenti di produttori primari integrati con indagini biogeochimiche: le successioni, innescate dall'eutrofizzazione, dall'erosione o dalla perdita di habitat naturali, avvengono secondo dinamiche non lineari, per spostamenti repentini (regime *shift*) tra stati alternativi, inducendo, in alcuni casi, alterazioni irreversibili delle capacità tampone e abbattimento della resilienza degli ecosistemi.

I complessi problemi di conservazione e recupero del patrimonio naturale e culturale delle lagune sono affrontati nell'orizzonte di strategie gestionali integrate dei bacini fluviali, degli ambienti di transizione e delle zone costiere. In tutti i lavori sopra citati è richiamata l'importanza di implementare le conoscenze sulla biodiversità e

sull'ecologia di popolazioni che potrebbero consentire di registrare eventi interpretabili come indizi dei cambiamenti climatici. Lo stato delle informazioni sulle relazioni causali tra cambiamenti climatici e risposte a livello biologico ed ecologico appare ancora imbrigliato dalla difficoltà di separare gli effetti del cambiamento globale da quelli indotti dalle attività antropiche (tra gli altri, la presenza sempre più pervasiva di specie aliene) che incidono direttamente su struttura e funzioni degli ecosistemi. A questo quadro d'insieme deve far riferimento l'analisi dei prevedibili effetti del cambiamento climatico globale che sono di più diretto e rilevante impatto sugli ambienti di transizione e possono essere ricondotti all'innalzamento del livello del mare, all'intensità e frequenza degli eventi meteorici estremi (e ai riflessi sulla variabilità del regime idrologico dei corsi d'acqua tributari), all'aumento dei valori medi di temperatura. Più incerte sono le previsioni su modalità e intensità di espressione di altri effetti, quali l'acidificazione dei mari (Royal Society, 2005).

Innalzamento del livello del mare. La tendenza all'innalzamento del livello del mare è documentata sia dall'analisi di serie storiche mareali (Church e White, 2006) che da rilevamenti satellitari (Cazenave e Nerem, 2004; Bindoff *et al.*, 2007). Sull'evoluzione del fenomeno nei prossimi decenni le previsioni variano in dipendenza delle ipotesi relative all'intensità del processo di riscaldamento globale: per il 2050 si prevede un innalzamento ulteriore compreso tra 60 e 330 mm (Rahmstorf, 2007). Il tasso di innalzamento varierà in maniera disomogenea con fluttuazioni sensibili a scala regionale, a causa di differenze locali nei livelli di subsidenza, nell'entità dei sollevamenti tettonici, nel grado di compattamento dei suoli argillo-limosi. L'aumento del livello impatterà particolarmente le lagune costiere separate dal mare da cordoni sabbiosi (spiagge, scanni, dossi e barene): in questa tipologia rientrano la laguna di Venezia, numerose lagune del Delta del Po, Lesina, Orbetello, alcuni laghi costieri laziali e la quasi totalità delle lagune sarde. A un innalzamento lento e moderato questi sistemi potranno rispondere attraverso processi di progressiva espansione verso terra e di rimodellamento delle rive, conservando sostanzialmente inalterati i prevalenti caratteri fisiografici. Ma gli effetti di un innalzamento rapido saranno prevedibilmente devastanti (Bird, 1993; Zhang *et al.*, 2004): sommersione degli scanni, allagamenti, maggiore vulnerabilità alle mareggiate e intensificazione dei processi di erosione costiera, marinizzazione degli ambienti lagunari e intrusione del cuneo salino nella rete tributaria di corpi di acqua dolce; si ridurranno le superfici occupate da specie mesoaline e cambierà radicalmente la composizione delle biocenosi acquatiche (Mackenzie *et al.*, 2007); diminuiranno i territori di nidificazione per numerose specie di uccelli; subiranno profonde modificazioni i percorsi di ciclizzazione dei nutrienti (Lloret *et al.*, 2008); si avranno pesanti ripercussioni su molte delle attività produttive attualmente praticate in questi ambienti.

Mutamenti nel regime delle precipitazioni. I mutamenti dei cicli stagionali delle precipitazioni inducono alterazioni importanti del regime idrologico dei corsi d'acqua (e delle correlate dinamiche di erosione, trasporto e sedimentazione) con l'alternarsi di eventi di piena sempre più frequenti e lunghi periodi di siccità. Le anomalie nella periodicità stagionale degli afflussi di acque dolci dal bacino tributario possono avere effetti rilevanti sull'evoluzione dei tratti geomorfologici e idrodinamici, sulle caratteristiche fisico-chimiche delle acque e dei sedimenti e, in definitiva, sui fattori chiave che reggono il funzionamento degli ecosistemi di transizione (Aliaume *et al.*, 2007; Zaldívar *et al.*, 2007). Si può avere un'accelerazione dei processi di eutrofizzazione per l'aumento del contenuto di nutrienti scaricati nelle lagune, con conseguenze rilevanti a livello di tipologia dominante di produttori primari (Lloret *et al.*, 2008), di processi di decomposizione e riciclo di elementi biogeni fondamentali, di fenologia delle comunità zooplanctoniche e zoobentoniche e dell'ittiofauna. Com'è noto, l'eutrofizzazione in laguna può spingersi fino a una fase successionale, caratterizzata dalla dominanza di macroalghe e cianobatteri, in cui tendono a verificarsi eventi di anossia (crisi distrofiche) (Viarelli *et al.*, 2008). Non va, per altro, sottovalutato il rischio opposto: in alcuni ambienti lagunari la resa produttiva associata ad attività di molluschicoltura intensiva, in seguito a lunghi periodi di assenza di precipitazioni, può subire cali sensibili per effetto del limitato carico di nutrienti fornito dalle acque continentali (Viarelli *et al.*, 2009).

Innalzamento della temperatura. Le caratteristiche fisiografiche delle lagune costiere fanno ritenere che la temperatura delle acque aumenterà ancor più velocemente e sensibilmente che negli estuari aperti e negli oceani (Nixon *et al.*, 2004; Harley *et al.*, 2006). La temperatura dell'acqua influenza la fisiologia degli organismi lagunari, i gradienti di distribuzione delle specie e i pattern di migrazione. Molte specie marine nelle lagune vivono ai margini dei rispettivi limiti di tolleranza termica (Tomanek e Somero, 1999): cambiamenti anche minimi nel range di temperatura possono esercitare impatti significativi sulla distribuzione e sopravvivenza degli organismi che a tali specie appartengono. Inoltre, gli ecosistemi lagunari saranno più suscettibili di quanto già non siano all'invasione di specie non-native originarie di climi più caldi (Occhipinti-Ambrogi, 2000a e 2000b; Stachowicz *et al.*, 2002). All'aumentare della temperatura diminuirà la concentrazione dell'ossigeno disciolto, un effetto che può interagire sinergicamente con altri fattori ambientali (intensi processi di decomposizione di materiale organico a loro volta accelerati dalle alte temperature, limitate escursioni giornaliere di marea e ridotti scambi con il mare), inducendo crisi ipossiche e anossiche, che possono essere particolarmente severe nelle aree lagunari più confinate con impatti pesanti soprattutto sulla fauna bentonica. La cronicità dell'ipossia nelle acque costiere e di transizione può determinare cambiamenti persistenti nella struttura e composizione delle comunità bentoniche: le specie tolleranti e opportuniste sostituiscono le specie sensibili e la diversità generalmente diminuisce (Mistri, 2002; Conley *et al.*, 2007). Anche la fenologia lagunare sarà influenzata dall'innalzamento termico: cambiamenti nella temperatura dell'aria influenzano rotte e periodi di migrazione dell'avifauna che tradizionalmente sosta nelle lagune. Lo sviluppo, la maturazione delle gonadi e l'emissione dei gameti nei molluschi bivalvi si modifica in risposta a rialzi termici (Sgro *et al.*, 2002). Alle medie-alte latitudini lo zooplancton diviene attivo precocemente nelle primavere che seguono inverni miti (Edwards e Richardson, 2004), incrementando l'attività di pascolo sul fitoplancton e fornendo parziale spiegazione ai fenomeni di diminuzione della biomassa fitoplanctonica associati a temperature

più alte (Oviatt, 2004). Si ritiene infine che l'innalzamento della temperatura possa contribuire ulteriormente al fenomeno di declino delle fanerogame acquatiche negli ambienti lagunari (Blintz *et al.*, 2003).

4.3. Ecosistemi forestali

Gli ecosistemi forestali boschivi svolgono un ruolo preminente per le funzioni produttive, ecologiche e conservazionistiche. I cambiamenti climatici possono influenzare gli ecosistemi forestali alterando in maniera significativa le funzioni da essi svolte. I principali effetti dei cambiamenti climatici sulle specie forestali si possono spiegare inizialmente nella modificazione della stagione vegetative e della fenologia. Se si superano i livelli soglia di capacità di adattamento delle specie, queste ultime sono costrette a modificare i loro areali con spostamenti latitudinali e altitudinali che comportano espansioni o restringimenti. In base ad analisi paleoecologiche e molecolari relative al quaternario, nell'emisfero boreale, la risposta ai cambiamenti climatici, e in particolare ai cicli di glaciale-interglaciale, è stata specie specifica (Delcourt e Delcourt, 1991). Anche in questo caso è quindi possibile ipotizzare che tale comportamento possa caratterizzare le specie forestali, qualora l'effetto dei cambiamenti climatici possa determinare lo spostamento degli areali.

La superficie forestale italiana, secondo i dati dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio, realizzato dal Corpo Forestale dello Stato nel 2005 (INFC, 2005), è stimata in 10.467.533 ettari, pari al 34,7% del territorio nazionale, e tale superficie risulta in aumento. Il tasso di crescita nel decennio 1990-2000 è stato dello 0,3% l'anno, a fronte di una media europea dello 0,1%. Il 32% delle formazioni forestali italiane rientra nella regione biogeografica alpina (secondo quanto riportato nella Direttiva Habitat), il 16% in quella continentale e il 52% in quella mediterranea. Per quanto riguarda la produzione primaria dei nostri boschi e, nello specifico, il loro ruolo nella mitigazione delle emissioni di gas climalteranti si può affermare che essi contribuiscono in modo sostanziale al bilancio della concentrazione dei gas serra del nostro Paese. Secondo la Quarta comunicazione all'UNFCCC, l'Italia ha emesso nel 2005 circa 493 milioni di tonnellate di CO₂ (Mt CO₂) di cui le foreste hanno assorbito circa 110 milioni di tonnellate, pari al 22% del totale. Altre ricerche nel settore (Papale *et al.*, 2005), realizzate nell'ambito del Progetto CarbiUS e Carbotaly, mostrano un assorbimento annuo da parte delle foreste pari a 90,7 Mt CO₂. Va, inoltre, considerato come non tutto il carbonio assorbito dalle foreste possa essere considerato nell'ambito del Protocollo di Kyoto ai fini della riduzione delle emissioni, ma solo una parte di questo pari a circa 10 Mt CO₂ per ogni anno del periodo di impegno (limite stabilito nei negoziati in ambito della UNFCCC e del Protocollo di Kyoto).

Le foreste italiane sono, inoltre, fondamentali per la qualità delle acque e per la protezione dei suoli e dei versanti; inoltre, date le peculiarità del nostro territorio, svolgono un ruolo essenziale nel ciclo dell'acqua per quanto riguarda la riduzione dei tempi di corrivazione delle piene e di ruscellamento superficiale. In generale, la vegetazione italiana e le foreste in particolare sono oggi esposte a nuovi rischi dovuti al cambiamento climatico, che possono essere così individuati: a) disgregazione delle biocenosi, potenziale migrazione delle specie e spostamento dei loro areali di distribuzione; b) impatti sullo stato di salute delle foreste: alterazione dell'equilibrio con gli agenti patogeni e c) impatto sugli incendi boschivi.

4.3.1 Disgregazione delle biocenosi, potenziale migrazione delle specie e spostamento dei loro areali di distribuzione

Le tendenze climatiche in atto e quelle previste dagli scenari dell'IPCC sposteranno verso latitudini maggiori o altitudini più elevate le condizioni climatiche e ambientali tipiche dell'area mediterranea. Questo significa che tutti gli ecosistemi del Mediterraneo tenderanno a "migrare" verso l'Europa centro occidentale e settentrionale o in alto, lungo i versanti delle catene montuose del Paese. La rapidità del cambiamento climatico in atto è però di gran lunga superiore alla velocità di colonizzazione di nuovi spazi di cui sono capaci le specie vegetali, soprattutto quelle dominanti nelle foreste. Nei prossimi anni è da attendersi, quindi, una progressiva "disgregazione" (o "dissociazione", come riportato da Ozenda e Borel, 1995) degli ecosistemi forestali, dei quali solo poche componenti potranno migrare in aree più adatte ai mutati scenari climatici, mentre la maggior parte saranno destinate all'estinzione, almeno a livello locale. Le specie con elevata capacità di spostamento (ad es., i grandi mammiferi, come orso, lupo e ungulati), in grado di tentare di "sfuggire" alla disgregazione del proprio habitat, si troveranno in condizioni di "disadattamento", in quanto risulterà per loro impossibile riuscire ad adattarsi in così breve tempo a nuovi ecosistemi in via di formazione, che potranno ricostituirsi solo nell'arco di alcuni secoli. È, insomma, prevedibile "una fase di instabilità negli ambienti forestali, con un peggioramento rispetto alle cenosi mature, causato da una generale rottura delle relazioni ecosistemiche (Pignatti, 2007)". Le conseguenti modifiche del paesaggio produrranno profonde trasformazioni anche nei settori dell'agricoltura, del turismo, del tempo libero e residenziale.

In Italia esistono pochi studi sull'effetto del cambiamento climatico sulla biodiversità, tuttavia recentemente sono state realizzate due ricerche che hanno prodotto scenari di riferimento sulle variazioni di biodiversità, migrazione delle specie e spostamento degli areali di distribuzione (Bruno *et al.*, 2007). I risultati principali ottenuti nell'ambito del progetto "BioRefugia" realizzato nell'ambito del Programma CONECOFOR (CONtrollo ECOSistemi FORestali), promosso e coordinato dal Corpo Forestale dello Stato, e co-finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del Reg. (CE) n. 2152/2003 Forest Focus, indicano: generale aumento dei limiti altitudinali di distribuzione delle specie, con lo spostamento dei loro areali a quota maggiore; generale riduzione degli habitat delle conifere montane e spostamento in quota di latifoglie decidue; forte riduzione dell'areale di distribuzione delle specie più mesofile e microterme (faggio, castagno, farnia, aceri montani) danneggiate e, quindi, minacciate di estinzione a livello locale; significativa espansione dell'areale di distribuzione delle specie mediterranee (leccio

e sughera) a causa di un processo di progressiva mediterraneizzazione delle zone interne pre-appenniniche; lieve espansione dell'areale di distribuzione di cerro e olmo, specie con evidenti buone capacità di adattamento.

Tutte le elaborazioni ottenute, comprese le carte di distribuzione reale e potenziale delle 16 specie oggetto della ricerca, sono disponibili su di un sito web dedicato elaborato dall'Università di Roma in collaborazione con il Corpo Forestale dello Stato (<http://sweb01.dbv.uniroma1.it/bruno/biorefugia/index.html>). Tale analisi necessita di considerare anche altri fattori biotici, come la diffusione di patologie indotte dal cambiamento climatico e la presenza di incendi boschivi che potrebbero modificare radicalmente le dinamiche successionali della vegetazione e la loro capacità di diffusione sul territorio.

4.3.2 Esempi di alcune evidenze riscontrate

In Spagna, nella parte Nord-Orientale, uno studio basato su dati storici, carte della vegetazione e aerofotografie, ha dimostrato che *Fagus sylvatica* è stata spostata nel margine inferiore del suo areale dall'avanzata di *Quercus ilex*, e a sua volta sta estendendosi oltre il suo margine superiore a discapito di altre specie come *Calluna vulgaris*. Questo spostamento verso quote più elevate delle fasce di vegetazione è da mettere in relazione, secondo gli autori di questo studio, con l'aumento di 1,2-1,4°C della temperatura registrato negli ultimi 50 anni, con particolare incremento negli ultimi 30 anni (Peñuelas e Boada, 2003). In linea con questo dato si pone anche lo studio condotto nelle foreste della Svizzera a partire da dati storici. Nella fascia bassa dell'areale di *Fagus sylvatica* è stato segnalato l'aumento dell'abbondanza di specie più termofile (Walther, 1997; Carraro *et al.*, 1999; Meduna *et al.*, 1999; Beguin, 2001), e contemporaneamente la tendenza delle specie montane a ritirarsi nella parte superiore della loro distribuzione (Walther, 1997; Carraro *et al.*, 1999; Walther e Grundmann, 2001). In Australia, nella zona temperata fresca della foresta pluviale Australiana, in particolare nel New South Wales, è stato osservato come *Nothofagus moorei* non sia più in grado di rigenerarsi, facilitando di fatto l'intrusione e l'espansione di elementi propri della vegetazione temperato-calda e sub-tropicale di latitudini più basse, come *Ceratopetalum apetalum* (Read e Hill, 1985).

Del tutto particolare è invece quello che sta avvenendo nella regione compresa fra la parte meridionale della Svizzera e quella Settentrionale dell'Italia dove un nuovo tipo di bosco temperato-caldo sta stabilizzandosi a causa dei cambiamenti climatici registrati. Da un punto di vista bioclimatico questa area è posizionata nella zona di transizione tra la vegetazione delle latifoglie decidue e quella delle latifoglie sempreverdi (Klötzli, 1988; Klötzli *et al.*, 1996). Un modesto cambiamento climatico è stato sufficiente ad aprire una nuova nicchia ecologica idonea a specie temperato-calde, ma per ragioni storiche vivono nell'area solo poche specie indigene con queste caratteristiche, le uniche, infatti, che sono state in grado di ritornare dopo l'ultimo glaciale (Mai, 1995; Grabherr, 1997), e recenti monitoraggi hanno messo in luce come siano le specie esotiche, quelle impiegate storicamente per scopo ornamentale nelle ville e nei parchi (Schöter, 1936; Schmid, 1956; Walther, 1999, 2001), che si stanno diffondendo e naturalizzando in queste aree (Klötzli *et al.*, 1996; Walther, 1997, 2000, 2003; Carraro *et al.*, 1999).

La stabilizzazione di elementi esotici termofili all'interno della flora nativa viene riportato anche in Spagna, con la comparsa di specie tropicali e subtropicali provenienti dal Sud America e dal Sud Africa (Sobrino *et al.*, 2001), e nelle coste occidentali dell'Irlanda, con la diffusione di *Gunnera tinctoria* dal Sud America (Pilcher e Hall, 2001). Mentre in Europa, la parte settentrionale dell'areale delle specie latifoglie sempreverdi sta spostandosi verso Nord, come ad esempio *Ilex aquifolium* che sta cercando di stabilizzarsi nel Sud della Scandinavia (Berger e Walther, 2003). Oltre a questi esempi, dove il cambiamento è indotto dalla variazione della temperatura, vengono riportati studi dove sono le precipitazioni a essere indicate come le principali responsabili di mutamenti distributivi. Come il caso del deserto del Chihuahuan, nel Sud-Est dell'Arizona, caratterizzato da praterie-arbusteti, dove il numero e la copertura delle specie arbustive è cresciuto a partire dagli anni '70, ed è stato associato all'incremento delle precipitazioni invernali (Brown *et al.*, 1997). Esempio opposto, invece, è fornito dallo studio condotto nel New Mexico Settentrionale dove l'avvento di aridità ha indotto l'avanzata di *Pinus edulis* e *Juniperus monosperma* a discapito di *Pinus ponderosa* (Allen e Breshears, 1998).

Si può concludere questa breve rassegna, aggiungendo che in particolari ambienti caratterizzati da più delicati equilibri, sono probabilmente coinvolte interazioni specifiche tra più di un fattore climatico. Come nelle *cloud forest* delle montagne tropicali, dove il recente surriscaldamento ha alterato l'abbondanza e la frequenza delle nebbie durante la stagione asciutta, con ripercussioni già evidenti sulle specie animali, che essendo mobili sono più pronte a seguire i cambiamenti ambientali. Le popolazioni di uccelli, rettili e anfibi tipiche di quegli ambienti, anticipando probabilmente le risposte vegetali, sono crollate parimenti all'incremento di specie non tolleranti la nebbia, provenienti dalla cintura montana adiacente più bassa (Pound *et al.*, 1999; Condit *et al.*, 1996; Markham, 1998; Nadkarni e Solano, 2002).

Negli ultimi anni particolari settori della ricerca scientifica si sono impegnati nel cercare di stimare gli effetti dei cambiamenti climatici previsti nel XXI Secolo sulle specie vegetali in molte zone del pianeta. L'organizzazione mondiale che guida e coordina questi scienziati è l'IPCC, che fra le varie attività è impegnato anche a validare e diffondere i dati climatici relativi agli scenari futuri elaborati da alcuni Modelli di Circolazione Globale. Fra gli innumerevoli studi effettuati sulla base di questi dati si può citare quello condotto sugli areali di distribuzione di oltre 80 specie forestali del Nord-Est americano (Iverson e Prasad, 1998, 2002), e in Spagna (Benito Garzon *et al.*, 2008), quello sulla valutazione dei rischi di estinzione di 17 specie forestali rappresentative delle cenosi boschive dell'Europa (Ohlemüller *et al.*, 2006). La lista potrebbe continuare ancora, ma in conclusione si vuole citare per l'Italia il progetto "Biorefugia" appena conclusosi, patrocinato dal Ministero dell'Ambiente, che ha

analizzato il comportamento di 27 diverse specie arboree tipiche delle Alpi e degli Appennini sottoposte a stress climatico (Attorre *et al.*, 2009).

Il cambiamento climatico è stato stimato a partire da due diversi scenari IPCC (B1 e A1FI [vedasi nota 9]) e per due diversi trentenni 2031-2060 e 2071-2100 ottenuti dal Modello di Circolazione Globale HadCM3 che ha evidenziato per la penisola italiana un progressivo incremento dell'aridità con conseguente espansione della Regione Mediterranea a spese di quella temperata e alpina. Successivamente sono state prodotte delle carte della distribuzione potenziale attuale delle specie a partire dai dati raccolti sull'abbondanza in 6417 *plot* forestali realizzati nell'ambito del Programma Nazionale Indagine sul Deperimento delle Foreste (IN.DE.FO.), gestito dal Corpo Forestale dello Stato. Carte della distribuzione potenziale futura per i diversi scenari e intervalli temporali sono state prodotte includendo anche l'effetto della frammentazione del paesaggio misurata mediante l'uso del *Corine Landcover 2000*.

In questo modo è stato possibile raggiungere tre obiettivi principali: a) identificare i potenziali "vincitori" e "perdenti" degli effetti dei cambiamenti climatici. Come esempi sono riportati le carte relative a *Quercus suber* una tipica specie mediterranea termo-xerofila e ben adattata a condizioni di aridità; e le carte relative ad *Abies alba*, una specie temperata che potrebbe subire una significativa riduzione del suo areale potenziale a causa dell'aumento dell'aridità ambientale; b) identificare il contributo dell'attuale rete di aree protette alla conservazione delle specie forestali a fronte della loro potenziale migrazione dovuta agli effetti dei cambiamenti climatici. Si riportano come esempi la sovrapposizione delle aree potenzialmente da considerare come biorefugi per *Alnus cordata* e *Picea abies* e la rete di aree protette; c) identificare i principali centri di rifugio per le specie forestali italiane e, per i più importanti, valutare l'adozione di adeguate politiche di conservazione. In questo caso l'informazione è stata ottenuta sovrapponendo le carte dei biorefugi per ciascuna specie così fa evidenziare gli *hotspot*, le aree, cioè, che in futuro potrebbero ospitare il maggior numero di specie qualora si verificassero i cambiamenti previsti dai modelli adottati in questo studio.

4.3.3 Impatti sullo stato di salute delle foreste: alterazione dell'equilibrio con gli agenti patogeni

Il clima possiede un ruolo determinante nel regolare la velocità di diffusione di una malattia nello spazio e nel tempo e nel predisporre, o meno, nuovi ospiti all'attacco di patogeni. L'attuale area di diffusione delle principali malattie forestali, sia endemiche sia epidemiche, è di fatto determinata da precisi limiti climatici. È, inoltre, accertato come il cambiamento climatico globale, oltre a un aumento graduale delle temperature minime e massime, producano un'intensificazione degli eventi estremi, tra cui quelli siccitosi (Beniston e Stephenson, 2004), con conseguente impatto sugli ecosistemi naturali e semi-naturali, in particolare sulle interazioni all'interno della frazione biotica. In termini fitopatologici, l'equilibrio tra ospiti e patogeni potrebbe fortemente modificarsi con conseguenze difficilmente prevedibili.

Due gruppi di ricerca, quello di Brasier e Scott (1994) e quello di Bergot e collaboratori (2004), utilizzando modelli di simulazione diversi per il binomio *Phytophthora cinnamomi* - *Quercus* spp., hanno evidenziato come un incremento delle temperature, compreso tra 0,5 e 5°C, produrrebbe un aumento dell'attività patogenetica di *P. cinnamomi* e una sua espansione, o movimento del suo areale di diffusione, che determinerebbe il contatto del patogeno con ulteriori ospiti potenziali. A tale proposito, Vettrano e collaboratori (2005) hanno evidenziato come *P. cinnamomi* non sia presente nel suolo di aree castanicole, caratterizzate da temperature minime del mese più freddo inferiori a 1,4°C, e come un graduale innalzamento delle temperature minime permetterebbe invece lo svernamento di questo patogeno e il suo insediamento in tali aree. Contemporaneamente l'incremento delle temperature massime potrebbe da un lato rendere alcuni ambienti inospitali per organismi patogeni nativi e dall'altro favorire l'invasione di organismi alieni (invasioni biologiche).

Diverso e difficilmente prevedibile è l'impatto sui patogeni dell'aumento della frequenza e durata di eventi estremi, quali la siccità. Nei binomi ospite-patogeno secondario, la siccità agisce come fattore scatenante del processo patogenetico. È il caso di *Biscogniauxia mediterranea*-*Quercus* spp. Negli ambienti mediterranei, *B. mediterranea* è un fungo endofita del genere *Quercus* ove colonizza i diversi organi e tessuti dell'ospite in un rapporto di simbiosi apparentemente indifferente (Collado *et al.*, 2001). Solo in presenza di intensi periodi di siccità, che inducono condizioni di stress idrico nell'ospite, il fungo aggredisce massivamente i tessuti xilematici, meristemati e corticali causando il cosiddetto "cancro carbonioso" che talvolta porta a morte una pianta adulta in un'unica stagione vegetativa (Vannini e Valentini, 1994). Le carenze idriche possono avere un grosso impatto anche quando agiscono singolarmente e in successione a un evento patogenetico. L'attacco di *Phytophthora* spp., in condizioni di siccità prolungata, su piante legnose con apparato radicale fino, può innescare un accelerato stress idrico e repentini processi di deperimento (Vettrano *et al.*, 2003).

Allo stato attuale è difficile disporre di un quadro completo per la vegetazione italiana, mancando specifici programmi di ricerca e monitoraggio in questa direzione. Tuttavia, sulla base delle ricerche oggi disponibili sembrano emergere alcune situazioni di criticità che riguardano l'effetto delle prolungate siccità estive sulla funzionalità dei boschi di querce mediterranee. Tale situazione è particolarmente critica per le formazioni a prevalenza di *Quercus cerris* (cerro) che risultano oggi attaccate dal "cancro carbonioso" per circa il 40% della superficie nell'Italia centro-meridionale. Un altro esempio riguarda il possibile scatenarsi di attacchi di *Phytophthora* spp., con particolare riferimento a *Phytophthora cinnamomi*, nei confronti di specie di quercia e, soprattutto, di castagno in risposta all'innalzamento repentino di temperatura.

I risultati ottenuti grazie al mantenimento delle Reti di monitoraggio delle foreste europee dell'UE e dell'UN-ECE ICP Forests (in Italia, attraverso il Programma CONECOFOR del Corpo Forestale dello Stato) indicano che

l'ondata di caldo e siccità verificatasi in Europa nell'estate del 2003 ha determinato un chiaro peggioramento delle condizioni delle principali specie forestali nel corso del 2004, quindi l'anno successivo all'evento, soprattutto in Europa Centrale e in misura minore sulle nostre Alpi (Fischer, 2005). L'ondata di siccità che ha colpito l'Europa meridionale e tutta l'Italia Centro-Meridionale nell'estate del 2007 è stata invece così intensa e prolungata che i suoi effetti sulle foreste sono stati rilevati già nello stesso anno: la soglia di danno, al di sotto della quale le condizioni delle foreste sono considerate normali secondo una metodologia adottata a livello europeo, è stata raggiunta nel Lazio e superata in Abruzzo durante il mese di agosto del 2007, per la prima volta da quando il programma per il monitoraggio delle condizioni delle foreste (divenuto poi Programma CONECOFOR) è stato avviato, di concerto con tutti gli altri Paesi dell'UE, nel 1985. Le specie più colpite sono state le querce caducifoglie (cerro e roverella) e il faggio, i cui alberi hanno perso, in media, da un quarto a un terzo del fogliame, come mai era accaduto in Italia negli ultimi 20 anni. Si tratta di una prima chiara conferma dell'esistenza di sintomi di disgregazione del patrimonio forestale italiano. Questi dati emergono dai primi risultati dell'annuale campagna di monitoraggio delle condizioni delle foreste, svolta dal Corpo Forestale dello Stato (con la collaborazione di Regioni e Province autonome) nell'ambito del Programma per il Controllo degli Ecosistemi Forestali (CONECOFOR), in attuazione dei Regolamenti UE e della Convenzione UN-ECE sull'inquinamento atmosferico transfrontaliero a lungo raggio. L'analisi è basata su un primo campione rappresentativo della Rete di rilevamento sistematico CONECOFOR (che comprende circa 250 aree distribuite su tutto il territorio nazionale), consistente nel 20% delle aree dell'Italia Centrale e Meridionale, escluse le isole maggiori.

4.3.4 Impatto sugli incendi boschivi

Gli incendi sono attualmente la causa principale di distruzione dei boschi negli ambienti mediterranei (Velez, 2000). Negli ultimi tre decenni, nei paesi dell'Unione Europea che si affacciano sul Mediterraneo è stata registrata una media di circa 50.000 incendi forestali l'anno e una media annuale della superficie percorsa dal fuoco di circa 700.000 ettari. In realtà, la dinamica del fenomeno degli incendi è profondamente mutata: se il numero degli incendi di piccole dimensioni ha da sempre interessato gli ambienti mediterranei, sia per cause naturali-accidentali sia per la gestione del territorio, quello degli eventi di grandi proporzioni è cresciuto in misura notevole, in relazione ai repentini cambiamenti di uso del suolo, ad aspetti socio-economici, a interessi speculativi. In tale contesto appaiono particolarmente a rischio le interfacce urbano/rurali in cui gli agglomerati urbani sono direttamente adiacenti alla vegetazione naturale.

La maggior parte degli studi, basati sull'analisi di lunghe serie storiche di osservazione (Moreno, 2005), hanno evidenziato l'aumento della frequenza degli eventi e della superficie bruciata attribuibile all'effetto combinato del clima e del cambiamento di uso del suolo che, a sua volta, ha influenza sulle condizioni meteorologiche. In Sardegna è stata evidenziata una stretta relazione fra i valori dell'*Ichnusa Fire Index* (Spano *et al.*, 2006; Sirca *et al.*, 2006) e l'estensione delle aree bruciate, nonché un aumento dei giorni con classi di rischio elevato in corrispondenza degli anni caratterizzati da eventi estremi (ad es., il 2003). Alcuni recenti studi hanno mostrato come gli scenari di cambiamento climatico futuri possano portare a un incremento da 10 a 15 giorni della stagione di incidenza degli incendi boschivi. Tale incremento rappresenta mediamente un aumento dal 17 al 25% della stagione degli incendi con un impatto che potrebbe riguardare dai 10.000 ai 15.000 ettari in più di territorio bruciato.

L'impatto degli incendi ha notevoli conseguenze sulla biodiversità. In particolare si prevedono nel futuro le seguenti criticità: a) aumento degli incendi nelle aree peri-urbane con conseguente impatto su parchi e aree naturalistiche in prossimità di estensioni metropolitane; b) aumento degli incendi in aree montane, non tradizionalmente colpite in passato, soprattutto in aree appenniniche e boschi di faggio; c) aumento dei fenomeni di desertificazione in aree mediterranee sottoposte a incremento nella frequenza di incendi ripetuti.

4.4. Sinergie con altri impatti dell'azione umana

L'impatto dell'azione umana sugli ecosistemi non è ovviamente dovuto solo all'emissione di gas serra. Molte altre cause concorrono al deterioramento del funzionamento della nostra biosfera. Purtroppo in molti casi gli impatti agiscono sinergicamente arrecando un danno che risulta maggiore della somma dei danni procurati dai singoli impatti. Il cambiamento di uso del suolo è probabilmente il maggiore fattore di impatto sul funzionamento degli ecosistemi (Sala *et al.*, 2000) e la sua sinergia con l'impatto del cambiamento climatico è particolarmente importante.

4.4.1. La frammentazione ambientale

La maggiore minaccia di distruzione della biodiversità è causata dai processi di distruzione degli habitat, dovuti all'intervento umano, che provocano una progressiva frammentazione ambientale. Questi fenomeni intervengono su una preesistente eterogeneità ambientale (definita come *patchiness* in ecologia) e conducono a una giustapposizione di tipologie ecosistemiche, di tipo naturale, seminaturale e artificiale, differenti strutturalmente e funzionalmente tra loro.

I fenomeni di frammentazione producono: a) scomparsa e/o riduzione in superficie di determinate tipologie ecosistemiche; b) isolamento progressivo dei frammenti ambientali residui sul territorio; c) perdita di qualità dei frammenti residui; d) trasformazione, a scala di paesaggio, della configurazione dei frammenti (aumento di alcune tipologie ambientali a scapito di altre).

La frammentazione ambientale influenza fattori e processi ecologici a tutti i livelli gerarchici (dall'individuo all'ecosistema, al paesaggio) e a scale spaziali e temporali differenti. Ha effetti maggiori laddove siano presenti più specie con ridotte capacità dispersive ed elevata specializzazione ecologica (come avviene, ad esempio, negli ambienti estremi). Nei frammenti, le popolazioni, isolate e ridotte di dimensioni, mostrano maggiore vulnerabilità nei confronti di eventi stocastici. È evidente come la frammentazione e la distruzione degli habitat impediscano eventuali spostamenti o dispersioni, causati o favoriti dal cambiamento climatico, e quindi la pianificazione ambientale dovrebbe favorire processi che garantiscano la continuità territoriale.

È perciò necessaria una qualificata azione di connessione ecologica che consenta, complessivamente, una maggiore capacità di resistenza e resilienza dei sistemi naturali, contribuendo così a una politica di mitigazione degli effetti del cambiamento climatico in atto. Questa azione concreta contribuirebbe al raggiungimento dell'obiettivo, che l'intera comunità internazionale si è data, di ridurre significativamente il tasso di perdita di biodiversità entro il 2010, target ufficializzato nel piano di implementazione del *World Summit for Sustainable Development* delle Nazioni Unite (Johannesburg, 2002), nelle risoluzioni della Convenzione sulla Diversità Biologica e nel *World Summit* delle Nazioni Unite del 2005. La sfida della conservazione rispetto al cambiamento climatico si concentra sulla realizzazione di strategie finalizzate a rendere gli ecosistemi e le specie meno vulnerabili agli effetti del cambiamento climatico stesso. In termini ecologici questo significa "contenere i danni" (favorendo la resistenza ecologica) e, al contempo, incrementare la possibilità di recupero (favorendo la resilienza ecologica) dei sistemi naturali (Hansen *et al.*, 2003).

Il nostro Paese, a causa della sua conformazione geologica (particolarmente giovane, con la presenza di vulnerabilità di carattere tettonico e vulcanico, con una significativa fragilità di numerosi territori, interessati da fenomeni franosi e di instabilità pedologica) e della sua elevata densità di popolazione presenta gran parte del territorio interessato da situazioni di rischio naturale (APAT, 2005). In Italia si evidenzia così una complessiva debolezza dei sistemi ecologici e sociali (oggi definiti *Social-Ecological Systems* nell'ambito della scienza della sostenibilità). A questa vulnerabilità, che potremmo definire naturale, si aggiungono gli effetti sinergici della profonda trasformazione antropica del territorio (urbanizzazione, edificazione diffusa, *sprawling* urbano, infrastrutture, ecc.), che ne ha fortemente accentuato la frammentazione, e del cambiamento climatico (in particolare, l'estremizzazione degli eventi meteorologici) che nel loro complesso determinano seri problemi allo stato di salute degli ecosistemi e della biodiversità (Falcucci *et al.*, 2007).

5. SCENARI E PROPOSTE PER LA STRATEGIA NAZIONALE PER LA BIODIVERSITÀ'

Gli impatti del cambiamento climatico si esplicano sia sui sistemi umani sia sui sistemi naturali, che forniscono una miriade di beni e di servizi all'umanità. A livello internazionale si riconosce chiaramente la necessità di intervenire con strategie di mitigazione (per l'eliminazione o la riduzione progressiva delle emissioni dei gas climalteranti) e con strategie di adattamento (mirate a predisporre piani, programmi, azioni e misure che minimizzino le conseguenze negative e i danni causati dal possibile cambiamento climatico sia ai sistemi naturali sia a quelli umani).

La definizione di adattamento, secondo la letteratura legata al cambiamento climatico, viene così indicata dall'IPCC (2001): "Aggiustamenti nei sistemi ecologici, sociali ed economici in risposta a stimoli climatici attuali o previsti, ai suoi effetti, ai suoi impatti. Questo termine si riferisce a cambiamenti in processi, pratiche o strutture per moderare o bilanciare eventuali danni o approfittare di eventuali opportunità derivanti dal cambiamento climatico".

Da un punto di vista ecologico e di sostenibilità dei sistemi socio-ecologici il mantenimento di buoni livelli di vitalità e resilienza dei sistemi naturali è considerato come una base essenziale per garantire i servizi che gli ecosistemi offrono al benessere e alla stessa economia umana e come mantenimento di buone capacità reattive allo stesso cambiamento climatico.

5.1. Proposte per l'adattamento degli ecosistemi marini

Il raggiungimento di alcuni obiettivi chiave potrebbe contribuire a un adattamento degli ecosistemi marini ai cambiamenti in atto, riducendone gli impatti e aumentandone la resilienza.

Obiettivi:

1. Conservare e ripristinare gli ambienti marini naturali per il mantenimento di alti livelli di funzionalità e produzione di beni e servizi ecosistemici.

Proposte: a) creazione di un *network* di Aree Marine Protette; b) modulazione dell'estensione e ampliamento delle Aree Marine Protette per mantenere i servizi ecosistemici offerti con aumento dell'habitat disponibile; c) estensione della protezione ambientale dai sistemi costieri a quelli profondi del Mediterraneo (inclusi coralli profondi); d) identificazione degli *hotspot* di biodiversità marina idonei a pratiche di protezione e conservazione; e) aumento della conoscenza delle interazioni e della connettività tra i diversi ecosistemi marini e/o tra i diversi comparti ecosistemici per poter sviluppare strategie di conservazione appropriate; f) supporto alle pratiche di sviluppo sostenibile, incluse la pesca e la conservazione della biodiversità e degli ecosistemi marini in paesi del sud del Mediterraneo.

2. Contrastare la perdita di biodiversità specifica legata all'impatto del cambiamento climatico.

Proposte: a) sviluppare strategie a lungo termine per monitorare gli effetti di questi cambiamenti sulla biodiversità e sul funzionamento degli ecosistemi marini costieri e profondi; b) conoscere gli effetti del cambiamento climatico sui cicli vitali delle specie marine; c) sviluppare strategie a lungo termine per monitorare la presenza e la distribuzione di specie non autoctone (aliene), in particolare alghe e altri organismi potenzialmente tossici; d) studiare l'impatto dei cambiamenti sugli *stock* ittici e sulle altre risorse rinnovabili di interesse commerciale e non; e) contrastare la disposizione di infrastrutture di tipo esteso (barriere frangiflutti emerse); f) ricostituire un sistema dunale lungo le fasce costiere che ne erano provviste.

3. Conservare e migliorare le condizioni di qualità ecologica degli ambienti marini per migliorarne la risposta al cambiamento climatico.

Proposte: a) approfondire la conoscenza delle alterazioni alle condizioni fisico-chimiche, trofiche e idrodinamiche degli ecosistemi marini; b) approfondire la conoscenza degli impatti diretti e indiretti dovuti a fenomeni di alterazione e/o contaminazione e degli effetti ecologici a cascata; c) sviluppare pratiche di *Integrated-Coastal Zone Management* (ICZM) capaci di rispondere in modo dinamico ai cambiamenti in atto (inclusa la rimozione di barriere e strutture che alterano il funzionamento della fascia costiera); d) identificare gli strumenti opportuni per il rispetto della qualità ambientale e lo sviluppo di pratiche di recupero e restauro ecologico di ecosistemi marini compromessi o danneggiati; e) identificare le procedure di bonifica ambientale e di decontaminazione dei siti marini contaminati con utilizzo di eco-tecnologie e un approccio volto a ridurre il rischio ecologico associato.

4. Ridurre le carenze conoscitive e aumentare la capacità di comprensione dei cambiamenti in atto negli ecosistemi marini costieri e profondi.

Proposta: creare una struttura permanente (ad es., un Osservatorio sulla biodiversità marina) per la raccolta e l'integrazione delle informazioni esistenti sulla biodiversità marina nel Mediterraneo.

5.2. Proposte per l'adattamento degli ecosistemi di acque interne e ambienti di transizione

5.2.1 Fiumi

Occorre mettere in atto strategie e azioni integrate di prevenzione, mitigazione e adattamento che consentano il recupero della qualità ambientale dei corsi d'acqua.

Alla scala di bacino idrografico e di bacino idrogeologico si dovrà agire su:

- uso sostenibile delle risorse idriche, attraverso la razionalizzazione dei prelievi e dei consumi idrici (obiettivo che impone grande cautela sul versante della progettazione delle opere di bacinizzazione);
- riduzione dell'impermeabilizzazione, attraverso misure drastiche, volte a limitare il consumo dei suoli naturali e dei suoli agricoli;
- valorizzazione delle aree marginali in agricoltura, il cui ruolo è importante anche nel sequestro di CO₂;
- scelte di politiche agricole ecocompatibili.

Al contempo, si dovrà intervenire sulle aste fluviali e sulle fasce riparie perseguendo due obiettivi tra loro strettamente connessi: 1) riassetto idraulico, aumento della capacità di laminazione nelle fasce fluviali e ricostruzione morfologica degli alvei di piena; 2) conservazione e ripristino dell'integrità ecologica delle aree riparie e, dunque, del ruolo che esse hanno nella modulazione e regolazione di funzioni essenziali (cicli biogeochimici e flussi di energia) dell'ecosistema fluviale.

Sicurezza idraulica e rinaturalizzazione non sono in conflitto: si investe sulla naturalità per avere più sicurezza (Nardini e Sansoni, 2006). Si rigetta il modello del fiume canalizzato per aderire all'idea dei corsi d'acqua come sistemi in equilibrio dinamico. L'obiettivo è quello di recuperare i processi e le funzioni dell'ecosistema fluviale, ricongiungendo il fiume alla golenale e consentendo a esso di espandersi su un'ampia fascia di mobilità funzionale. Questo obiettivo implica la rivalutazione di elementi residui significativi di naturalità, ma richiama anzitutto l'esigenza di ripensare e superare i modelli di gestione ispirati a logiche perennemente "emergenziali". La ricostruzione ecologica, attraverso il ripristino di stati di equilibrio dinamico dei caratteri idrogeomorfologici e ambientali, diventa un'opzione strategica per ridurre il rischio idraulico, conservare la quantità e migliorare la qualità delle risorse del fiume, incrementare le capacità di resistenza e recupero del sistema fluviale stesso. Tutto ciò è conveniente, anche e soprattutto, sotto il profilo economico. La conservazione di una buona qualità delle risorse è condizione essenziale per uno sviluppo sociale ed economico duraturo.

All'affermazione di questo orientamento gestionale ha contribuito in modo decisivo l'evoluzione dell'ecologia fluviale attraverso una vasta sperimentazione su approcci ecosistemici, dal *Watershed Approach* di Likens (Likens, 1984), al *River Continuum Concept*, al *Flood Pulse Concept* al modello di *Struttura Gerarchica* (Bettinetti *et al.*, 2007). Suggestivo è stato l'apporto della scuola ecoidrologica di Zalewski (Zalewski, 2002), mentre di forte rilievo applicativo è l'idea delle *Critical Transition Zones* (Ewel *et al.*, 2001), individuate nelle interfacce di interconnessione tra il fiume e le aree umide della fascia riparia come ambiti determinanti nella regolazione dei cicli biogeochimici e degli scambi suolo-acqua-atmosfera (Bartoli e Viaroli, 2006). In definitiva, lo stato ecologico e la qualità delle acque del fiume dipendono dal grado di connettività nelle tre dimensioni dello spazio (oltre che dalle relative modificazioni nel tempo): la connettività laterale con ambienti acquatici temporanei o permanenti e la vegetazione delle aree golenali, la connettività longitudinale tra le forme fluviali che da monte a valle sono modellate dai processi di trasporto, erosione e sedimentazione, la connettività con le reti alimentari dell'ambiente iporreico in cui si ha scorrimento sotterraneo delle acque (Viaroli *et al.*, 2007). Proposte di riqualificazione possono essere pensate e attuate con riferimento all'obiettivo di potenziare l'efficienza e la continuità delle interconnessioni lungo le tre direzioni.

Il quadro complessivo della situazione di numerosi bacini fluviali italiani conferma, per altro, la necessità di promuovere un approccio alla gestione della risorsa idrica a scala di bacino idrografico, che tenga in debito conto la complessità delle relazioni tra la componente fisica (idrogeomorfologica, ecologica, climatologia, ecc.) del territorio e quella sociale caratterizzata da usi e impatti. Si rende indispensabile un approccio che garantisca l'integrazione di politiche territoriali e ambientali - soprattutto per quanto riguarda la gestione delle risorse idriche, dell'agricoltura e della tutela della biodiversità - e che avvii una diffusa azione di tutela e recupero della funzionalità ecologica del territorio, promuovendo "interventi leggeri, polifunzionali e flessibili nella gestione, rispetto a severe infrastrutturazioni del territorio". Questo approccio trova ulteriore conferma da quanto emerge da recenti studi (Zanchettin *et al.*, 2008) che hanno evidenziato come all'elevata artificializzazione del reticolo idrografico superficiale sia da ricondurre la causa principale degli eventi estremi (prolungati periodi di siccità, modificazione delle precipitazioni e dei tassi di evapotraspirazione; erosione delle riserve idriche a scala di bacino; intensificazione degli eventi di piena catastrofica) che si stanno sempre più frequentemente verificando, in particolare, nel bacino del Po.

Strumenti già disponibili sono la Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE e la più recente Direttiva sul rischio alluvionale 2007/60/CE. Visti gli enormi ritardi nell'applicazione della Direttiva Acque, è indispensabile un intervento straordinario a livello istituzionale, soprattutto da parte del Ministero dell'Ambiente, della Tutela del Territorio e del Mare, per applicare correttamente la Direttiva Europea, rilanciando le Autorità di bacino, come

autorità di distretto, e redigendo piani di gestione di bacino idrografico che possano rappresentare una concreta e immediata opportunità per impostare politiche di adattamento a livello di bacino idrografico.

Di seguito, si indicano schematicamente, per comparti tematici, alcune proposte esemplificative di un approccio tecnico-scientifico integrato, mirato a obiettivi di riqualificazione fluviale. Queste proposte si configurano anche come interventi per la prevenzione e la mitigazione dei rischi idraulici e ambientali associabili al cambiamento climatico e devono comunque, qualora attuate, diventare oggetto di studio e verifica della loro efficacia.

1. Regime idrologico:

- implementazione delle conoscenze per una gestione conservativa della risorsa idrica;
- tutela e ripristino, laddove possibile del “flood pulsing” e conseguente adeguamento del deflusso minimo vitale alle esigenze funzionali dell’ecosistema fluviale;
- regolamentazione delle concessioni e degli usi dell’acqua in relazione al controllo del bilancio idrico e al raggiungimento e/o mantenimento del “buono stato ecologico”;
- adattamenti alla risalita del cuneo salino alle foci dei fiumi nei periodi di magra.

2. Continuità laterale e longitudinale:

- adeguamento e/o rimozione di opere trasversali e/o longitudinali in relazione alla mitigazione e compensazione degli impatti;
- riequilibrio del trasporto solido attraverso la gestione dei sedimenti e azioni atte al ripascimento naturale degli alvei;
- minimizzazione del disturbo associato a captazione e rilascio di acque dalle centrali idroelettriche;
- divieto di estrazioni di materiale in alveo, fatto salvo per gli interventi di manutenzione, debitamente regolamentati;
- costruzione di rampe di risalita per l’ittiofauna.

3. Equilibrio morfologico e mobilità funzionale:

- smantellamento di opere di difesa non strategiche;
- riattivazione di processi laterali con il recupero di aree ruderali;
- aumento dello spazio destinato all’espansione delle piene.

4. Rinaturalizzazione:

- riattivazione di forme fluviali relitte;
- recupero funzionale e ripristino ambientale delle aree di cava;
- ricostruzione di microhabitat ripariali (zone umide);
- ricostruzione delle fasce ripariali boscate;
- diffusione di buone pratiche agricole e zootecniche in aree golenali.

5. Qualità delle acque:

- ricostruzione delle aree laterali (zone critiche di transizione) per recuperare processi e funzioni biogeochimiche;
- recupero funzionale del reticolo idrografico secondario (fasce tampone);
- uso generalizzato di ecosistemi-filtro.

6. Protezione:

- introduzione di vincoli di tutela per le aree di elevato pregio conservazionistico;
- adattabilità dei piani di gestione di aree protette o siti di interesse comunitario al cambiamento climatico e ai relativi impatti ambientali.

L’acquisizione di un quadro quanto più esaustivo di conoscenze sulla biodiversità dei corpi d’acqua è resa più impellente dall’esigenza di valutare gli effetti delle invasioni biologiche nel contesto delle tendenze in atto al cambiamento climatico. È da aggiungere che lo sviluppo di ricerche integrate sulle relazioni tra biodiversità e funzioni degli ecosistemi acquatici corrisponde anche all’esigenza di superare alcuni limiti dell’approccio seguito dalla Direttiva Acque, in particolare l’impostazione che affida la valutazione di stato ecologico essenzialmente a classi separate di indicatori (biocenotici, ecotossicologici, ecc.). A questo riguardo, si osservano alcune incongruenze della Direttiva sulla questione degli standard di qualità per singole sostanze ritenute potenzialmente pericolose: le sostanze sono state selezionate in base ai quantitativi usati e ai ritrovamenti ambientali su scale territoriali ampie, senza tener conto della pericolosità che altri composti possono avere a più piccole scale

territoriali; i potenziali tossici sono inoltre per lo più considerati individualmente trascurando gli effetti additivi o sinergici di miscele di composti contemporaneamente presenti nelle acque (Galassi *et al.*, 2004). Si sottolinea, in ogni caso, l'importanza di implicare, nell'analisi e nella previsione dell'impatto dei cambiamenti climatici sugli ambienti acquatici, anche le competenze di ambito ecotossicologico.

Si dedicano solo brevi cenni, infine, a questioni che in realtà assumono un rilievo preminente rispetto agli obiettivi di una gestione sostenibile e adattativa delle risorse naturali in un contesto ambientale in rapido cambiamento. Le esperienze di ricerca, sperimentazione e progettazione sui fiumi e su altri ecosistemi segnalano sempre più esplicitamente come oggetto primario di interesse il sistema di interazioni tra dinamiche naturali e attività umane, tra variabilità dei parametri ambientali e tendenze e propensioni rilevabili in campo socio-economico. Si avverte l'esigenza di potenziare la dotazione di metodologie per l'analisi e la previsione a supporto di percorsi decisionali spesso controversi. Si considera con interesse il campo di indagine delle scienze del paesaggio sui temi della gestione e del governo dei sistemi socio-ecologici (Petrosillo *et al.*, 2008), così come lo sviluppo di modelli bio-economici per la stima del valore economico dell'ambiente e l'individuazione di scenari di sostenibilità. Altrettanto promettente appare l'elaborazione e l'applicazione di modelli qualitativi per le valutazioni di impatto ambientale e di incidenza (ma anche per la valutazione di *performance* di percorsi di partecipazione pubblica su temi critici come quello di un uso parsimonioso della risorsa idrica) (Bodini *et al.*, 2007).

5.2.2 Laghi

Lo sviluppo e l'estensione di ricerche limnologiche su temi riguardanti gli effetti del riscaldamento climatico rappresentano gli obiettivi di un'azione che ha valenza prioritaria.

Alla scala di bacino idrografico, altre azioni dovrebbero focalizzarsi su:

- riduzione dei carichi di nutrienti e contaminanti
- risparmio idrico attraverso scelte gestionali mirate
- sviluppo di zone litorali vegetate
- gestione adattativa della pesca.

5.2.3 Piccole acque

Oltre al completamento delle conoscenze scientifiche di base, per la tutela di questi ambienti si rendono necessarie alcune azioni prioritarie:

- attivazione di campagne di monitoraggio previste in apposita normativa;
- tutela delle aree naturalmente ricche di piccole acque, soprattutto in terreni aridi, dove costituiscono serbatoi di biodiversità.

Vanno controllate, in particolare:

- le manomissioni antropiche (colmatazioni per scopi agricoli, usi zootecnici e irrigui);
- l'introduzioni di specie aliene (come il gambero della Louisiana, che sopravvive a periodi di disseccamento).

Interventi mirati al miglioramento della funzionalità e al ripristino di questi biotopi (Williams *et al.*, 2008) dovranno essere realizzati in aree dove erano naturalmente presenti e sono stati successivamente manomessi, o in aree in cui sono insediate specie gravemente minacciate, avendo cura di una gestione che, anzitutto sotto il profilo idrogeomorfologico, tenga conto di criteri di mitigazione e adattamento tesi alla minimizzazione degli effetti dei cambiamenti climatici globali sui cicli idrologici.

5.2.4 Ambienti di transizione

Di assoluta urgenza per gli ambienti di transizione, per la preservazione e valorizzazione ottimale dei beni, dei prodotti e dei valori intrinsecamente legati al capitale naturale di questi ecosistemi, sono azioni mirate a: 1) risanamento e 2) gestione ecocompatibile.

Queste due azioni devono essere accompagnate e sostenute dallo sviluppo coordinato di ricerche e di attività di monitoraggio che consentano di acquisire conoscenze aggiornate sulla consistenza della biodiversità, sui fattori che ne determinano variazioni significative, sulle relazioni tra biodiversità e funzioni indagate sia a livello di popolazioni sia a scala di ecosistemi. Questa prospettiva appare propiziata dalla presenza di *network* per la ricerca ecologica nelle zone costiere e nelle aree di transizione, organizzati su base nazionale in numerosi paesi europei e impegnati su iniziative scientifiche di rilievo internazionale (Razinkovas *et al.*, 2008).

L'esigenza di recuperare rapidamente un quadro esauriente di conoscenze e informazioni sulle nostre lagune è sottolineata, per altro, anche in relazione all'obiettivo di sviluppare tecniche per la valutazione di efficacia delle misure per l'acquisizione di un buono stato ecologico di questi ambienti, secondo quanto prescritto dalla Direttiva Acque (Zaldívar *et al.*, 2007; Razinkovas *et al.*, 2008). Una linea di ricerca che va decisamente incoraggiata riguarda il discernimento dei livelli di sinergicità tra effetti dei cambiamenti climatici ed effetti di altre forme di impatto: si avverte la necessità di integrare l'analisi di serie di dati ecologici rilevati sul campo (da rendere quanto

più robuste e continuative sul lungo termine) con un'articolata sperimentazione da condurre anche con tecniche manipolative.

Si insiste sul concetto, e sulla pratica, di una gestione integrata del sistema di connessioni e scambi delle lagune con la rete idrografica delle acque continentali e con il mare costiero e, inoltre, sul carattere prioritario di azioni tese a prevenire e a mitigare gli impatti dovuti alle pressioni antropiche a scala locale e quelli prevedibilmente associati ai cambiamenti climatici. A questo fine si rendono necessari interventi tesi a:

- ridurre l'apporto di contaminanti dalle diverse fonti di generazione (agricoltura, industria, ecc.) agli specchi lagunari;
- alleggerire e rendere quanto più adattative e flessibili le opere di ingegneria idraulica sia a mare che lungo i corsi d'acqua afferenti;
- recuperare la qualità ambientale di aree danneggiate o minacciate ricorrendo alle moderne tecniche di ecological restoration;
- proteggere habitat e specie di riconosciuto pregio naturalistico.

Azioni di particolare rilievo socio-economico devono essere pensate per rendere ecologicamente compatibili attività produttive talora redditizie (è il caso della pesca e della molluschicoltura), che possono in caso contrario portare al collasso le risorse dal cui sfruttamento esse traggono profitto. Su questo fronte si intrecciano problemi non semplici di educazione degli *stakeholder* a una cultura della sostenibilità e della responsabilità in un contesto socio-ambientale dominato dall'incertezza (incertezza che è destinata, peraltro, a lievitare per effetto di accelerazioni imprevedibili dei cambiamenti climatici). Si riprendono considerazioni già svolte nelle note dedicate ai bacini fluviali. Ci si riconduce, in sostanza, al tema chiave di una partecipazione non fittizia dei portatori di interessi e dei cittadini a scelte strategiche per la tutela dell'ambiente come condizione per uno sviluppo economico duraturo e una buona qualità della vita.

Ma questi percorsi non possono essere realisticamente attivati in assenza di strumenti di solida tenuta scientifica (modelli bioclimatici, modelli bioeconomici per l'analisi di scenari gestionali, modelli per le valutazioni di impatto e di incidenza) che stimolino e orientino il confronto verso soluzioni possibilmente condivise. Compete alla ricerca predisporre questi strumenti e sperimentarne e validarne l'efficacia. Senza dimenticare che, oltre il livello della partecipazione delle comunità locali direttamente interessate alla conservazione e a una buona gestione degli ecosistemi su cui gravitano, esiste anche, in materia di pianificazione territoriale e politiche ambientali, il livello, più alto e aggrovigliato, dei problemi non risolti del dialogo interistituzionale, dei conflitti tra organi di governo e corpi dell'Amministrazione Pubblica. A questo riguardo, appare emblematico il caso della Laguna di Venezia (Suman *et al.*, 2005).

5.3. Proposte per l'adattamento della vegetazione e degli ecosistemi forestali

Il possibile cambiamento climatico che abbiamo di fronte è caratterizzato da una grande velocità e, nello stesso tempo, da un acuirsi degli eventi estremi. In particolare, questi ultimi risultano imprevedibili per le piante che hanno sviluppato una memoria genetica del clima e delle sue fluttuazioni nell'arco dell'intera evoluzione biologica, che rende quindi difficile una loro risposta nel breve termine. A ciò si aggiunge il fatto che gli ecosistemi forestali hanno una risposta lenta e spesso non evidente nell'arco temporale della vita di una generazione umana, ma altresì inesorabile e spesso irreversibile quando cominciano ad apparire i primi sintomi.

In questo quadro si impone urgente una politica di monitoraggio e gestione del patrimonio forestale al fine di ridurre i rischi climatici e di proteggerne la funzionalità e i servizi. Dall'insieme delle informazioni scientifiche che, a oggi, sono disponibili si possono trarre le seguenti considerazioni.

5.3.1 Foreste

È necessario:

1. sviluppare un programma di ricerca scientifico nazionale con l'obiettivo di fornire informazioni sulla risposta del patrimonio forestale al cambiamento climatico sia in termini fisiologici e di adattamento biologico sia in termini di alterazione della biodiversità e disponibilità di habitat nonché sulla risposta ecosistemica e gestionale in termini socio-economici e di adattamento alle realtà del territorio rurale e montano;
2. sviluppare un programma di monitoraggio di lungo termine della funzionalità degli ecosistemi forestali per quanto riguarda sia la biodiversità sia le funzioni biogeochimiche. In particolare, si devono estendere e rafforzare con maggiori dati i programmi di monitoraggio esistenti su scala nazionale, tra cui la rete LTER-Italia e CONECOFOR¹¹ e la rete nazionale CARBOITALY (Papale, 2006);
3. rafforzare le misure di protezione delle aree di rifugio e dei tipi forestali più minacciati (foreste umide, planiziali e di alta montagna) e istituire reti di aree protette in grado di favorire la migrazione delle specie sulla possibile spinta del cambiamento climatico;

¹¹ Vedasi sito del Corpo Forestale dello Stato <http://www.corpoforestale.it>

4. rivedere le attuali politiche di gestione forestale, a partire dai regolamenti regionali e dalle prescrizioni di massima, per tenere conto dei rischi del cambiamento climatico, incentivando la complessità strutturale e specifica dei popolamenti forestali, l'adozione di interventi selvicolturali adattativi di bassa intensità ma capillari, la protezione della sostanza organica dei suoli e la funzionalità del ciclo idrologico nella foresta;
5. monitorare la diffusione e distribuzione dei patogeni forestali, nonché modificare le scelte selvicolturali a fini di prevenzione per limitare l'incidenza delle malattie legate al deperimento climatico;
6. sviluppare misure di prevenzione e pianificazione della lotta agli incendi boschivi mediante l'impiego di moderni sistemi di monitoraggio e di modellistica previsionale basati sull'analisi climatica e territoriale.

5.3.2 Agroecosistemi

La principale caratteristica degli agro-ecosistemi è la forte predominanza dell'impatto antropico sulla gestione e sulla funzionalità, anche in termini di biodiversità. Tuttavia, l'impatto del cambiamento climatico determina un forte condizionamento sulle scelte colturali e sulla sopravvivenza di cultivar e varietà agronomiche che rappresentano oggi una parte consistente del prodotto interno lordo del nostro Paese.

L'elemento climatico più rilevante è rappresentato dalla disponibilità di risorse idriche che costituiscono, nel caso dell'agricoltura, circa il 60% dell'intero fabbisogno idrico nazionale. Sotto punto di vista si prevedono scenari di riduzione di produzione, in termini di resa quantitativa, nelle colture non irrigue di circa il 20-30%. Per quanto riguarda le colture irrigue è difficile fare una previsione perché essa dipende dalla possibilità di ottimizzare la capacità nazionale dei bacini e la rete di distribuzione delle risorse idriche. Tuttavia, il dato più preoccupante riguarda la qualità della produzione e l'impatto del cambiamento climatico sulle certificazioni di qualità (DOC e DOP) dei prodotti, in particolare vino e olio d'oliva. Vi sono, inoltre, criticità nei confronti di prodotti di nicchia importanti, come la produzione tartuficola e fungina, fortemente legate alla variabilità climatica.

In sintesi, le azioni di conservazione e adattamento della biodiversità agricola possono essere così sintetizzate :

1. Azioni a breve periodo:
 - conservazione dell'umidità del suolo: introduzione di tecniche di conservazione dell'umidità (no tillage, pacciamatura, ecc.); gestione dell'irrigazione (ammontare ed efficienza).
 - gestione dei sistemi colturali: impiego contemporaneo di cultivar con caratteristiche diverse (riduzione della variabilità di produzione); cambio dei cultivar; cambio delle pratiche agronomiche (data di semina); cambio del tipo e/o della modalità di impiego di fertilizzanti e pesticidi.
2. Azioni a medio termine:
 - cambio dell'uso-suolo per ottimizzare o stabilizzare produzione (ad es., sostituzione di colture con alta variabilità inter-annuale, come il frumento, con colture a più bassa variabilità, come i pascoli);
 - sviluppo di nuove cultivar per adattarsi più velocemente agli stress indotti dal cambiamento climatico (miglioramento genetico tradizionale o utilizzo di biotecnologie);
 - sostituzione delle colture per conservare meglio l'umidità del suolo (ad es., mais con sorgo)
 - modifiche del microclima per migliorare l'efficienza dell'uso dell'acqua (ad es., frangivento, colture intercalari, ecc.).

5.4. Proposte per l'adattamento degli ambienti di alta quota

In questo contesto, diverse iniziative sono state effettuate al fine di analizzare gli effetti dei cambiamenti climatici e i cambiamenti di uso del suolo sugli ecosistemi d'altitudine, e ipotizzare azioni di adattamento e compensazione. Le più rilevanti sono le seguenti:

- avvio di una rete di monitoraggio della biodiversità in alta quota nell'ambito della rete internazionale LTER (Long Term Ecological Research). A tale rete aderiscono le stazioni di ricerca coinvolte nel progetto internazionale di ricerca UE-GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments, www.gloria.ac.at), che valuta gli effetti a lungo termine del processo di riscaldamento globale sugli ecosistemi alpini (Grabherr et al., 2001, Stanisci et al., 2005, Rossi et al., 2004), e altre stazioni di ricerca dove viene valutata a scala locale la perdita di habitat come risposta ai cambiamenti di uso del suolo e climatici (Theurillat et al., in stampa), i cambiamenti nel tempo della composizione floristica su praterie d'altitudine (Pettriccione, 2005) e le variazioni nelle caratteristiche di struttura e composizione di neve e suolo (Freppaz et al., 2007; Basili et al., 2007).
- avvio di progetti di conservazione e trattamento ex situ di specie alto montane a rischio di estinzione nelle banche del germoplasma, nell'ambito della Rete Italiana delle Banche del germoplasma per la conservazione delle specie spontanee (RIBES), in modo da analizzarne le capacità di germinazione, e mettere a punto protocolli di coltivazione e conservazione ex situ (Rossi et al., 2006; Bonomi et al., 2008).
- pubblicazione di alcuni contributi relativi all'analisi del limite superiore del bosco a diversa scala per individuare eventuali variazioni nell'accrescimento di specie legnose e slittamenti verso l'alto di specie e

comunità vegetali negli ultimi decenni (Pezzi et al., 2004; Anfodillo 2007; Carrer et al., 2007; Albert e al., 2008).

Al fine, però, di elaborare idonee strategie di conservazione sia *in situ* sia *ex situ* di specie e comunità vegetali di alta quota è necessario conseguire nuove conoscenze in merito a tre principali linee di ricerca:

1. applicazione di modelli di scenario climatico alla distribuzione e abbondanza delle specie cacuminali. L'applicazione di tali modelli avrebbe lo scopo di identificare le specie a maggiore rischio di estinzione e individuare i potenziali centri di rifugio da sottoporre a tutela. A tale scopo diverse esperienze sono state condotte a scala europea ma risentono di due principali limitazioni: la risoluzione spaziale dei modelli troppo elevata per poter essere applicata a scala nazionale (Bakkenes *et al.*, 2002; Thuiller, 2003; Skov e Svenning, 2004; Thuiller *et al.*, 2005) e le differenze genetiche esistenti in Europa fra popolazioni di una stessa specie causate dalle differenti direzioni di migrazione delle specie durante l'ultima glaciazione: in Europa, in particolare sulle Alpi, sono stati riconosciuti aplotipi ben differenziati per le specie di altitudine (Stehlik *et al.*, 2002; Schönswetter *et al.*, 2003; Ehrlich *et al.*, 2007; Naciri e Gaudeul, 2007), che potrebbero rispondere ai cambiamenti climatici in modo differente (Randin *et al.*, 2006).
2. rafforzamento della creazione di una rete di aree permanenti di monitoraggio lungo un gradiente altitudinale e latitudinale, per investigare i cambiamenti di medio termine della composizione floristica, della copertura delle specie e delle condizioni del suolo correlati all'attuale cambiamento climatico. La metodologia di campionamento dovrà seguire una metodologia standardizzata quale ad esempio quella adottata per il progetto GLORIA denominata *Multi-Summit approach* (www.gloria.ac.at) al fine di consentire la comparazione geografica e ambientale.
3. promozione di progetti per effettuare sperimentazioni adeguate su trattamento, germinazione e propagazione delle entità rare e/o minacciate, al fine di garantire la conservazione *ex situ* e *in situ* del germoplasma delle specie d'altitudine a maggior rischio di estinzione, in linea con le strategie europee e globali per la conservazione delle piante spontanee. In particolare la *European Strategy for Plant Conservation* (ESPC) 2008-2014 riporta come obiettivi principali la conservazione *ex situ* del 60% delle specie a rischio e l'implementazione di programmi di reintroduzione per almeno 50 specie.
4. analisi delle variazioni di specie target negli ultimi 100-200 anni mediante l'analisi degli ambienti di dolina e di nicchia di nivazione in alta quota, in quanto siti ideali all'estrazione di pollini attuali e fossili. La realizzazione di diagrammi pollinici, in valori assoluti e in percentuale, consentiranno di valutare le variazioni che le specie target hanno subito nell'arco di tempo considerato, consentendo una migliore comprensione del dinamismo delle popolazioni e comunità vegetali anche al fine dell'elaborazione di previsioni future.

Solo mediante l'integrazione di informazioni sul dinamismo pregresso, quello in atto e le previsioni future sarà possibile attivare azioni efficaci per la conservazione e la gestione di habitat e specie, che per le loro caratteristiche ecologiche sono tra i più vulnerabili agli effetti dei cambiamenti climatici.

5.5. Un'importante priorità: connessione e ripristino ecologico

I più avanzati studi di biologia della conservazione, che mirano alla conoscenza delle funzioni vitali della biodiversità e al loro mantenimento, si orientano sulla *Connectivity Conservation* (Crooks e Sanjayan, 2006; Battisti e Romano, 2008) in cui si possono riconoscere due componenti principali della connettività ecosistemica: quella strutturale o fisica, cioè la sistemazione spaziale dei differenti tipi di habitat e degli altri elementi nel paesaggio, e quella funzionale o comportamentale, cioè le risposte comportamentali di individui, specie o processi ecologici nella struttura fisica del paesaggio.

Riteniamo che, nel nostro Paese, sia necessaria una qualificata azione di connessione ecologica che consenta complessivamente una maggiore capacità di resistenza e resilienza dei sistemi naturali, contribuendo così a una politica di mitigazione e adattamento degli effetti del cambiamento climatico in atto.

Riteniamo, quindi, che un Piano nazionale di adattamento al cambiamento climatico debba essere impostato prioritariamente sul mantenimento dello stato di salute e di vitalità dei sistemi naturali, condizioni indispensabili che permettono agli ecosistemi di favorire i processi di adattamento al mutamento climatico e costituire la base fondamentale per raggiungere il "benessere" dei sistemi sociali. Laddove i sistemi naturali sono, infatti, degradati e vulnerabili si abbassano significativamente le loro capacità di reazione, con gravi ricadute anche sui sistemi sociali.

Ciò significa che, prima di impostare qualsiasi approccio tecnologico-infrastrutturale, come reazione all'adattamento al cambiamento climatico, è necessario: favorire la tutela e la corretta gestione del nostro patrimonio naturale, "riconnettere" questo patrimonio attraverso operazioni di ripristino e restauro ecologico, realizzare un sistema di reti ecologiche capaci di favorire le capacità di resistenza e resilienza dei sistemi naturali stessi.

Riteniamo, inoltre, sia necessaria una "grande opera pubblica" per il nostro Paese attraverso il ripristino del nostro territorio. Una simile opera renderebbe l'Italia meno vulnerabile ai mutamenti climatici e rafforzerebbe le nostre capacità di resistenza a essi.

Nel corso del Congresso 2007 della *Ecological Society of America* (ESA), la più autorevole organizzazione scientifica ecologica internazionale, tenutosi a San Josè (California), insieme alla *Society of Restoration Ecology International* (SER), è stata approvata una dichiarazione congiunta in cui si propone una strategia mondiale volta a mitigare gli effetti del cambiamento climatico sulla base del ripristino ecologico¹² (in inglese *Restoration Ecology*) o rinaturazione¹³, oggi definito come il processo destinato a coadiuvare il risanamento di un ecosistema che è stato degradato, danneggiato o distrutto¹⁴. Individuato come un'attività intenzionale che avvia o accelera la ricostituzione di un ecosistema, per quanto riguarda il suo funzionamento, la sua integrità e la sua sostenibilità, il ripristino ecologico costituisce uno dei molti strumenti che possono essere d'aiuto nell'azione di mitigazione del cambiamento climatico.

Come più volte evidenziato, l'umanità dipende dai servizi forniti dagli ecosistemi terrestri e acquatici: per continuare a usufruire di tali servizi è quindi necessario proteggere e, dove possibile, ripristinare gli ecosistemi stessi.

Per affrontare le problematiche indotte dal cambiamento climatico, il ripristino ecologico offre una speranza nei confronti di due aspetti cruciali: 1) la ricomposizione degli ecosistemi frammentati, che consente ad animali e piante di migrare in risposta ai cambiamenti e agli ecosistemi di ristabilire le proprie strutture e funzioni; 2) la cattura del carbonio tramite il ricostituzione delle foreste, delle zone umide (che facilitano la formazione di torba) e degli altri ecosistemi (che agiscono come *sink* di assorbimento del carbonio [Falk *et al.*, 2007; Egan e Howell, 2007]).

Il grande principio del ripristino ecologico del "Bel Paese" dovrà ispirare il Piano nazionale per l'adattamento al cambiamento climatico, la cui elaborazione dovrebbe essere assunta direttamente dalla Presidenza del Consiglio, alla luce della sua importanza e trasversalità operativa.

Contestualmente, dovrebbe essere da subito avviata una Strategia nazionale per la biodiversità, basata sull'analisi della deframmentazione esistente e delle proposte di connessione e ripristino ecologico; la finalizzazione dei fondi strutturali dell'Unione Europea dovrebbe tenere conto di questi obiettivi e principi; l'applicazione concreta della Direttiva Quadro Acque 2000/60/CE dovrebbe finalmente consentire una gestione integrata della risorsa idrica del nostro Paese, tutelando e ripristinando gli ecosistemi di acque dolci, fondamentali per il nostro futuro.

Inoltre dovrebbe essere correttamente attuata la Direttiva 2001/42/CEE, sulla Valutazione Ambientale Strategica, il cui recepimento costituisce già un riferimento essenziale in Italia per il corretto governo dell'ambiente e del territorio.

¹² Vedasi i siti dell'*Ecological Society of America* <http://www.esa.org> e quello della SER <http://www.ser.org>.

¹³ La rinaturazione è un termine entrato in uso anche nella normativa italiana ed "è intesa come l'insieme degli interventi e delle azioni atte a ripristinare le caratteristiche ambientali e la funzionalità ecologica di un ecosistema in relazione alle sue condizioni potenziali, determinate dalla sua ubicazione geografica, dal clima, dalle caratteristiche geologiche e geomorfologiche del sito e della sua storia naturale pregressa" - Autorità di bacino del fiume Po. Direttiva per la definizione degli interventi di rinaturazione di cui all'art. 36 delle norme del PAI. Linee guida tecnico procedurali per la progettazione e valutazione degli interventi di rinaturazione n. 8/2006 del 5 aprile 2006 - GU del 2.2.2008 serie generale n. 28.

¹⁴ Vedasi: *Society of Restoration Ecology International* (SER), *Primer of Restoration Ecology* <http://www.ser.org>.

BIBLIOGRAFIA

- Aeschimann D., Lauber K., Moser D., Theurillat J.-P. (2004). Flora alpina. Zanichelli, Bologna.
- Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, 2006, Annuario dei dati ambientali 2005-2006, APAT.
- Albert C.H., Thuiller W., Lavorel S., Davis I. D., Garbolino E., Land-use change and subalpine tree dynamics, colonization of *Larix decidua* in French subalpine grasslands. *J. Appl. Ecol.*, 2008, 45, 659-669.
- Anadón R., Danovaro R., Dippner J.W. *et al.*, Impacts of Climate Change on the European Marine and Coastal Environment. *Marine Board Position Paper*, 2007, 9, 84 pp www.esf.org/marineboard
- Anfodillo T., Cambiamenti climatici e dinamica di popolazione al limite superiore del bosco, importanza delle ricerche di lungo termine. *Forest@*, 2007, 4(1), 3-5.
- Araújo M.B., Rahbek C., How does climate change affect biodiversity? *Science*, 2006, 313(5792), 1396-1397.
- Astraldi, M., Bianchi, C.N., Gasparini, G.P. *et al.*, Climatic fluctuations, current variability and marine species distribution, a case study in the Ligurian Sea (north-west Mediterranean). *Oceanological Acta*, 1995, 18, 139-149.
- Aublet J.F., Festa-Bianchet M., Bergero D., Bassano B.. Temperature constraints on foraging behaviour of male Alpine ibex (*Capra ibex*) in summer. *Oecologia*, 2009, 159, 237-247.
- Bakkenes M., Alkemade R.M. *et al.*, Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology*, 2002, 8, 390-407.
- Bartoli M., Viaroli P., Zone umide perfluviali, processi biogeochimici, funzioni ecologiche, problemi di gestione e conservazione. *Biologia Ambientale*, 2006, 20, 43-54.
- Basili, M., Corti, G., Agnelli, A., Cocco, S., Mogliani, L. (2007). Morfologie a *patterned ground* in suoli ben drenati della Majella (Italia Centrale) e loro genesi. Atti Convegno Annuale S.I.S.S., Imola 27-30 Giugno 2006.
- Battisti A., Stastny M., Buffo E., Larsson S., A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 2006, 12, 662-671.
- Battisti A., Stastny M., Netherer S. *et al.*, Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological Applications*, 2005, 15, 2084-2096.
- Battisti C., Romano B., 2008, Frammentazione e connettività, Città Studi Edizioni.
- Beniston M. e Stephenson D.B., Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, 2004, 44, 1-9.
- Bergot M. *et al.*, Simulation of potential range expansion of oak disease caused by *Phytophthora cinnamomi* under climate change. *Global Change Biology*, 2004, 10, 1539-1552.
- Bethoux J.P. e Gentili B., The Mediterranean Sea, coastal and deep-sea signatures of climatic and environmental changes. *Journal of Marine Systems*, 1996, 7, 383-394.
- Béthoux J.P., Durieu de Madron X., Nyffeler F. *et al.*, Deep water in the western Mediterranean, peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences. *Journal of Marine Systems*, 2002, 33-34, 117-131.
- Bethoux J.P., Gentili B., Raunet, J. *et al.*, Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature*, 1990, 347, 660-662.
- Bettinetti R., Crosa G., Galassi S., 2007. Ecologia delle acque interne. CittàStudi Ed., pp. 150.
- Bianchi C.N. e Morri C. (1994) Southern species in the Ligurian Sea (northern Mediterranean), new records and a review. *Bollettino dei Musei e degli Istituti Biologici dell'Università di Genova* 58-59 (1992-1993), 181-197.
- Bianchi C.N. e Morri C., Marine biodiversity of the Mediterranean Sea, situation, problems and prospects for future research. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40, 367-376;
- Bianchi C.N., (1997) Climate change and biological response in the marine benthos. Atti del 12° Congresso dell'Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia, vol. 1, pp. 3-20. AIOL, Genova.
- Bianchi C.N., Biodiversity issues for the forthcoming tropical Mediterranean Sea. *Hydrobiologia*, 2007, 580, 7-21.
- Bianchi C.N., Morri C., Range extension of warm-water species in the northern Mediterranean, evidence for climatic fluctuations? *Porcupine Newsletter*, 1993, 5(7), 156-159.
- Bianchi M., Corani G., Guariso G., Pinto C. Prediction of ungulates abundance through local linear algorithms. *Environmental Modelling and Software*, 2006, 21, 1508-1511.
- Black E. *et al.*, Factors contributing to the summer 2003 European heatwave. *Weather*, 2004, 59, 217-223.
- Boero F. (2001). Adriatic ecological history, a link between jellyfish outbreaks, red tides, mass mortalities, overfishing, mucilages, and thaliacean plankton? CIESM, 2001. Gelatinous Zooplankton Outbreaks, Theory and Practice. CIESM Workshop Monographs, Monaco www.ciesm.org/publications/
- Bonomi C., Rossi G., Bedini G. (2008). A national Italian network to improve seed conservation of wild native species (RIBES). In, Maxted *et al.*, (eds.), Crop wild relative conservation and use. CAB International.
- Both C., Comment on "Rapid Advance of Spring Arrival Dates in Long-Distance Migratory Birds". *Science*, 2007, 315(5812), 598.
- Botkin D.B., Saxe H., Araujo M.B. *et al.*, Forecasting the effects of global warming on biodiversity. *Bioscience*, 2007, 57(3), 227-236.
- Bouchet P., 2006 The magnitude of marine biodiversity. In C.M. Duarte, Editor, The Exploration of Marine Biodiversity. Scientific and Technical Challenges, Fundación BBVA (2006), pp. 31-62.
- Brasier C.M. e Scott J., European oak declines and global warming, a theoretical assessment with special reference to the activity of *Phytophthora cinnamoni* under climate change. *Bull OEPP/EPPO*, 1994, 24, 221-232;

- Buffo E., Battisti A., Stastny M., Larsson S., Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 2007, 9, 65-72
- Canadell J.G., Le Quéré C., Raupach M.R. *et al.*, contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS*, 2007, 0702737104v1-0 su www.pnas.org
- Canals M., Puig P., Durrieu de Madron X. *et al.*, Flushing submarine canyons. *Nature*, 2006, 444, 354-357.
- Carpenter S.R., Pingali P.L., Bennett E.M., Zurek M., (editors), 2005 - Ecosystems and Human Well-being. Scenarios - vol. 2, Island Press;
- Carraro C. (a cura di), 2009, Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia. Una valutazione economica, Il Mulino editore
- Carrer M., Nola P., Eduard J.L., Motta R., Urbinati C., Regional variability of climate-growth relationships in Pinus cembra high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology*, 2007, 95(5), 1072-1083.
- Carril A.F., Gualdi S., Cherchi A., Navarra A., Heatwaves in Europe, areas of homogeneous variability and links with the regional to large-scale atmospheric and SSTs anomalies, 2008, 30, 77-98.
- Cerrano, C., Bavestrello, G., Bianchi *et al.*, A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the Ligurian Sea (North-western Mediterranean), summer 1999. *Ecology Letters*, 2000, 3, 284-293.
- Charlson, R.J., Lovelock, J.E., Andreae, M.O. *et al.*, Oceanic phytoplankton, atmospheric sulfur, cloud albedo and climate. *Nature*, 1987, 326, 655-661.
- Chevaldonne P., Lejeune C., Regional warming-induced species shift in north-west Mediterranean marine caves. *Ecology Letters*, 2003, 6, 371-379
- Chopra K., Leemans R., Kumar P. e Simons H. (editors), 2005 - Ecosystems and Human Well-being. Policy Responses - vol. 3, Island Press;
- Christensen J.H., Carter T.R., Rummukainen M., Amanatidis G., Evaluating the performance and utility of regional climate models, the PRUDENCE project. *Clim. Change*, 2007doi, 10.1007/s10584-006-9211-6.
- CIESM (2002). Alien species introduced by ships in the Mediterranean and black sea. CIESM Workshop Monographs, 20, 136 pp. Monaco www.ciesm.org/publications/
- Collado J. *et al.*, Identification of an endophytic *Nodulosporium* sp. from *Quercus ilex* in central Spain as the anamorph of *Biscogniauxia mediterranea* by rDNA sequence analysis and effect of different ecological factors on distribution of the fungus. *Mycologia*, 2001, 93, 875-886.
- Company, J.B., Puig, P., Sardà, F. *et al.*, Climate influence on Deep Sea Populations. *PLoS ONE*, 2008, 3(1), e 1431 doi, 10.1371/journal.pone.0001431.
- Conti F., Abbate G., Alessandrini A., Blasi C., (2005). An annotated checklist of the Italian vascular flora. Ed. Palombi, Roma.
- Corani G., Gatto M., Structural risk minimization, a robust method for density-dependence detection and model selection. *Ecography*, 2007, 30, 400-416.
- Corona P. *et al.*, Confronto sperimentale tra superfici a ceduo tagliate a raso osservate mediante immagini satellitari ad alta risoluzione e tagliate riscontrate amministrativamente. *Forest@*, 2007, 4(3), 324-332.
- Corpo Forestale dello Stato, 2005, Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi di Carbonio, CFS.
- Costanza R., d'Arge R., deGroot R. *et al.*, The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387, 253-260.
- Cotton P.A., Avian migration phenology and global climate change. *PNAS*, 2003, 100, 12219-12222.
- Crooks K.R. e Sanjayan M. (editors), 2006, Connectivity Conservation, Cambridge University Press e Hilty J.A., Lidicker W.Z. Jr. e Merenlender A.M. (a cura di), 2006, Corridor Ecology. The Science and Practice of Linking Landscapes for Biodiversity Conservation, Island Press. Vedasi,
- Crutzen P., 2005. *Benvenuti nell'Antropocene*. L'uomo ha cambiato il clima, la Terra entra in una nuova era, Mondadori.
- Cubasch U., Hasselmann K., Höck H. *et al.*, Time-dependent greenhouse warming computations with a coupled ocean-atmosphere model. *Climate Dynamics*, 1992, 8, 55-69.
- Cubasch U., Hegerl G.C., Voss R., Waszkewitz J., Crowley T.C., Simulation with an O-AGCM of the influence of variations of the solar constant on the global climate. *Climate Dynamics*, 1997, 13, 757-767.
- Cubasch U., Waszkewitz J., Hegerl G., Perlwitz J., Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Climatic Change*, 1995, 31, 273-304.
- Danovaro R., Dell'Anno A., Fabiano M. *et al.*, Deep-sea ecosystem response to climate changes, the eastern Mediterranean case study. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, 16(9), 505-510.
- Danovaro R., Dell'Anno A., Fabiano M., Pusceddu A., Biodiversity response to climate change in a warm deep sea. *Ecology Letters*, 2004, 7, 821-828.
- Danovaro R., Gambi C., Dell'Anno A. *et al.*, Exponential Decline of Deep-Sea Ecosystem Functioning Linked to Benthic Biodiversity Loss. *Current Biology*, 2008, 18(1), 1-8.
- De Leo G.A., Beffa F., Gatto M., Fiorese G., Gorla A. 2008. Le conseguenze dei cambiamenti climatici sull'uomo, sugli ecosistemi, sul sistema economico, sul turismo, pp. 111-180 In, Progetto Kyoto Lombardia Per vincere la sfida dei cambiamenti climatici e del controllo dei gas serra in Lombardia, ed. Fondazione Lombardia per l'Ambiente (Volume di presentazione dei risultati della ricerca finanziata da Regione Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente, APAT e ERSAF Lombardia e promossa da Regione Lombardia, Fondazione Lombardia per l'Ambiente e ARPA Lombardia).
- Déqué M. *et al.*, An intercomparison of regional climate simulations for Europe, assessing uncertainties in model projections. *Clim. Change*, 2007, doi, 10.1007/s10584-006-9228-x.

- Déqué M., Piedelievre J.P., High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 1995, 11, 321-339.
- Deutch C.A. *et al.*, Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *PNAS*, 2008, 105(18), 6668-6672
- Díaz S., Fargione J., Chapin F.S., Tilman D., Biodiversity Loss Threatens Human Well-Being. *PLoS Biol.*, 2006, 4(8), 1300-1305.
- Díaz-Almela E., Marbà N., Duarte C.M., Consequences of Mediterranean warming events in seagrass (*Posidonia oceanica*) flowering records. *Global Change Biology*, 2007, 13, 224-235.
- Duarte C.M., Agustí S., Kennedy H., Vaqué D., The Mediterranean climate as a template for Mediterranean marine ecosystems, the example of the northeast Spanish littoral. *Progress in Oceanography*, 1999, 44, 245-270.
- Duffy J.E., Stachowicz J.J., Why biodiversity is important to oceanography, potential roles of genetic, species, and trophic diversity in pelagic ecosystem processes. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 311, 179-189.
- Dulcic J., Scordella G., Guidetti P., On the record of the Lessepsian migrant *Fistularia commersonii* (Rüppell, 1835) from the Adriatic Sea. *Journal of Applied Ichthyology*, 2008, 24, 101-102
- Dulcic, J. and Grbec, B. (2000) Climate change and Adriatic ichthyofauna. *Fisheries Oceanography*, 9, 187-191.
- Egan D. e Howell E.A. (eds), 2007, The Historical Ecology Handbook. A Restorationist's Guide to Reference Ecosystems, Island Press.
- Ehrich D., Gaudel M. *et al.*, Genetic consequences of Pleistocene range shifts, contrast between the Arctic, the Alps and the East African mountains. *Molecular Ecology*, 2007, 16, 2542-2559.
- Environmental European Agency, 2004. *Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment. N2/2004*, Copenhagen.
- EPICA Group, Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 2008, 429, 623-628.
- European Environment Agency, 2004, Impacts of Europe's changing climate. An indicator-based assessment, rapporto tecnico EEA n. 2/2004;
- European Environment Agency, 2007a, Climate change and water adaptation issues, rapporto tecnico EEA n. 2/2007;
- European Environment Agency, 2007b, Climate change, the cost of inaction and the cost of adaptation, rapporto tecnico EEA n. 13/2007.
- European Environment Agency, 2005, Vulnerability and adaptation to climate change in Europe, rapporto tecnico n. 7/2005 ;
- Ewel K.C., Cressa C., Kneib R.T. *et al.*, Managing Critical Transition Zones. *Ecosystems*, 2001, 4, 452-460.
- Faluccci A., Maiorano L., Boitani L., Changes in land-use/land-cover patterns in Italy and their implication for biodiversity conservation. *Landscape Ecology*, 2007, 22, 617-631.
- Falk D.A., Palmer M. e Zedler J. (editors), 2006, Foundations of Restoration Ecology. The Science and Practice of Ecological Restoration, Island Press; Aronson J., Milton S., Blignaut J.N. (eds), 2007, Restoring Natural Capital. Science, Business and Practice ,Island Press;
- FAO, 2007.The state of world fisheries and aquaculture (2006). In, Book The state of world fisheries and aquaculture 2006 (Editor ed.^eds.). pp. 162. City, FAO, 162.
- Ficetola F., Thuiller W., Padoa-Schioppa E., From introduction to the establishment of alien species, bioclimatic differences between presence and reproduction localities in the slider turtle. *Diversity and Distributions*, 2009, 15, 108-116
- Fiorese G., Gatto M., Ranci Ortigosa G., De Leo G.A. 2005. Scenari futuri di impatto dei cambiamenti climatici globali tramite l'applicazione di modelli di vocazionalità faunistica a ungulati alpini. Atti del XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, Torino.
- Francour P. *et al.*, Are the Mediterranean waters becoming warmer ? Information from biological indicators. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28, 523-526.
- Francour P., Boudouresque C.F., Harmelin J.G. *et al.*, Are the Mediterranean waters becoming warmer? Information from biological indicators. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28, 523-526.
- Fredj G., Bellan-Santini D., Menardi M., Etat des connaissances sur la faune marine mediterraneenne. *Bulletin de l'Institut Oceanographique de Monaco*, 1992, 9, 133-145;
- Frei C. *et al.*, Future change of precipitation extremes in Europe, Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111, D06105, doi, 10.1029/2005JD005965.
- Freppaz M., Williams B.L., Edwards A.C., Scalenghe R., Zanini E., Simulating soil freeze/thaw cycles typical of winter alpine conditions, implications for N and P availability. *Applied Soil Ecology*, 2007, 35, 247-255.
- Galen C., Stanton M.L., Short-term responses of alpine buttercups to experimental manipulation of growing-season length. *Ecology*, 1995, 74, 1052-1058.
- Galil B.S., (1993) Lessepsian migration, new findings on the foremost anthropogenic change in the Levant basin fauna. In Symposium Mediterranean Seas 2000, ed. N. F. R. Della Croce, pp. 307-323. University of Genova, Istituto di Scienze Ambientali Marine, Santa Margherita Ligure.
- Garrabou J., Perez T., Sartoretto S., Harmelin J.G., Mass mortality event in red coral *Corallium rubrum* populations in the Provence region (France, NW Mediterranean). *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 217, 263-272.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N. E. Tree line shift in the Swiss Alps, climate change or land abandonment? *J. Veg. Sci.*, 2007, 18, 571-582.
- Gerdol R., Stanisci A., Tomaselli M. (2008). La vegetazione delle montagne italiane. CAI. pp. 387.

- Giaccone G., L'origine della biodiversità vegetale del Mediterraneo. *Notiziario della Società Italiana di Biologia Marina*, 1999, 35, 35-51.
- Gibelin A-L, Déqué M., Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 2004, 20, 327-339.
- Giorgi F., Bi X., Pal J.S., Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II. Climate change scenario (2070-2100). *Climate Dynamics*, 2004b, 23, 839-858.
- Giorgi F., Mearns L.O., Introduction to special section, regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, 1999, 104, 6335-6352.
- Global Carbon Project, 2008, Carbon budget and trends 2007, <http://www.globalcarbonproject.org>
- Global Land Project <http://www.globallandproject.org>
- Gottfried M., Pauli H. *et al.*, A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming. *Diversity Distribution*, 1999, 5, 241-251.
- Grabherr G. Gottfried M. *et al.*, (2001). Aspects of global change in the Alps and in the high arctic region. Long-term monitoring of mountain peaks in the Alps. In, Burga C.A. and Kratochwil A. (eds) *Biomonitoring, General and Applied Aspects on Regional and Global Scales*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 153-177.
- Grabherr G., Gottfried M., Pauli H., Climate effects on mountain plants. *Nature*, 1994, 369, 448.
- Gualdi S., Guilyardi E., Navarra A. *et al.*, The interannual variability in the tropical Indian Ocean as simulated by a CGCM. *Climate Dynamics*, 2003, 20, 567-582.
- Guidetti P., Boero F., Dulcic J. Mass mortality of gilt sardine, *Sardinella aurita* (Clupeidae), in the Adriatic and Ionian seas. *Cybiurn*, 2002, 26, 317-319.
- Guidetti P., Boero F., Occurrence of the Mediterranean parrotfish *Sparisoma cretense* (L.) (Perciformes, Scaridae) in south-eastern Apulia (SE Italy). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 2001, 81, 717-719.
- Guisan A., Theurillat J.P., Assessing alpine plant vulnerability to climate change, a modeling perspective. *Integrated Assessment*, 2001, 1, 307-320.
- Hansen L.J., Biringer J.L., Hoffman J.R. (eds.), 2003, *Buying Time, A User's Manual for Building Resistance and Resilience to Climate Change in Natural Systems*, WWF International.
- Hari R.E., Livingstone D.M., Siber R. *et al.*, Consequences of climatic change for water temperature and brown trout population in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, 2006, 12, 10-26.
- Harmelin J.G., d'Hont J.L., Transfers of bryozoan species between the Atlantic Ocean and the Mediterranean Sea via the Strait of Gibraltar. *Oceanologica Acta*, 1993, 16(1), 63-72.
- Hassan R., Scholes R. e Ash N. (editors), 2005 - *Ecosystems and Human Well-being. Current State and Trends - vol. 1*, Island Press;
- Hawksworth D.L., Kalin-Arroyo M.T., 1995. Magnitude and distribution of biodiversity. In *Global Biodiversity Assessment* (ed. Heywood, V. H.) pp. 107-191 (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1995).
- Huelber K., Gottfried M., Pauli H., Reiter K., Winkler M., Grabherr G. (2006). Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Central Alps, implications for climate warming.
- Hughes L.L., Biological consequences of global warming, is the signal already apparent? *Trends in Ecology and Evolution*, 2000, 15(2), 56-61.
- Inouye D.W., Effects of climate change on phenology, frost damage and floral abundance of montane wildflowers. *Ecology*, 2008, 89, 353-362.
- International Energy Agency, 2007. *Key world energy statistics*, Parigi.
- IPCC, 2000, *Special Report on Emissions Scenarios*, IPCC.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007, Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, Working Group II, 2001, *Climate Change 2001, Impacts, adaptation and vulnerability, volume II* Cambridge University Press
- Jacobson A.R., Provenzale A., von Hardenberg A. *et al.*, Climate forcing and density dependence in a mountain ungulate population. *Ecology*, 2004, 85(6), 1598-1610.
- Jonzén N., Lindén A., Ergon T. *et al.*, Rapid Advance of Spring Arrival Dates in Long-Distance Migratory Birds. *Science*, 2006, 312(5782), 1959-1961.
- Kamburska L., Fonda-Umani, S. Copepod Dynamics in the Gulf of Trieste (Northern Adriatic Sea). *Recent Changes and Trends. Climate Research*, 2006, 31, 195
- Körner C., Arctic and Alpine Biodiversity, Pattern, Causes and Ecosystem Consequence. *Ecological Studies*, 2004, 113, 167-181.
- Kozlov M.V., Losses of birch foliage due to insect herbivory along geographical gradients in Europe, a climate-driven pattern? *Climatic Change*, 2008, 87(1-2), 107-117.
- La Quere C. *et al.*, Saturation of the Southern Ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, 2007, 316(5832), 1735-1738
- Lawler J. *et al.*, Projected climate-induced faunal change in the Western Hemisphere. *Ecology*, 2009, 90(3), 588-597.
- Leemans R., Eickhout B., Another reason for concern, regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. *Global Environmental Change*, 2004, 14, 219-228.

- Leemans R., van Vliet A., 2004. Extreme weather, Does nature keep up? Observed responses of species and ecosystems to changes in climate and extreme weather events, many more reasons for concern. Report Wageningen University and WWF Climate Change Campaign.
- Likens G.E., Beyond the shoreline, a watershed ecosystem approach. *Verh. Internat. Verein. Theoret. Angew. Limnol.*, 1984, 22, 1-22.
- Lionello P., Boldrin U., Giorgi F., Future changes in cyclone climatology over Europe as inferred from a regional climate simulation, *Climate Dynamics*, 2008, 30, 657-671.
- Lüthi D., Le Floch M., Bereiter B. *et al.*, High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, 2008, 453, 379-382.
- MacKenzie B.R. *et al.*, Daily ocean monitoring since the 1860s shows record warming of northern European seas. *Global Change Biology*, 2007, 13(7), 1335-1347.
- Manabe, T.R. Knutson, R.J. Stouffer and T.L. Delworth., Exploring natural and anthropogenic variations of climat. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2001, 127, 1-24.
- 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. *J. Climate*, 2002, 15, 1674-1690.
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being, Biodiversity Synthesis*. World Resources Institute, Washington, DC.
- Meehl G.A., Washington W.M., Arblaster J.M., Hu A., Factors affecting the Climate Sensitivity in Coupled General Circulation Models. *J. Climate*, 2004, 17, 1584-1596.
- Menzel A. *et al.*, European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global Change Biology*, 2006, 12(10), 1969-1976.
- Molinero J-C., Ibanez F., Nival P., Buecher I., Souissi S., North Atlantic climate and northwestern Mediterranean plankton variability. *Limnology Oceanography*, 2005, 50(4), 1213-1220.
- Mooij W.M., Hülsmann S., De Senerpont Domis L.N. *et al.*, The impact of climate change on lakes in the Netherlands, a review. *Aquatic Ecology*, 2005, 39, 381-400.
- Moreno J.M., 2005, Impacts on natural hazards of climatic origin- forest fires risk. In , A preliminary general assessment of the impacts in Spain due to the effects of climatic change, Ministerio de Meio Ambiente, Spain.
- Mosier A., Syers J.K., Freney J.R. (eds.), 2004. *Agriculture and the Nitrogen Cycle, Assessing the Impacts of Fertilizer Use*, Island Press.
- Motta R., Nola P., Growth trends and dynamics in sub-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piemont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *J. Veg. Sci.*, 2001, 12, 219-230.
- Myers N., Mittermeier R.A., Mittermeier C.G., da Fonseca G.A.B., Kent J., Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403, 853-858.
- Naciri Y., Gaudeul M., Phylogeography of the endangered *Eryngium alpinum* L. (*Apiaceae*) in the European Alps. *Molecular Ecology*, 2007, 16, 2721-2733.
- Nagy L., Grabherr G. *et al.*, (2003). Alpine biodiversity in Europe. Springer, Heidelberg.
- Nardini A., Sansoni G. (eds), 2006. La riqualificazione fluviale in Italia. CIRF (Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale), pp. 832.
- Occhipinti-Ambrogi A., Transfer of marine organisms, a challenge to the conservation of coastal biocoenoses. *Aquatic Conservation, Marine and Freshwater Ecosystems*, 2001, 11, 243-251.
- Organizzazione delle Nazioni Unite, 2007. *World Population Prospects, The 2006 Revision*, Department of Economic and Social Affairs, ST/ESA/SER.A/261/ES, New York.
- Ozenda P., Borel J.L., 1995, Possible responses of mountain vegetation to a global climatic change, the case of Western Alps. In, Guisan A. *et al.*, (a cura di), Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian mountains, Ed. Conserv. Jard. Bot. Geneve, pp. 137-144.
- Papale D. *et al.*, 2005, Assessment of full carbon budget of Italy, the CarbiUS project, Fourth Annual Conference on Carbon Capture & Sequestration, Alexandria, Virginia, 2-5 maggio;
- Papale D., Il Progetto CARBOITALY, una rete nazionale per la misura dei sink forestali e agricoli italiani e lo sviluppo di un sistema di previsione dell'assorbimento dei gas serra. *Forest@*, 2006, 3(2), 165-167 [online <http://www.sisef.it/>]
- Parmesan C., Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 2006, 37, 37-669.
- Parmesan C., Ryrholm N., Stefanescu C. *et al.*, Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 1999, 399, 579-583.
- Parmesan C., Yohe G., A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural system. *Nature*, 2003, 421, 37-42;
- Parolo G., Rossi G., Ferrarini A., Toward improved predictions of species distributions by handling overlooked topics. Arnica montana in the Alps as a case study. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45, 1410-1418
- Parry M., Palutikof J., Hanson C., Lowe J., Squaring up to reality. *Nature reports to climate change*, 2008, 2, 68-70.
- Pauli H., Gottfried M. *et al.*, Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps, observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. *Global Change Biology*, 2007, 13, 147-156.
- Pedrotti L., Tosi G. 1996. Progetto Stambecco Adamello. Studio di fattibilità e progettazione. Regione Lombardia, Servizio tutela ambiente naturale e parchi.

- Peixoto J.P., De Almeida M., Rosen R.D., Salstein D.A., Atmospheric moisture transport and the water balance of the Mediterranean Sea. *Water Resour. Res.*, 1982, 18, 83-90.
- Pendlebury C.J., MacLeod M.G., Bryant D.M., Variation in temperature increases the cost of living in birds. *Journal of Experimental Biology*, 2004, 207, 2065-2070.
- Peñuelas J., Filella I., 2001. Phenology, Responses to a Warming World. *Science*, 294 (5543), 793-795.
- Petit J.R. *et al.*, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 1999, 399, 429-436.
- Petriccione B. (). Short-term changes in key plant communities of Central Apennines (Italy). *Acta Botanica Gallica*, 2005, 152.
- Pettorelli N., Pelletier F., von Hardenberg A. *et al.*, Early onset of vegetation growth vs. rapid green-up, Impacts on juvenile mountain ungulates. *Ecology*, 2007, 88, 381-390.
- Pezzi, Ferrari, Mercalli (2004). Pattern spaziale del limite superiore del bosco nell'Appennino settentrionale e sue correlazioni con dati termici. In Ecologia. Atti del XIV Congresso Nazionale della Società Italiana di Ecologia (Siena, 4-6 ottobre 2004).
- Pignatti S., Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla biodiversità forestale. *Silvae (Corpo Forestale dello Stato)*, 2007, 8, 145-150
- Pimentel D., Zuniga R., Morrison D., Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*, 2005, 52, 273-288.
- Pinto J.G., Spanghel T., Ulbrich U., Speth P., Assessment of winter cyclone activity in a transient ECHAM4-OPYC3 GHG experiment. *Meteorol. Z.*, 2006, 15, 279-291.
- Randin C., Dirnböck T. *et al.*, Are niche-based species distribution models transferable in space? *Journal of Biogeography*, 2006, 33, 1689-1703.
- Reid W., Berkes F. e Wildbanks T. (a cura di), 2006 - Bridging Scales and Knowledge Systems. Concepts and Applications in Ecosystem Assessment - Island Press.
- Romano J.C., Bensoussan N., Younes W.A.N., Arhac, D., Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés? *C. R. Acad. Sci. Paris, Sci. Vie*, 2000, 323, 415-427.
- Root T.L., Price J.T., Hall K.R. *et al.*, Fingerprints of global warming on wild animals and plants. *Nature*, 2003, 421, 57-60.
- Rosenzweig C. *et al.*, Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 2008, 453, 353-357.
- Rossi G., Bonomi C., Bedini G., Conservazione ex situ della flora spontanea italiana, RIBES, una nuova iniziativa nazionale. *Inform. Bot. Ital.*, 2006, 38 (1) 236-247.
- Rossi G., Parolo G., Dellavedova R. (2004). Gli organismi vegetali come bioindicatori dei cambiamenti climatici, il progetto GLORIA. Atti del convegno "Acque a Cremona" - Museo civico di Storia Naturale di Cremona, 81-94.
- Roth T.L. *et al.*, Fingerprints of global warming on wild animals e plants. *Nature*, 2003, 421, 57-60.
- Rowell D., Richard J., Causes and uncertainty of future summer drying over Europe. *Climate Dynamics*, 2006, 27, 281-299.
- Rowell D.P., A scenario of European climate change for the late 21st century, seasonal means and interannual variability. *Climate Dynamics*, 2005, 25, 837-849.
- Rummukainen M. *et al.*, The Swedish Regional Climate Modelling Programme, SWECLIM, a review. *Ambio*, 2004, 33, 176-182.
- Russo A., Rabitti S., Bastianini M., Decadal Climatic Anomalies in the Northern Adriatic Sea Inferred from a New Oceanographic Data Set. *PSZNI Marine Ecology*, 2002, 23, 340-351.
- Sala O.E., Chapin III F.S., Armesto J.J. *et al.*, Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, 2000, 287, 1770-1774.
- Schär C. *et al.*, The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 2004, 427, 332-336.
- Schönswetter, P., Tribsch A. *et al.*, Disjunctions in relict alpine plants, phylogeography of *Androsace brevis* and *A. wulfeniana* (Primulaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society*, 2003, 141, 437-446.
- Schröter D., Cramer W., Leemans R. *et al.*, Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe. *Science*, 2005, 310(5752), 1333-1337.
- Siegenthaler U., Stocker T.F., Monnin E. *et al.*, Stable carbon cycle-climate relationship during the late Pleistocene. *Science*, 2006, 310, 1313-1317.
- Sirca C., Spano D., Pisanu P. *et al.*, (2006). Ichnusa Fire Index, Development and Preliminary Evaluation at Local Scale. V International Conference on Forest Fire Research. Figueira da Foz, Portugal, 27-30 November 2006.
- Skov F, Svenning J.C., Potential impact of climatic change on the distribution of forest herbs in Europe. *Ecography*, 2004, 27, 366-380.
- Smith P., Martino D., Cai Z. *et al.*, 2007. Agriculture. In Climate Change 2007, Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Solomon S. *et al.*, Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS*, 2009, 106(6), 1704-1709.

- Spano D., Georgiadis T., Duce P. *et al.*, (2003) A fire risk index for Mediterranean vegetation based on micrometeorological and ecophysiological measurements. 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology, Orlando, FL, USA, 16-20 November 2003;
- Stanisci A., Pelino G., Guisan A. (2006). Cambiamenti climatici ed effetti sulla flora d'alta quota nel parco nazionale della Majella. Atti del Convegno "Biodiversità vegetale delle aree protette in Abruzzo, studi ed esperienze a confronto", Documenti tecnico-scientifici del Parco Nazionale della Majella, 192-209.
- Stanisci A., Pelino G. *et al.*, (). Vascular plant diversity and global change in central Apennine (Italy). *Biodiversity and Conservation*, 2005, 14, 1301-1318.
- Stehlik, I., Schneller J.J. *et al.*, (). "Immigration and in situ glacial survival of the low-alpine *Erinus alpinus* (Scrophulariaceae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 2002, 77, 87-103.
- Tapiador F.J., Sánchez E., Changes in the European Precipitation Climatologies as Derived by an Ensemble of Regional Models. *J. Climate*, 2008, 21, 2540-2557.
- Tewksbury J.J. *et al.*, Putting the heat on tropical animals. *Science*, 2008, 320 (5881), 1296-1297;
- Theurillat J.-P., Guisan A., Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps, a review. *Climatic Change* 2001, 50, 77-109.
- Theurillat J.-P., Iocchi M., Cutini M., De Marco G. Vascular plant richness along elevation gradient at Monte Velino (Central Apennines, Italy). *Biogeographia*, in stampa.
- Thomas C.D., Cameron A., Green R.E. *et al.*, Extinction risk from climate change. *Nature*, 2004, 427, 145-148.
- Thuiller W., BIOMOD - optimizing predictions of species distribution and projecting potential future shifts under global change. *Global Change Biology*, 2003, 9, 1353-1362.
- Thuiller W., Climate change and the ecologist. *Nature*, 2007, 448, 550-552.
- Thuiller W., Lavorel S., Araújo M.B. *et al.*, Climate change threats to plant diversity in Europe. *PNAS*, 2005, 102(23), 8245-8250.
- Tortonese E., 1985, Distribution and ecology of endemic elements in the Mediterranean fauna (fishes and echinoderms). In, Mediterranean Marine Ecosystems, eds. M. Moraitou-Apostolopoulou and V. Kiortsis, pp. 57-83. Plenum Press, New York;
- UNEP - United Nations Environment Program, 2007. Global Environment Outlook. [online] URL, <http://www.unep.org/geo/geo4/media/>
- Valero F., Luna M.Y., Martín M.L. *et al.*, Coupled modes of large-scale climatic variables and regional precipitation in the western Mediterranean in autumn, 2004, 22, 307-323.
- Vannini A., Valentini R., Influence of water relation on *Quercus cerris* - *Hypoxylon mediterraneaum* interactions, a model of drought induced susceptibility to a weakness parasite. *Tree Physiology*, 1994, 14, 129-139.
- Velez R., 2000, Las quemas incontrolada como causa de incendios forestales. In, Vega Hidalgo J.A. e Velez Munoz R. (a cura di), Actas de la reunion sobre quemas prescritas, Cuadernos de la Sociedad Espanola de Ciencias Forestales, 9, 13-27.
- Vettraino A.M. *et al.*, Occurrence and distribution of *Phytophthora* species in European chestnut stands and their association with Ink Disease and crown decline. *European Journal of Plant Pathology*, 2005, 111, 169-180.
- Viaroli P., Bartoli M., Rossetti G., Ferrari I., 2008. Recupero, conservazione e adattamento del sistema ecologico padano. Atti Congresso Nazionale "Il Po, una risorsa per l'Italia", Piacenza, 23-24 novembre 2007, in stampa.
- Vittoz P., Bodin J., Ungricht S., Burga C., Walther G.-R., One century of vegetation change on Isla Persa, a nunatak in the Bernina massif in the Swiss Alps. *Journal of Vegetation Science*, 2008a, 19, 671-680.
- Vittoz P., Rulence B., Largey T., Freléchoux F., Effects of climate and land-use change on the establishment and growth of cembra pine (*Pinus cembra* L.) over the altitudinal treeline ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic Antarctic Alpine Res.*, 2008b, 40, 225-232.
- Walther G.R. *et al.*, Ecological response to recent climate change. *Nature*, 2002, 416, 389-395.
- Walther G.-R., Beissner S. *et al.*, Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science*, 2005, 16, 541-548.
- Walther G.-R., Post E., Convey P. *et al.*, Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 2002, 416, 389-395.
- Wilby R. L., Wigley T.M.L., Conway D. *et al.*, Statistical downscaling of general circulation model output, A comparison of methods. *Water Resour. Res.*, 1998, 34, 2995-3008.
- Williams J.W. *et al.*, Projected distributions of novel and disappearing climates by 2100 AD. *PNAS*, 2007, 104(14), 5738-5742.
- Wilson, R.W., Millero, F.J., Taylor *et al.*, Contribution of Fish to the Marine Inorganic Carbon Cycle. *Science*, 2009, 323, 359-362.
- Wolf A. *et al.*, Impact of non-outbreak insect damage on vegetation in northern Europe will be greater than expected during a changing climate. *Climatic Change*, 2008, 87(1-2), 91-106.
- Zachos J.C., Dickens G.R., Zeebe R., An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics, *Nature*, 2008, 451, 279-283
- Zalewski M., Ecohydrology - the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources. *Hydrol. Sci. Bull.*, 2002, 47, 823-832.
- Zanchettin D. *et al.*, Po River discharge. A preliminary analysis of a 200 year time series. *Climatic Change*, 2008, 89, 411-433.
- Zibrowius, H., Ongoing modification of the Mediterranean marine fauna and flora by the establishment of exotic species. Mesogeae,

VERSO LA STRATEGIA NAZIONALE PER LA BIODIVERSITÀ

Nell'ambito del Protocollo di Intesa per lo sviluppo della Conservazione Ecoregionale della Biodiversità, stipulato tra il WWF Italia Onlus e il Ministero dell'Ambiente e, della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), è stato promosso e avviato il progetto dal titolo: "Verso la Strategia Nazionale per la Biodiversità: i contributi della Conservazione Ecoregionale".

Nell'ambito di tale progetto il WWF Italia Onlus ha coordinato otto tavoli tecnici, cui hanno partecipato esperti provenienti dal mondo accademico e scientifico, in cui sono state affrontate tematiche rilevanti per la conservazione della biodiversità.

Gli esiti dei tavoli tecnici, riassunti nei documenti finali oggetto di questa pubblicazione, rappresentano la posizione dei partecipanti ai tavoli e non costituiscono la posizione ufficiale del MATTM.

Le tematiche affrontate dagli 8 tavoli sono state:

- **Studio e analisi delle forme di coesistenza e criticità tra sviluppo economico-sociale e conservazione della natura. Ruolo dei processi partecipati.**
- **Il ruolo dell'informazione e della comunicazione come fattori di facilitazione nei processi di condivisione delle strategie decisionali.**
- **L'impatto delle specie aliene sugli ecosistemi: proposte di gestione.**
- **Cambiamenti climatici e biodiversità. Studio della mitigazione e proposte per l'adattamento.**
- **Ecoregioni, biodiversità e governo del territorio. La pianificazione d'area vasta come strumento di applicazione dell'approccio ecosistemico**
- **Turismo e biodiversità: opportunità e impatti sulla biodiversità.**
- **Definizione del metodo per la classificazione e quantificazione dei servizi ecosistemici in Italia.**
- **Tutela delle specie migratrici e dei processi migratori.**

Tutti i materiali relativi al progetto "*Verso la Strategia Nazionale per la Biodiversità: I contributi della Conservazione Ecoregionale*" sono scaricabili dal sito <http://www.minambiente.it>, nella sezione "Biodiversità: flora e fauna".

PROGETTO MATTM – WWF ITALIA ONLUS

"Verso la Strategia Nazionale per la Biodiversità: I contributi della Conservazione Ecoregionale"

Marzo 2009

