



Università degli Studi di Sassari



**SCUOLA DI DOTTORATO DI RICERCA**  
**Scienze dei Sistemi Agrari e Forestali**  
**e delle Produzioni Alimentari**

Indirizzo Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali

Ciclo XXII

**Valutazione del rischio legato ai cambiamenti climatici per il  
frumento duro**

dr. Roberto Ferrise

*Direttore della Scuola:* Prof. Giuseppe Pulina  
*Referente di Indirizzo* Prof. Donatella Spano  
*Docente Guida* Prof. Marco Bindi

Anno accademico 2009- 2010

*...ai miei amici*

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

# Indice

<b>1. Introduzione</b> .....	<b>4</b>
1.1    Il cambiamento del clima.....	4
1.1.1    Il quarto rapporto dell'IPCC.....	4
1.1.2    Le cause del cambiamento climatico.....	8
1.1.3    Le previsioni per il futuro.....	14
1.1.4    La valutazione degli impatti.....	16
1.2    Il frumento duro.....	26
1.2.1    Morfologia del frumento.....	26
1.2.2    Fenologia del frumento.....	26
1.2.3    Esigenze Ambientali.....	28
1.3    Obiettivi del lavoro.....	32
<b>2. Materiali e metodi</b> .....	<b>33</b>
2.1    L'area di studio.....	33
2.2    Dati climatici.....	35
2.2.1    Periodo Presente.....	35
2.2.2    Dati probabilistici per il futuro.....	35
2.3    Il modello di impatto.....	39
2.3.1    Il Modello Sirius.....	39
2.4    Calibrazione e validazione di SIRIUS.....	49
2.4.1    Calibrazione di SIRIUS per una varietà generica di frumento duro.....	50
2.4.2    Validazione di SIRIUS a scala regionale.....	51
2.5    Sviluppo di un emulatore del modello di impatto.....	52
2.5.1    Le reti neurali.....	52
2.5.2    Preparazione del dataset per l'allenamento.....	53
2.5.3    L'allenamento della rete neurale.....	56
2.5.4    Validazione della rete neurale.....	57
2.6    Creazione delle superfici di risposta.....	59
2.7    La determinazione del rischio climatico.....	61
<b>3. Risultati</b> .....	<b>62</b>
3.1    Il clima nell'area di studio.....	62

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

3.1.1	Il clima presente .....	62
3.1.2	Il clima futuro .....	64
3.2	Calibrazione e validazione di SIRIUS e della ANN .....	69
3.2.1	Calibrazione di SIRIUS per un varietà generica .....	69
3.2.2	Validazione di SIRIUS a scala regionale .....	71
3.2.3	Validazione della ANN .....	72
3.3	Distribuzione delle rese per il periodo presente.....	74
3.4	Un caso studio: una cella in Toscana .....	76
3.5	Il rischio climatico nel bacino del Mediterraneo .....	83
<b>4.</b>	<b>Discussioni .....</b>	<b>104</b>
<b>5.</b>	<b>Conclusioni .....</b>	<b>115</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografia.....</b>	<b>117</b>

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

# 1. Introduzione

La conoscenza del clima è sempre stata molto importante per l'uomo, poiché è da esso che dipendono le attività umane e, più in generale, la vita sulla terra. Nell'ultimo secolo è stato dimostrato che le attività umane stanno modificando la composizione dell'atmosfera e, conseguentemente, il clima, tanto a scala globale quanto regionale, sta cambiando con essa. Il cambiamento climatico sta già influenzando i sistemi naturali e antropizzati, e gli scenari previsti per il futuro indicano che questi impatti tenderanno ad aumentare, in particolar modo se le emissioni antropiche di gas serra continueranno ad innalzarsi incontrollatamente.

## 1.1 Il cambiamento del clima

Nel 1988 l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO) e l'Agenzia delle Nazioni Unite per l'Ambiente (UNEP) hanno istituito un Panel scientifico intergovernativo sui cambiamenti climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) per valutare le informazioni scientifiche disponibili, esaminare gli impatti sociali ed economici delle modificazioni del clima e formulare strategie adeguate per la prevenzione e il controllo degli stessi. L'attività principale dell'organizzazione è la realizzazione periodica di valutazioni esaustive e aggiornate delle informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche rilevanti per la comprensione dei mutamenti climatici indotti dall'uomo, degli impatti potenziali dei cambiamenti e delle alternative di mitigazione e adattamento disponibili per le politiche pubbliche

### 1.1.1 *Il quarto rapporto dell'IPCC*

Sin dal suo primo rapporto (1990) l'IPCC ha rilevato un progressivo aumento della temperatura superficiale del pianeta che ha attribuito prevalentemente all'aumento della concentrazione atmosferica dei cosiddetti gas a effetto serra.

Nel 2007, l'IPCC ha pubblicato il quarto rapporto di valutazione sui cambiamenti climatici (AR4). Sulla base delle evidenze scientifiche raccolte, nell'AR4 viene riportato che il riscaldamento globale è ormai un fenomeno inequivocabile, testimoniato dalle numerose osservazioni riguardo l'innalzamento della temperatura media globale

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

dell'atmosfera e degli oceani, la riduzione dei ghiacciai e delle coperture nevose e l'innalzamento del livello dei mari (Figura 1.1).

Sulla base delle più recenti osservazioni, nell'ultimo secolo (1906-2005) la temperatura media superficiale del pianeta è aumentata di circa  $0.74^{\circ}\text{C}$ , con un tasso di incremento medio decennale, negli ultimi 50 anni, di circa  $+0.13^{\circ}\text{C}$  (quasi doppio rispetto a quello relativo all'intero secolo) (Trenberth et al., 2007).

L'incremento di temperatura ha interessato l'intero pianeta, ma risulta maggiormente concentrato nell'emisfero settentrionale; in particolare, negli ultimi cento anni, la temperatura media sull'Artico risulta cresciuta ad un ritmo doppio rispetto a quella osservata sull'intero pianeta (Brohan et al., 2006). Diversamente da quanto riportato nel terzo rapporto (TAR), nuove osservazioni effettuate con palloni aerostatici e misure da satellite hanno dimostrato che il riscaldamento ha interessato anche gli strati medi e alti della troposfera in cui la temperatura risulta cresciuta di pari passo con quella superficiale (Trenberth et al., 2007). L'incremento di temperatura non è stato limitato all'atmosfera ma ha anche interessato i mari e gli oceani. Le osservazioni disponibili dal 1961 hanno evidenziato che la temperatura media degli oceani, che hanno assorbito circa l'80% del calore aggiunto al sistema climatico, è aumentata fino ad una profondità di circa 3000 metri (Bindoff et al., 2007).

Consistentemente con il riscaldamento globale, sono state osservate riduzioni nella estensione delle coperture nevose e dei ghiacciai montani in ambedue gli emisferi. Dal 1900, l'area coperta stagionalmente da terreno ghiacciato nell'emisfero settentrionale è diminuita mediamente di circa il 7% (Zhang et al., 2004). Dai dati da satellite disponibili è stato verificato che dal 1978 l'estensione dei ghiacci sul mare Artico è diminuita ad un tasso del 2.7% per decennio (Comiso, 2003).

Lo scioglimento dei ghiacci e della copertura nevosa insieme all'espansione termica dovuta all'aumento di temperatura, ha contribuito all'innalzamento del livello medio dei mari che è cresciuto ad un tasso di circa 1.8mm all'anno nel periodo 1961-2003 (Bindoff et al., 2007). Dal 1993 sono disponibili misure più accurate provenienti dall'uso delle rilevazioni satellitari integrate con i dati forniti dai mareografi. Sulla base di queste misurazioni, dal 1993 al 2006, il livello dei mari risulta aumentato con un tasso di 3.1 mm annui (Cazenave e Nerem, 2004). Non è ancora del tutto chiaro se un tale aumento sia da attribuirsi alla naturale variabilità decennale o al fenomeno del riscaldamento globale,

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

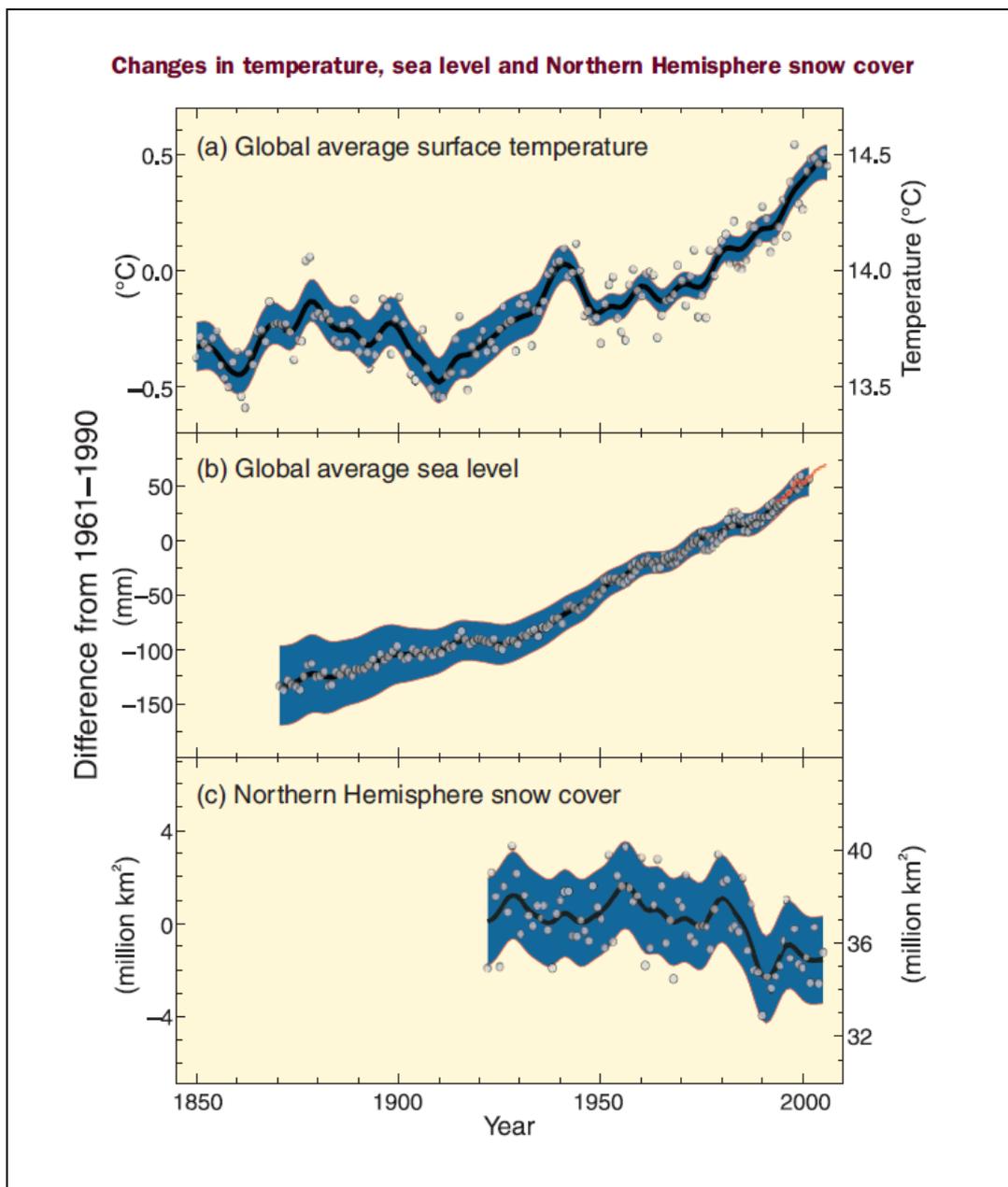
tuttavia, la somma dei singoli contributi climatici (espansione termica, scioglimento dei ghiacci, etc...) spiega quasi totalmente il tasso totale di innalzamento registrato in questo periodo. L'innalzamento del livello medio del mare nel periodo 1993-2003 viene attribuito per il 51.6% all'espansione termica, per il 24.8% allo scioglimento dei ghiacci e della copertura nevosa e per il 13.6% allo scioglimento delle calotte polari (Bindoff et al., 2007).

A queste osservazioni su scala globale si associano fenomeni di cambiamento di lungo termine anche a scala continentale, e regionale che comprendono variazioni delle temperature e dell'estensione dei ghiacci, delle quantità delle precipitazioni, della salinità degli oceani, delle strutture dei venti e delle tipologie di eventi estremi quali siccità, forti precipitazioni, ondate di calore e intensità dei cicloni tropicali (Trenberth et al., 2007).

Le precipitazioni hanno un'elevata variabilità spazio-temporale e in alcune regioni del pianeta i dati disponibili sono piuttosto limitati, tuttavia, dal 1900, sono state rilevate delle tendenze di lungo periodo su vaste aree, con incrementi significativi osservati nel Nord Europa, in Asia Settentrionale e lungo il versante orientale del Nord e Sud America, mentre una maggiore tendenza alla siccità è stata rilevata nel Sahel, nel Mediterraneo, nell'Africa meridionale e in alcune zone dell'Asia meridionale (Trenberth et al., 2007.). La frequenza degli eventi di forte precipitazione è aumentata nella maggior parte delle terre emerse, in linea con il riscaldamento globale e con gli aumenti osservati di vapore acqueo nell'atmosfera (Trenberth et al., 2007). La salinità degli oceani risulta diminuita alle medie e alte latitudini mentre è aumentata alle basse latitudini suggerendo un cambiamento nella distribuzione delle precipitazioni e dell'evaporazione sugli oceani (Bindoff et al., 2007).

Negli ultimi 50 anni sono stati osservati ampi cambiamenti delle temperature estreme. Le ondate di calore (giorni consecutivi con temperature elevate, accompagnati da umidità elevata) sono sempre più frequenti così come il numero di giorni e notti calde (numero di giorni con temperature, rispettivamente, massime e minime superiori al 90° percentile della distribuzione di lungo periodo). A partire dagli anni 70, ci sono evidenze di eventi siccitosi più lunghi e più intensi, in aree sempre più estese, particolarmente nelle zone tropicali e sub-tropicali. Tali variazioni sono attribuibili all'aumento dei periodi secchi unitamente alle alte temperature e alle riduzioni delle precipitazioni. Anche i cambiamenti della temperatura superficiale degli oceani, delle strutture dei venti e la diminuzione del manto nevoso sembrano collegati. A partire dagli anni 60 i venti occidentali alle medie latitudini risultano intensificati in entrambi gli emisferi (Trenberth et al., 2007).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 1.1: Cambiamenti osservati in (a) temperatura media superficiale, (b) livello medio dei mari e (c) copertura nevosa (Marzo-Aprile) nell'emisfero settentrionale. Tutte le differenze sono calcolate rispetto al trentennio 1961-90. Le linee sono la media mobile decennale, mentre i punti mostrano i valori annuali. L'area in blu rappresenta l'intervallo di incertezza delle osservazioni. (fonte: IPCC AR4)**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### **1.1.2 Le cause del cambiamento climatico**

Il clima sulla Terra è il risultato dello stato di equilibrio tra il flusso di energia in entrata, quasi esclusivamente proveniente dal Sole, e quello in uscita, costituito dalla radiazione solare riflessa e da quella emessa o irraggiata dalla Terra nel suo insieme (Figura 1.2). Nel 1992 la *Framework Convention on Climate Change* delle Nazioni Unite (FCCC) definisce il sistema climatico come “l’insieme dell’atmosfera, dell’idrosfera, della criosfera, della geosfera e della biosfera, e le interazioni tra di esse”. L’energia assorbita dal sistema viene trasferita e trasformata da una componente all’altra e si manifesta, ad esempio, come movimenti degli oceani e dell’atmosfera, trasformazioni chimico fisiche dei costituenti del sistema e i relativi fenomeni meteorologici. Qualunque variazione, seppur minima, in una di queste componenti determina un cambiamento nello stato di equilibrio energetico che conseguentemente si riflette in una variazione delle condizioni climatiche.

#### *Il bilancio radiativo e l’effetto serra*

La quasi totalità dell’energia immessa nel sistema terrestre proviene dalle emissioni solari. La quantità di energia solare che raggiunge la superficie del nostro pianeta non è costante e dipende da diversi fattori quali la latitudine, la stagione, la durata dell’irraggiamento e così via. A scala globale tuttavia si può ammettere che l’energia in ingresso e quella in uscita siano in equilibrio. Di tutta l’energia solare che giunge al limite dell’atmosfera, una parte corrispondente a circa il 30% viene riflessa nello spazio dall’atmosfera, dall’aerosol e dalla superficie della Terra (oceani e terre emesse nel loro complesso), il 25% viene assorbito direttamente dall’atmosfera e dalle sue componenti e il 45% arriva fino alla superficie del pianeta.

La Terra, d’altra parte, essendo un corpo caldo, emette energia sottoforma di radiazione ad onde lunghe. L’energia emessa dalla superficie terrestre ( $390 \text{ Wm}^{-2}$ ) è superiore a quella ricevuta dal Sole ( $342 \text{ Wm}^{-2}$ ), ma solo una in piccola parte attraversa l’atmosfera e si disperde nello spazio bilanciando l’energia in entrata proveniente dal sole e ristabilendo così l’equilibrio radiativo. La gran parte della radiazione ad onde lunghe terrestre viene riflessa verso la superficie dalle nubi e da alcuni gas costituenti l’atmosfera. Questo fenomeno, noto come effetto serra, è responsabile del riscaldamento della superficie terrestre e ne determina l’equilibrio termico a circa  $15^{\circ}\text{C}$  contro i  $-18^{\circ}\text{C}$  a cui si calcola verrebbe raggiunto l’equilibrio in assenza di atmosfera. L’effetto serra è quindi un

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

fenomeno naturale ed è ciò che permette al nostro pianeta di mantenere una temperatura ideale per lo sviluppo della vita nelle forme a noi conosciute.

### I gas ad effetto serra

I principali responsabili dell'effetto serra sono alcuni gas, di origine naturale o antropica, che costituiscono l'atmosfera terrestre e che assorbono ed emettono radiazione nello spettro dell'infrarosso termico (la stessa emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nubi) determinando così l'innalzamento della temperatura di equilibrio del pianeta. I più importanti sono il vapore acqueo (H<sub>2</sub>O), l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), l'ossido nitroso (N<sub>2</sub>O), il metano (CH<sub>4</sub>), l'ozono (O<sub>3</sub>). ai quali si aggiungono un certo numero di composti di origine antropica come gli idrocarburi alogenati (alocarburanti) (Forster et al., 2007). I gas ad effetto serra contribuiscono in misura differente al riscaldamento globale in funzione della loro capacità di assorbire e riemettere la radiazione infrarossa e della loro persistenza nell'atmosfera.

Le variazioni nella concentrazione atmosferica dei gas serra e degli aerosol, così come quelle dell'uso del suolo o della radiazione solare, possono alterare il bilancio energetico del sistema climatico e condurre al cambiamento del clima. Le variazioni positive o negative nel bilancio energetico dovute a questi fattori sono espresse come forzanti radiativi e vengono utilizzati per valutare l'effetto di riscaldamento o raffreddamento dei diversi fattori (Ramaswamy et al., 2001).

E' definito forzante radiativo, un cambiamento nel flusso radiativo netto medio (radiazione in entrata meno quella in uscita) misurato alla sommità della troposfera (Ramaswamy et al., 2001). Un forzante radiativo può essere determinato tanto dalla variazione della composizione atmosferica o degli aerosol in essa dispersi, quanto da una variazione nella radiazione proveniente dal Sole. Il risultato di tali alterazioni provoca una perturbazione del bilancio tra la radiazione in ingresso e quella in uscita dalla tropopausa che si riflette in una variazione della temperatura globale a cui il sistema raggiunge l'equilibrio. Per convenzione, un forzante positivo comporta il riscaldamento della superficie del pianeta, mentre uno negativo tende mediamente a raffreddare la superficie.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

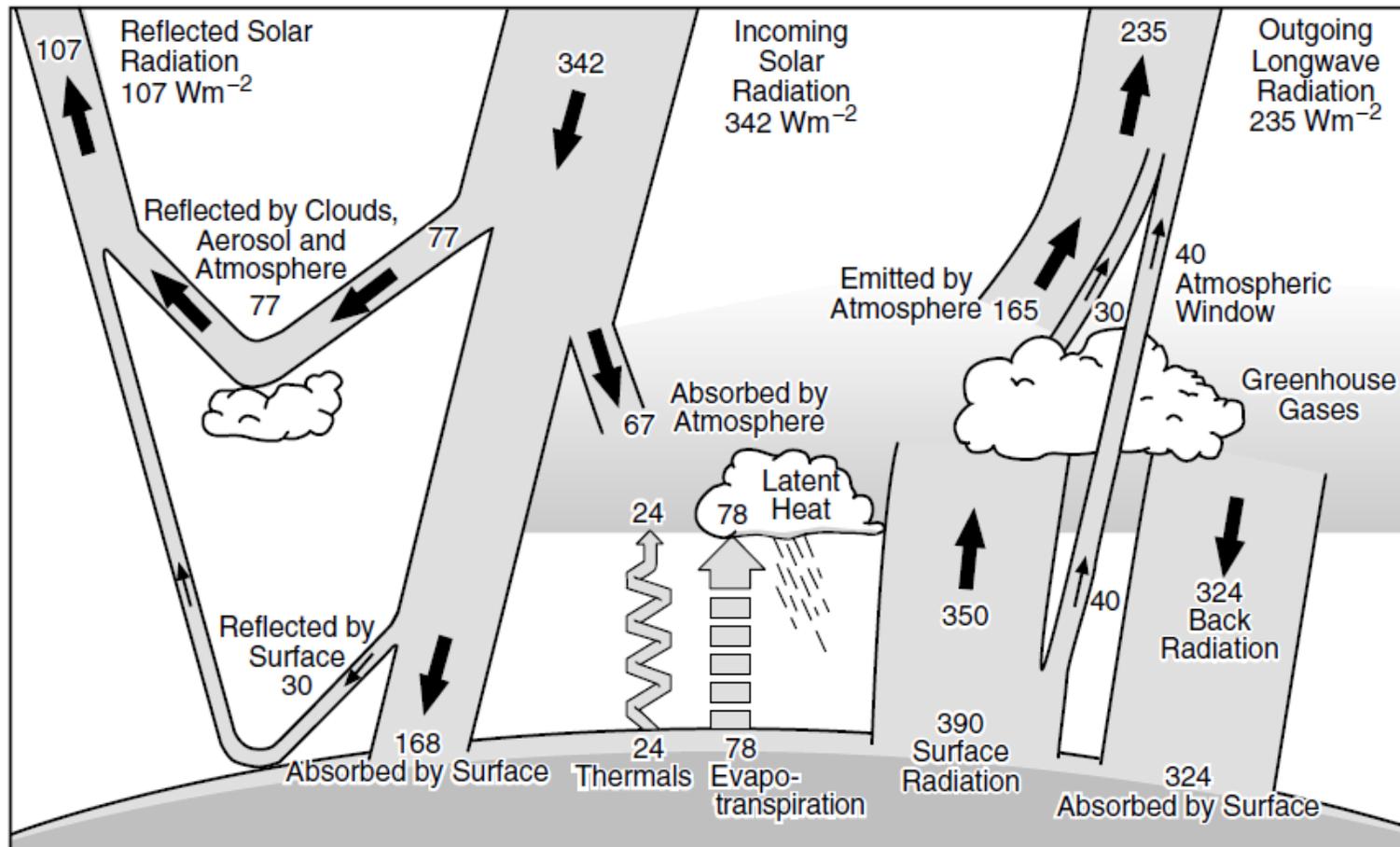


Figura 1.2: Schema del bilancio radiativo globale medio annuo. I flussi di energia (numeri tra parentesi) sono espressi in  $\text{Wm}^{-2}$  (fonte: IPCC-TAR)

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### *Il contributo dell'uomo all'incremento dei gas serra*

Secondo stime molto attendibili, l'attuale concentrazione atmosferica dei diversi gas serra, è la più alta mai verificatasi negli ultimi 650000, con un aumento significativo a partire dall'inizio della rivoluzione industriale (attorno al 1750-1800) (Forster et al., 2007).

Negli ultimi 200 anni, la concentrazione globale di CO<sub>2</sub> ha subito un incremento di oltre il 36% passando da circa 277ppm (MacFarling Meure et al., 2006) a 379 ppm nel 2005 (Forster et al., 2007). Da quando esistono misure dirette in continuo dell'atmosfera (1958), il tasso annuo di incremento della concentrazione di CO<sub>2</sub> è stato di 1.4 ppm all'anno (es. Keeling et al., 1995, Conway et al., 1994; Nakazawa et al., 1997; Langenfelds et al., 2002, ), con una tendenza all'aumento, come dimostrano le analisi del periodo 1995-2005 che indicano un tasso annuo di +1.9 ppm (Hansen e Sato, 2004).

Le concentrazioni atmosferiche di CH<sub>4</sub>, rispetto all'era pre-industriale, hanno subito un incremento del 150% (da 715 a 1774 parti per miliardo (ppb)) (Spahni et al., 2005). Tuttavia, a partire dagli anni '90, il tasso di crescita sta diminuendo, consistentemente con le emissioni totali che sono rimaste quasi costanti durante questo periodo (Blake e Rowland, 1988; Simpson et al., 2002; Dlugokencky et al., 2003).

Il protossido di azoto è passato da circa 270 ppb a 319 ppb nel 2005, con un tasso di crescita che si mantiene costante dal 1980 (Forster et al., 2007; Denman et al., 2007), mentre gli idrocarburi alogenati, praticamente inesistenti prima dell'avvento dell'industrializzazione e che avevano avuto un tasso di crescita molto sostenuto negli ultimi 50 anni, sono in fase di diminuzione anche grazie all'attuazione del Protocollo di Montreal per la protezione dell'ozono stratosferico (Forster et al., 2007).

L'IPCC attribuisce le dinamiche del clima osservate negli ultimi decenni prevalentemente agli effetti delle attività umane. L'incremento della concentrazione dei gas serra, infatti, è il risultato dello sbilanciamento complessivo tra le emissioni globali di gas serra e gli assorbimenti naturali da parte del suolo, degli oceani e degli ecosistemi terrestri e marini in generale. Nell'ultimo secolo, l'uso dei combustibili fossili (Marland et al., 2006; Prentice et al., 2001; Keeling et al., 1995), la deforestazione, ma anche il ritmo di trasformazione della superficie terrestre (Brovkin et al., 2004; Matthews et al., 2004) sia a causa della crescita demografica, sia per lo sviluppo delle attività economiche ed industriali, sono stati tali da modificare sia la capacità di assorbimento e riflessione della

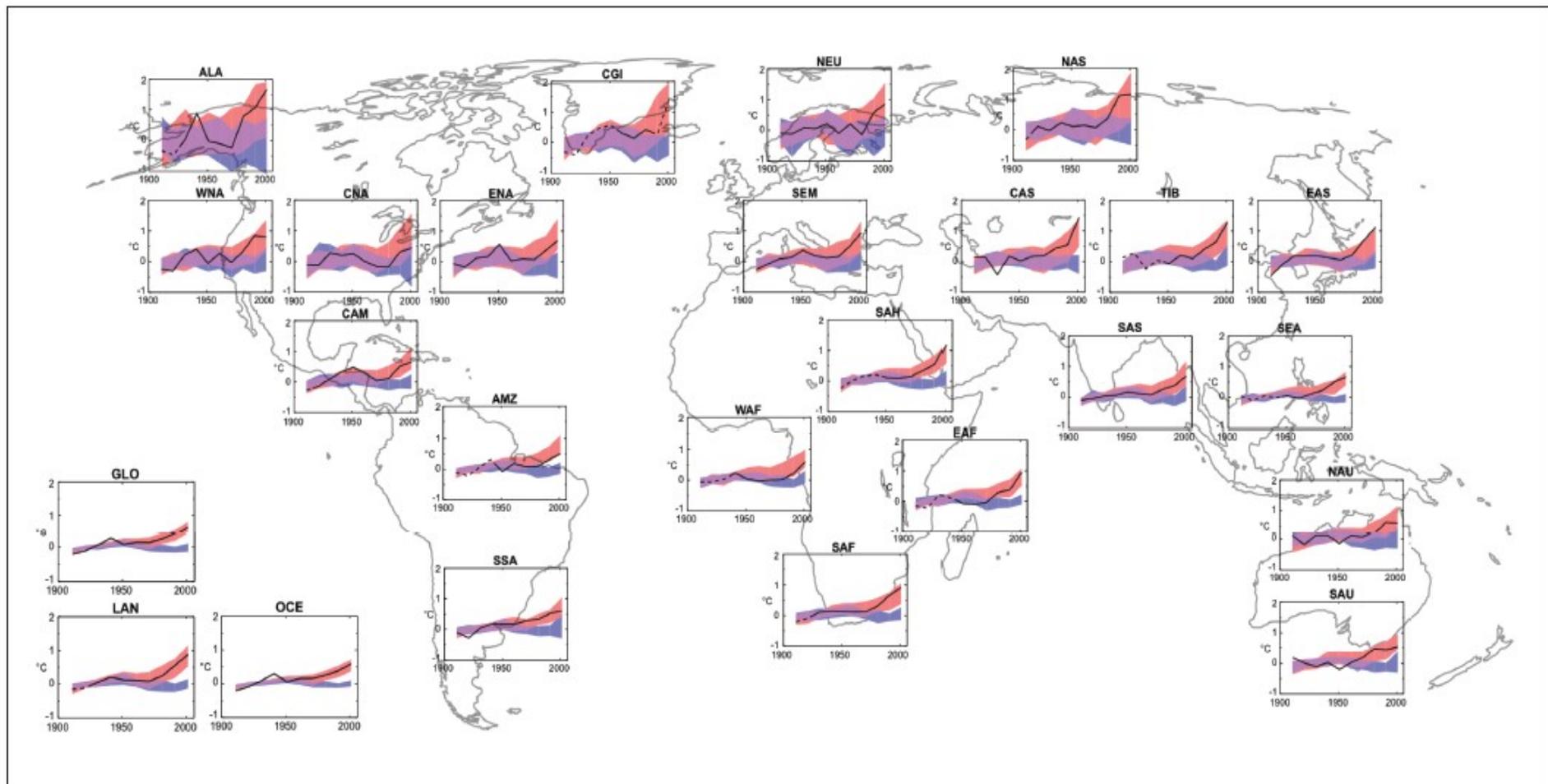
Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

radiazione solare, sia la capacità di emissione termica del suolo e di irraggiamento terrestre verso lo spazio (Forster et al., 2007; Denman et al., 2007).

Dalle stime riferite all'anno 2005 (Forster et al., 2007), risulta che, rispetto al 1750, l'effetto complessivo dell'incremento dei tre principali gas serra ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) è pari a circa  $+2.3 \text{ Wm}^{-2}$ . A questo va aggiunto il forzante dovuto agli alocarburi ( $+0.34 \text{ Wm}^{-2}$ ) e quello dell'ozono troposferico che si forma a seguito di emissioni di prodotti chimici ozono-formanti (es. ossidi di azoto, monossido di carbonio e idrocarburi) pari a  $0.35 \text{ Wm}^{-2}$ . D'altra parte, l'immissione in atmosfera di aerosol provenienti dall'uso dei combustibili fossili, dagli incendi delle foreste e in generale dall'attività umana (es. solfati, carbonio organico, nero fumo, polveri) provoca un effetto di raffreddamento con un forzante radiativo complessivo di circa diretto di  $-0.5 \text{ Wm}^{-2}$  ed uno indiretto (dovuto all'albedo delle nuvole) di  $-0.7 \text{ Wm}^{-2}$ . Infine, i cambiamenti dell'albedo superficiale dovuti a cambiamenti dell'uso del suolo e ai depositi di fuliggine sulla neve forniscono, insieme, un forzante di  $-0.1 \text{ Wm}^{-2}$ .

L'effetto complessivo delle attività umane sul sistema climatico ne ha determinato, quindi, il riscaldamento con un forzante radiativo di circa  $+1.6 \text{ Wm}^{-2}$ , circa 14 volte superiore a quello dovuto ai cambiamenti dell'irradianza solare ( $+0.12 \text{ Wm}^{-2}$ ) (Wang et al., 2005). Nella figura 1.3 sono riportati i risultati delle simulazioni condotte con diversi modelli climatici per riprodurre l'andamento climatico a scala continentale dell'ultimo secolo (Hegerl et al., 2007). Le simulazioni sono state effettuate tenendo conto dei soli forzanti naturali (bande azzurre nei grafici della figura) o dell'insieme di questi con quelli antropogenici (bande rosa). Le dinamiche osservate nella temperatura superficiale globale (linee nere), compreso il maggiore riscaldamento delle terre rispetto agli oceani, e il loro evolversi nel tempo sono state riprodotte solo quando nei modelli sono stati introdotti anche i forzanti antropogenici. Al contrario, usando i soli forzanti naturali, nessuno dei modelli ha riprodotto l'incremento di temperatura osservato nella seconda metà del secolo.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 1.3: Confronto tra le variazioni di temperatura superficiale osservate e quelle simulate dai modelli climatici. Le simulazioni sono state condotte usando sia i soli forzanti naturali (bande blu) che considerando anche quelli di origine antropica (bande rosse). Le osservazioni sono rappresentate dalla linea nera. (fonte: IPCC AR4)**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### 1.1.3 Le previsioni per il futuro

Per valutare come cambierà il clima futuro in seguito alle attività umane è necessario formulare alcune ipotesi, ciascuna delle quali, attraverso opportuni modelli di evoluzione del sistema climatico, porta ad una serie di scenari climatici possibili, a cui associare le corrispondenti valutazioni di impatto ambientale e socio-economico.

**Tabella 1.1: Le quattro famiglie di scenari di sviluppo socio-economico delineate nello IPCC SRES (Fonte: IPCC AR4).**

**A1.** 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, il *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 tre gruppi che descrivono direzioni alternative dei cambiamenti tecnologici del sistema energetico. I tre gruppi si distinguono dalla loro enfasi tecnologica in: fossile intensivo (**A1FI**), fonti di energia non fossile (**A1T**) o un bilancio fra tutte le fonti (**A1B**) (dove per bilancio si intende una non eccessiva dipendenza da nessun tipo particolare di fonte energetica, presumendo che si possa applicare a tutte le risorse energetiche e alle tecnologie finali tassi di miglioramento simili).

**A2.** La famiglia di scenari A2 descrive un mondo molto eterogeneo. Il tema dominante è l'auto-sufficienza e la preservazione delle identità locali. La natalità fra le regioni converge molto lentamente, con un conseguente continuo aumento della popolazione. Lo sviluppo economico è essenzialmente orientato su base regionale e la crescita economica pro-capite e i cambiamenti tecnologici sono molto frammentati e più lenti rispetto alle altre trame.

**B1.** La famiglia di scenari B1 descrive un mondo convergente con la stessa popolazione globale che, come per la trama A1, raggiungerà un massimo a metà secolo per poi declinare, ma con un rapido cambio delle strutture economiche verso un'economia dell'informazione e dei servizi, con una riduzione dell'intensità dei materiali e l'introduzione di tecnologie pulite e che sfruttano le risorse in modo efficiente. Viene data molta importanza alle soluzioni globali per l'economia, alla sostenibilità sociale ed ambientale, includendo un miglioramento dell'equità, ma senza ulteriori iniziative climatiche.

**B2.** 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 continuamente, ad 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.

Nel 2000 l'IPCC ha prodotto lo Special Report on Emission Scenarios (Nakicenovic et al., 2000) in cui vengono descritti alcuni possibili sviluppi della società umana nel

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

prossimo secolo. Gli scenari sono raggruppati in 4 grandi “famiglie” (Tabella 1.1) che ipotizzano vari schemi di sviluppo in funzione della possibile evoluzione demografica, economica e tecnologica del pianeta, e le conseguenti emissioni di gas serra.

I risultati delle analisi modellistiche indicano che, fino al 2030, la temperatura media globale continuerà ad aumentare con un tasso di circa  $+0.2^{\circ}\text{C}$  per decennio, indipendentemente dallo scenario socio-economico adottato. Alla fine del secolo, in virtù delle diverse emissioni scaturite dai vari scenari di sviluppo, la variazione di temperatura rispetto al ventennio 1980-1999, potrà oscillare tra  $1^{\circ}\text{C}$  e  $3^{\circ}\text{C}$  nello scenario più ottimistico (B1) ma potrà raggiungere anche  $+6^{\circ}\text{C}$  nello scenario A1F. Anche ipotizzando che il forzante radiativo venga mantenuto costante ai livelli del 2000, comunque il riscaldamento del sistema proseguirà ad un ritmo di circa  $0.1^{\circ}\text{C}$  per decennio a causa del tempo di permanenza dei gas serra nell’atmosfera (Tabella 1.2) (Solomon et al., 2007; Meehl et al., 2007).

**Tabella 1.2: Proiezioni del riscaldamento medio globale alla superficie per la fine del XXI secolo, rispetto al ventennio 1980-1999 (Fonte: IPCC AR4).**

Caso	Variazione di Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ al 2090-2099 rispetto al 1980-1999) <sup>a</sup>	
	Miglior stima	Intervallo di probabilità
Concentrazioni costanti per l'anno 2000 <sup>b</sup>	0.6	0.3 – 0.9
Scenario B1	1.8	1.1 – 2.9
Scenario A1T	2.4	1.4 – 3.8
Scenario B2	2.4	1.4 – 3.8
Scenario A1B	2.8	1.7 – 4.4
Scenario A2	3.4	2.0 – 5.4
Scenario A1FI	4.0	2.4 – 6.4

Il livello medio degli oceani potrà aumentare di oltre mezzo metro in funzione della dilatazione termica e dello scioglimento dei ghiacci. In tutti gli scenari è prevista, infatti una riduzione delle aree innevate così come del ghiaccio marino tanto nell’Artide che nell’Antartide. Alle alte latitudini sarà molto probabile un aumento delle precipitazioni che invece, tenderanno a ridursi (-20% nello scenario A1B) nelle regioni sub-tropicali. Eventi estremi, come ondate di calore e alluvioni, è molto probabile che diventino più frequenti. Allo stesso modo si prevede un aumento nell’intensità dei cicloni tropicali, mentre quelli extra-tropicali tendono a spostare le loro traiettorie sempre di più verso i poli (Meehl et al., 2007).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

#### **1.1.4 La valutazione degli impatti**

La consapevolezza del riscaldamento globale ha indotto sempre di più gli scienziati a studiare il modo in cui i diversi sistemi, naturali o antropici che fossero, potessero reagire al cambiamento del clima.

Secondo quanto riportato in Viner (2002), questi studi hanno sostanzialmente due finalità. Da una parte, quella della comunità scientifica che mira a capire e spiegare le dinamiche che regolano i sistemi e le loro relazioni con il clima, dall'altra quella dei cosiddetti dei decisori politici e più in generale dei soggetti interessati (tutti coloro che a vario titolo sono coinvolti dal problema analizzato) che, invece, hanno la necessità di capire quali strategie intraprendere per ridurre gli effetti negativi che possono derivare dal riscaldamento del pianeta o, dove possibile, trarne il massimo vantaggio (Jones, 2000a; Schneider, 2001).

La diversità dell'interesse finale di queste due comunità rappresenta un punto cruciale nello studio dell'impatto dei cambiamenti climatici. Gli scienziati possono, diciamo così, porre in secondo piano la plausibilità di uno scenario climatico futuro. Il loro interesse è rivolto alla risposta del sistema studiato per capirne le dinamiche e le relazioni con il clima. Il decisore politico, invece, non può prescindere dal conoscere quale sia la probabilità che un certo scenario possa realmente verificarsi (Katz, 2002), perché è in base a questa probabilità che dovrà decidere le strategie da adottare (Viner, 2002).

Jones (2000a) sostiene che la ricerca può fornire un valido aiuto nella valutazione del rischio climatico per gli ecosistemi, la produzione di cibo, lo sviluppo economico e, successivamente, la valutazione delle strategie di adattamento e mitigazione capaci di contrastare un tale rischio. Per far questo, però, la ricerca non può più limitarsi ad una semplice valutazione degli impatti climatici, ma deve fornire delle valutazioni del rischio ossia deve provvedere informazioni riguardo la probabilità che determinate soglie, reputate pericolose, possano essere superate in virtù della risposta dei sistemi analizzati al cambiamento climatico.

Il processo di valutazione degli impatti prevede una serie di passaggi successivi che permettono di legare un determinato scenario di sviluppo socio-economico alla relativa emissione di gas serra, alla conversione di questa in concentrazione atmosferica dei gas, quindi al loro effetto sul clima a scala globale, poi a scala regionale, e infine determinarne gli effetti sui diversi sistemi (New et al., 2007). La metodologia comunemente adottata fa

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

uso dei modelli di simulazione climatica (guidati dalle condizioni che si vengono a determinare in seguito ai possibili scenari di sviluppo socio-economico), i cui risultati vengono impiegati per alimentare i cosiddetti modelli di impatto (modelli variamente complessi che simulano l'andamento dei sistemi in funzione delle condizioni climatiche previste) (Mearns et al. 2001). Numerosi sono gli studi che hanno adottato modelli di impatto per valutare l'effetto dei cambiamenti climatici su diversi settori quali l'agricoltura (es. Downing et al., 2000), le risorse idriche (es. Arnell, 2003; Graham et al., 2007), le foreste (es. Kellomaki e Leinonen, 2005), o gli ecosistemi (es. Olesen et al., 2007; Schroter et al., 2005). Ulteriori esempi sono riportati nei rapporti di valutazione dell'Unione Europea (EEA, 2008) o dell'IPCC (Alcamo et al., 2007; Kundzewicz et al., 2001)

Ognuno dei passaggi che costituisce il processo di valutazione è caratterizzato da un certo grado di incertezza (Carter et al., 1994) dovuta in parte alla non perfetta conoscenza dei meccanismi che regolano le interazioni all'interno e tra i diversi sistemi coinvolti, dall'altra alla impossibilità di prevedere con assoluta certezza l'andamento di certe dinamiche (New e Hulme, 2000).

Le proiezioni delle emissioni sono fortemente dipendenti dalle assunzioni che vengono fatte riguardo lo sviluppo demografico, la produttività industriale, l'efficienza nell'uso e nella produzione di energia, il trasferimento delle conoscenze, e così via. L'evoluzione futura di questi fattori è altamente incerta e i diversi tipi di sviluppo possono condurre a condizioni future nettamente diverse. Un esempio di questa incertezza è dato dall'ampio ventaglio di possibili scenari di emissione dei gas serra che sono stati prodotti nell'ambito dell'IPCC (Nakicenovic et al., 2000). Ognuno degli scenari futuri è sostanzialmente diverso dagli altri, tuttavia devono essere considerati come ugualmente plausibili (Schneider, 2001).

La non perfetta conoscenza del ciclo, delle sorgenti e dei depositi dei diversi gas serra aggiunge un'ulteriore grado di incertezza quando si devono convertire le emissioni in concentrazione di gas serra e determinare il relativo forzante radiativo (Mitchell et al., 1999).

I modelli climatici, usati per simulare l'andamento futuro del clima, sono delle rappresentazioni delle leggi fisiche che descrivono il trasporto di massa ed energia nell'atmosfera. I modelli di circolazione globale (GCM) sono complessi modelli matematici tri-dimensionali che simulano le dinamiche del clima sull'intero pianeta (Haywood and

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Valdes, 2004; McCarthy et al., 2001). Tuttavia, il sistema climatico è enormemente complesso, e per poterlo rappresentare tramite un modello, bisogna necessariamente operare delle scelte riguardo quali e quanti processi riprodurre, e includere nel modello, e quali escludere (Tebaldi e Knutti, 2007). L'incertezza che caratterizza questa fase del processo di valutazione deriva da un'insieme di fattori che possono, per grandi linee, essere identificati in interni o strutturali (es. incertezze nella rappresentazione dei diversi processi da parte del modello) (Tebaldi e Knutti, 2007) ed esterni (es. incertezze nella conoscenza delle condizioni iniziali del sistema) (Palmer, 2005).

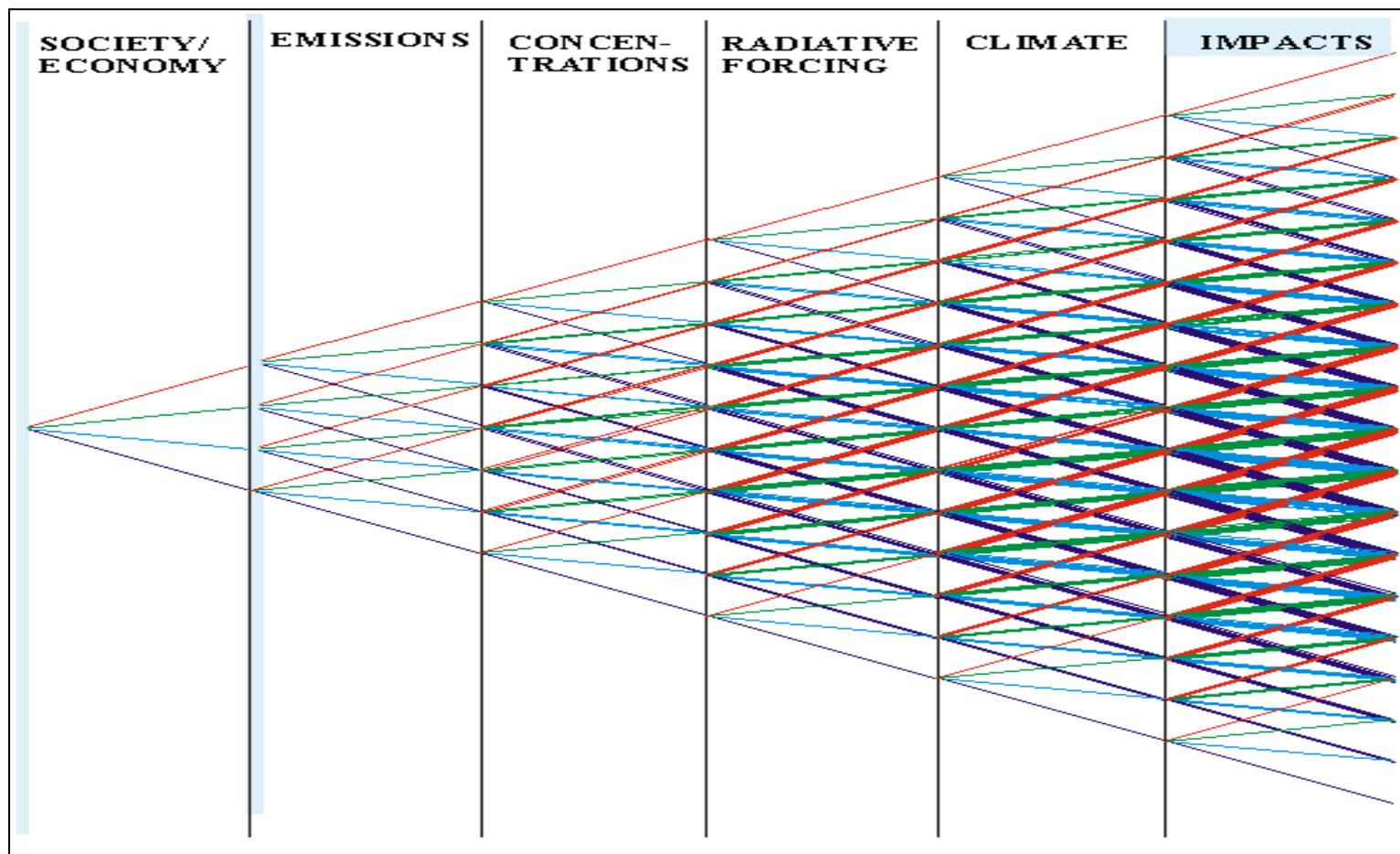
I risultati dei GCM sono prodotti ad una scala spaziale e temporale che spesso risulta inadatta per studi di valutazione di impatto (Mearns et al., 2001; Semenov, 2007). Per ovviare a questo problema, i risultati dei GCM vengono sottoposti ad un processo di *downscaling* per aumentare la risoluzione spazio-temporale degli output. Esistono tre tipologie di *downscaling*. Nel cosiddetto "*change factor approach*" gli output del GCM, espressi come anomalie rispetto alle variabili climatiche relative ad un periodo di riferimento, vengono utilizzati per modificare la climatologia di riferimento e generare gli scenari climatici futuri (Wilby et al., 2004). Il *downscaling statistico* si basa sulla identificazione delle relazioni esistenti tra le variabili a larga scala del GCM e le variabili climatiche regionali o locali. Gli scenari climatici futuri vengono quindi prodotti utilizzando i risultati del GCM come variabili indipendenti nei modelli statistici individuati (Linderson et al., 2004; Wetterhall, 2002; Semenov e Stratonovitch, 2007). Il *downscaling dinamico* prevede l'uso di modelli climatici complessi che operano a scala regionale utilizzando gli output dei GCM come variabili guida (Hellstrom e Chen, 2003; Murphy, 1999). Ognuna di queste tecniche introduce un'ulteriore fonte di incertezza dipendente dalle assunzioni e dalle semplificazioni relative al tipo di approccio scelto.

Infine, i risultati dei modelli climatici vengono adoperati per alimentare i modelli di impatto che sono, come ogni modello, una rappresentazione semplificata di un sistema o parte di esso (Bindi e Fibbi, 2003). Anche in questo caso, la non perfetta conoscenza dei processi del sistema da modellare e delle loro interazioni, comporta un livello di incertezza tanto più ampio quanto maggiori sono le semplificazioni adottate per rappresentare il sistema (Iglesias et al., 2009; Morgan e Henrion, 1990).

L'incertezza che caratterizza una determinata fase del processo di valutazione, si propaga nei successivi passaggi dell'analisi (Jones, 2000a,b) con un progressivo

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

ampliamento noto come esplosione dell'incertezza (Schneider, 1983) o cascata dell'incertezza (Henderson-Sellers, 1993). La figura 1.4 è una rappresentazione grafica di questo concetto proposta da Carter (2006).



**Figura 1.4:** Rappresentazione grafica dell'esplosione dell'incertezza legata alla valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici. Ognuno dei singoli passaggi del processo di valutazione comporta un determinato livello di incertezza rappresentato dallo spazio compreso tra le linee rosse e blu esterne, che si propaga, ampliandosi, nei passaggi successivi.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Carter e Fronzek (2010) raggruppano le metodologie di valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici in tre grandi classi: *Impact Approach*, *Inverse Approach* e *Risk-based Inverse Approach* (Figura 1.5).

Sin dagli anni '80, la metodologia prevalente per la determinazione dell'effetto dei cambiamenti climatici era la cosiddetta "*Impact Approach*" in cui gli output climatici provenienti dai modelli matematici di evoluzione del clima venivano utilizzati per alimentare i modelli di impatto e fornire delle indicazioni guidate esclusivamente dallo scenario climatico scelto per l'analisi. In questo tipo di analisi, la vulnerabilità dei sistemi al cambiamento climatico e la necessità di adattamento sono interpretati come outputs deterministici all'interno di un contesto di cambiamento socio-economico e tecnologico assunto nell'analisi. Un esempio di questa metodica è il cosiddetto "Milioni a Rischio" di Parry et al (2001), in cui differenti scenari, climatici e non, sono stati analizzati per valutare il numero di persone a rischio fame, carenza idrica ed esposizione a malattie e allagamenti costieri in seguito al cambiamento climatico e all'innalzamento dei mari.

Un approccio alternativo è quello definito "*Inverse Approach*", in cui si evidenzia la necessità di esaminare la sensibilità del sistema alle variazioni climatiche e di identificare soglie critiche di impatto il cui superamento potrebbe essere ritenuto indesiderabile. Tali soglie critiche possono essere scelte arbitrariamente o in seguito a specifici criteri (es. sostenibilità economica, sopravvivenza, etc...) che vedono la partecipazione attiva dei soggetti interessati (*stakeholders, decisori politici*) al processo di valutazione (Pittock e Jones, 1999, Jones, 2001, Conde e Lonsdale, 2005). In sostanza, la denominazione "inverso" deriva dal fatto che nella valutazione dell'impatto si procede in senso opposto rispetto alla precedente metodologia: dall'impatto allo scenario. Gli scenari climatici, infatti, vengono impiegati per determinare se, come e quando le soglie critiche selezionate possono essere superate. All'interno di ogni scenario, quindi, è possibile considerare le più opportune strategie di adattamento e mitigazione che possono essere adottate per scongiurare il superamento delle soglie critiche.

Mentre ambedue gli approcci possono fornire interessanti sguardi nella sensibilità dei sistemi, esposti a differenti gradi e tassi di cambiamento climatico, nessuno di loro è in grado di fornire informazioni sulla probabilità (o rischio) di un determinato pericolo climatico (Carter e Fronzek, 2010).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

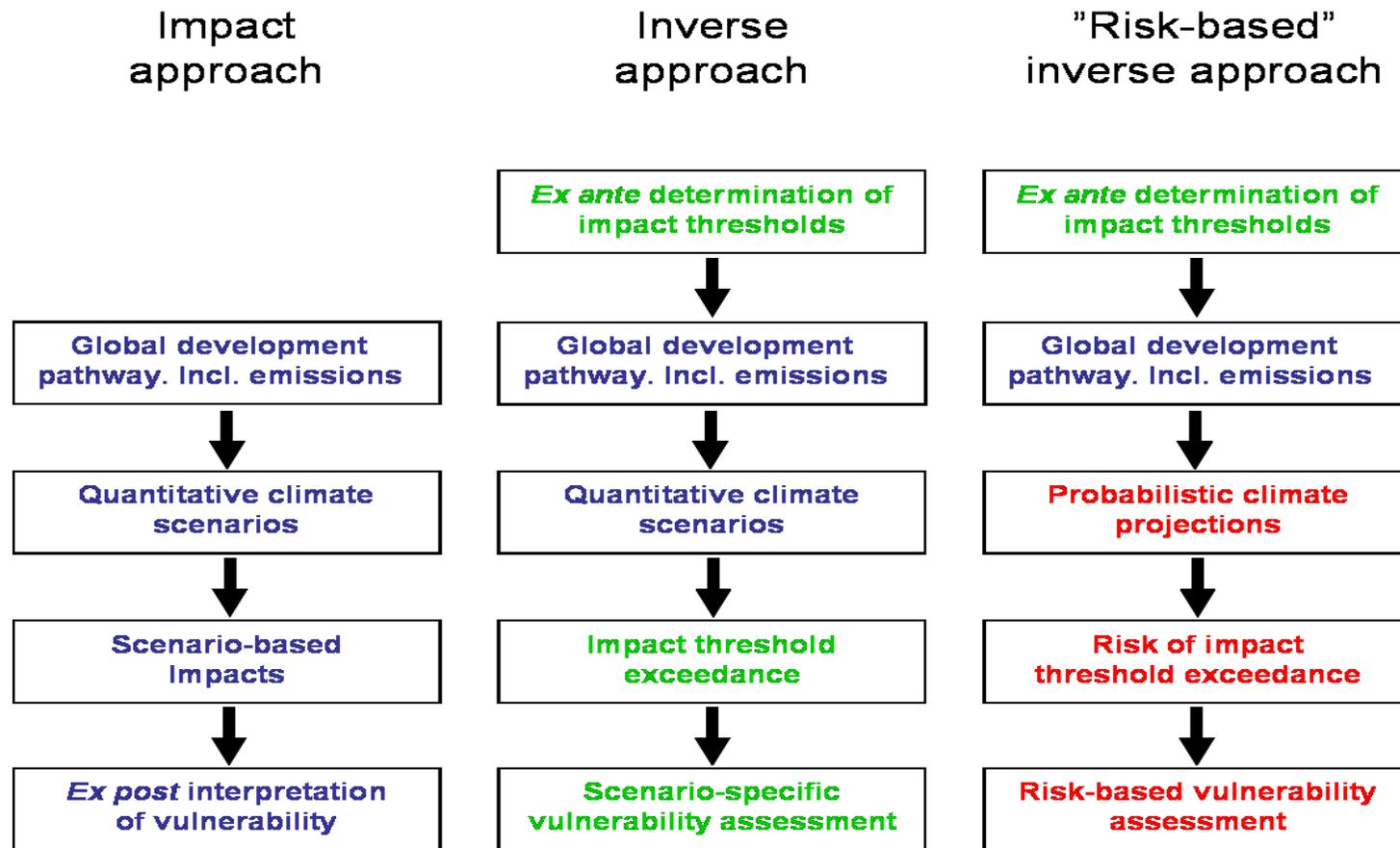


Figura 1.5: Schema concettuale delle tre tipologie di valutazione degli impatti dei cambiamenti climatici. (Carter e Fronzek, 2010)

Come riportato in Carter et al., (2007), comunemente per pericolo si intende un qualunque fenomeno che abbia le potenzialità per determinare un danno. In termini di cambiamento climatico, il pericolo climatico è, di conseguenza, qualunque evento o cambiamento nel clima, si tratti di un singolo evento eccezionale (es. temperature oltre determinati valori) o di complesse combinazioni di cambiamento che coinvolgono diverse variabili climatiche, in grado di determinare un danno al sistema, naturale o antropizzato che sia, sul quale agisce. Per determinare il rischio legato ad un determinato pericolo climatico, è necessario conoscere la probabilità che tale evento (pericolo) possa verificarsi. Il rischio è tipicamente definito da criteri (di solito delle soglie di rischio) che permettono di legare gli effetti dei cambiamenti climatici (ad esempio, la variazione delle rese) alle conseguenze che questi possono determinare sui sistemi interessati dall'analisi (ad esempio, variazioni di reddito).

Da questo punto di vista, gli approcci appena visti sono limitati dagli scenari selezionati per la rappresentazione delle condizioni future, indipendentemente che queste siano o meno di tipo climatico. Per definizione uno scenario non è una previsione; piuttosto è una “coerente, internamente consistente e plausibile descrizione di un possibile stato futuro del mondo” (IPCC, 1994). In definitiva, uno scenario, per quanto plausibile, non fornisce alcuna informazione riguardo la probabilità che possa verificarsi (Jones 2000a).

Di solito, per ovviare a questa incertezza, nelle analisi di impatto vengono adottati diversi scenari climatici allo scopo di coprire un ventaglio di proiezioni il più realistico possibile (Mearns et al., 2001). Ciononostante, la selezione degli scenari rimane in qualche modo arbitraria, il che può compromettere l'efficacia di una valutazione di impatto, specialmente se viene utilizzata per il supporto decisionale (New et al., 2007; Carter e Fronzek, 2010). D'altra parte l'adozione di scenari che coprano l'intera gamma della incertezze possibili, ad esempio analizzando gli effetti dei valori estremi di ogni passaggio della catena di valutazione, comporta una variabilità dei risultati così ampia da risultare del tutto inutile per la pianificazione delle possibili strategie di adattamento (Jones, 2000a).

Negli ultimi anni, diversi studi stanno esplorando la possibilità di attribuire un valore di probabilità agli scenari climatici futuri (Stott, 2007; New et al. 2007, Tebaldi e Knutti, 2007; Collins, 2007). In questi studi, opportune metodologie statistiche sono state applicate per costruire, a partire dai risultati di un insieme di modelli climatici, le funzioni di distribuzione delle probabilità (PDF) di cambiamento delle variabili climatiche. Una volta

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

note le PDF relative alle diverse variabili è possibile combinarle insieme per ottenere delle superfici probabilistiche della distribuzione congiunta, che descrivono quantitativamente l'incertezza delle proiezioni climatiche (es. New e Hulme, 2000; Jones, 2000a; Harris et al., 2009).

Il “*Risk-based Inverse Approach*” è una procedura che fa uso di questo tipo di informazioni per calcolare la probabilità di superare le soglie critiche e quindi esprimere la vulnerabilità ai cambiamenti climatici in termini di rischio di impatto. Con questo approccio, la valutazione dell'impatto può essere eseguita secondo due metodologie. Quella più rigorosa consiste nell'alimentare un modello di impatto con un sotto-insieme sufficientemente grande (diverse centinaia o migliaia) di scenari climatici, estratti dalla superficie probabilistica di distribuzione congiunta delle variabili climatiche. Il rischio viene quindi determinato come percentuale degli scenari che causano il superamento della soglia critica (New et al, 2007; Wilby e Harris, 2006). Tuttavia, dato l'elevato numero di simulazioni necessarie, la procedura potrebbe richiedere una notevole quantità di risorse in termini di capacità e tempi di calcolo soprattutto quando si adottino modelli meccanicistici complessi.

Un metodo alternativo è quello di costruire delle superfici di risposta dell'impatto sulle quali sovrapporre le superfici probabilistiche di variazione congiunta per calcolare la probabilità che le soglie critiche vengano superate. Le superfici di risposta vengono costruite utilizzando il modello di impatto per condurre un'analisi di sensibilità rispetto alle variabili climatiche chiave (di solito due), per le quali sono fornite le proiezioni probabilistiche. Comunemente questo consiste nell'alterare il clima di riferimento con variazioni costanti delle variabili chiave che coprano l'ipotetica gamma di variazione del clima futuro. Gli impatti sono quindi rappresentati in uno spazio bidimensionale, delimitato dalla variazione delle due variabili climatiche, in cui ad ogni possibile combinazione delle due corrisponde uno specifico valore dell'impatto. Una volta selezionata la soglia critica dell'impatto, è sufficiente sovrapporre alla superficie di risposta la superficie probabilistica delle variazioni congiunte (o il sotto-insieme di punti che la rappresenta), per calcolare la porzione della superficie probabilistica (o del sotto-insieme di punti) che supera la soglia e, quindi, il rischio. Alcuni esempi dell'applicazione di questa nuova metodologia si ritrovano in Jones (2001) in cui un modello irriguo viene utilizzato per calcolare il rischio di superare

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

una determinata soglia di irrigazione e Fronzek et al., (2010) in cui viene valutata la probabilità che un particolare ecosistema in Fennoscandia possa scomparire.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## **1.2 Il frumento duro**

### **1.2.1 Morfologia del frumento**

La sistematica dei frumenti è materia complessa e tuttora controversa. Attualmente il criterio di classificazione si basa sulla costituzione genomica delle specie (MacKey , 1988; Van Slageren, 1994). Nel genere *Triticum* è individuabile una serie genomica poliploide con numero cromosomico  $n=7$  e presenza di specie diploidi, tetraploidi ed esaploidi. Le due specie di rilevante interesse agronomico ed economico, per la loro diffusione a livello mondiale, sono: *T. aestivum* ssp. *aestivum* o frumento tenero e *T. turgidum* ssp. *durum* o frumento duro.

Il frumento presenta un apparato radicale di tipo fascicolato costituito da radici primarie, o embrionali, alle quali si affiancano, in un secondo momento, quelle secondarie, o avventizie.

Il culmo è eretto, fistoloso, a sezione cilindrica, cavo internamente. E' formato, secondo le cultivar, da 5 a 8 nodi e internodi, l'ultimo dei quali, nel frumento duro, risulta pieno di un tessuto spugnoso. In corrispondenza di ogni nodo è presente un tessuto meristematico, detto intercalare, la cui attività determina l'allungamento dell'internodo soprastante.

Le foglie sono di colore verde più o meno intenso in numero corrispondente a quello dei nodi, sui quali si inseriscono con disposizione alterna. Hanno portamento patente o eretto, di forma lineare-lanceolata appuntita.

L'infiorescenza del frumento è una spiga composta terminale. Il frutto è una cariosside il cui peso varia, in media, da 30 a 40 mg nel frumento tenero e fino a 55 mg in quello duro.

### **1.2.2 Fenologia del frumento**

Il ciclo biologico del frumento è suddiviso in fasi di durata variabile in funzione del genotipo e delle condizioni ambientali, in particolare della temperatura e del fotoperiodo. Ogni fase corrisponde a momenti ben precisi dell'organogenesi ed è caratterizzata da cambiamenti della morfologia della pianta.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

La germinazione avviene quando la cariosside ha raggiunto un'umidità del 35-40% con l'emissione della radichetta a cui segue il germoglio. La durata di questa fase si aggira normalmente intorno ai 10-15 giorni.

Quando la pianta presenta 3-4 foglie, ha inizio la fase di accestimento. Il numero di culmi secondari varia, nelle normali condizioni, tra 0,5 a 2, con naturale maggior accestimento nel frumento tenero rispetto al duro. Vari sono i fattori che possono influenzare questa fase: la semina (più è precoce più la pianta accestisce, più è densa meno la pianta accestisce), gli elementi nutritivi (carenze di azoto e fosforo possono essere inibitori), l'ossigenazione del terreno, l'illuminazione e l'umidità.

La fase che segna l'allungamento degli internodi è detta levata. Nelle varietà autunnali questa fase ha inizio solo dopo che la pianta è stata esposta per un certo periodo a temperature di 3-7°C. Durante la levata la spiga viene gradualmente spinta verso l'alto raggiungendo la guaina dell'ultima foglia, con un rigonfiamento caratteristico di questa fase (fase di botticella). Dopo circa 15 giorni la spiga fuoriesce (fase di spigatura) e dopo un'altra settimana avviene la fioritura, caratterizzata dalla fuoriuscita delle antere.

La fioritura, autogama e cleistogama, inizia dal culmo principale e segue in quelli secondari secondo l'ordine di formazione. All'interno della stessa spiga procede a partire dai fiori mediani verso quelli basali e apicali. Tutto il processo dura 6-8 giorni. La percentuale di allegagione è negativamente influenzata da cambiamenti improvvisi di temperatura e da condizioni di forte umidità.

Il processo di maturazione è variabile in funzione dell'andamento termico e generalmente si completa in 30 e 50 giorni. I primi 7-15 giorni sono caratterizzati dalla cosiddetta fase di accrescimento lento della biomassa riproduttiva (fase lag), caratterizzato da una intensa moltiplicazione cellulare. In una fase successiva le cellule si accrescono in biomassa accumulando sostanze nutritive.

La prima fase del processo di maturazione, detta maturazione latte, è caratterizzata dall'elevata percentuale di acqua presente nella cariosside (70%) che solubilizza le sostanze amilacee presenti all'interno. Successivamente la cariosside si disidrata ed il suo contenuto idrico scende fino a 40-45%, raggiungendo la fase di maturità cerosa. La maturità fisiologica viene raggiunta quando a un ulteriore accumulo di sostanze corrisponderà una diminuzione in contenuto idrico fino a 30%. A questo punto l'accumulo termina la cariosside si disidrata ulteriormente e raggiunge la maturazione piena (13% d'umidità).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### **1.2.3 Esigenze Ambientali**

#### Esigenze termiche

Il frumento è un cereale microtermo, adattato a svolgere il suo ciclo biologico con temperature medie per l'intero periodo inferiori a 15°C.

La germinazione avviene quando la cariosside ha raggiunto una umidità del 35-40%. Può avvenire a temperature di 2-4° C, anche se lentamente, trovando la sua condizione ottimale a 20-25°C.

La resistenza al freddo aumenta gradualmente fino allo stadio di 3-4 foglie e raggiunge il massimo in pieno accestimento. In questa fase la maggior parte delle varietà di frumento sopportano senza gravi danni temperature di 8-10°C sotto zero. Temperature superiori ai 12°C comportano una contrazione della durata della fase vegetativa (Shpiler e Blum, 1986) insieme ad una riduzione nel numero totale di foglie e di accestimenti fertili (Midmore et al., 1984).

Alla levata, il frumento perde completamente la sua capacità di resistenza al freddo: pochi gradi sotto lo zero possono danneggiare il tessuto degli internodi determinando il collasso del culmo stesso o, peggio, provocare la morte degli apici vegetativi e dei culmi sottostanti. La temperatura ottimale è intorno a 15°C, temperature più elevate comportano una riduzione del numero finale di cariossidi da attribuirsi ad un diminuito numero di accestimenti fertili e di granelli per spiga.

L'optimum di temperatura per la fioritura è 18-20°C. Temperature inferiori a 9°C o superiori a 30°C causano danneggiamenti agli organi riproduttivi e sterilità pollinica.

Gli effetti delle temperature, durante la maturazione, sono piuttosto complessi e strettamente legati alla disponibilità idrica. In linea di massima, temperature intorno ai 20°C sono le più favorevoli all'assimilazione e all'accumulo di amido nelle cariossidi.

I danni più gravi delle alte temperature si registrano a carico degli organi fiorali, della formazione dei frutti e del funzionamento dell'apparato fotosintetico.

Le alte temperature determinano un'accelerazione dello sviluppo fenologico, attraverso l'accorciamento delle singole fasi. Questo comporta una riduzione della produzione della biomassa totale e della granella.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### Vernalizzazione

In alcuni genotipi di frumento il passaggio dallo stadio vegetativo a quello riproduttivo avviene solo dopo che la pianta ha trascorso un certo periodo di basse temperature. Si possono riconoscere due diversi genotipi di frumento:

*frumenti invernali o non alternativi*: il loro fabbisogno in freddo è piuttosto elevato. Per passare alla fase riproduttiva richiedono temperature comprese tra 0°C e 7°C per un periodo di 30-60 giorni (Evans et al., 1975). Questi frumenti sono caratterizzati da una elevata capacità di resistenza alle basse temperature;

*frumenti primaverili o alternativi*: le loro richieste di vernalizzazione sono molto ridotte o nulle. Di solito sono sufficienti temperature tra 7°C e 18°C per 5-15 giorni per avere l'induzione a fiore (Evans et al., 1975). La resistenza al freddo di queste varietà è piuttosto esigua.

Nel germoplasma del frumento tenero esiste una variazione pressoché continua tra i due estremi considerati, mentre nel frumento duro prevalgono i tipi alternativi.

### Fotoperiodo

I genotipi di frumento sensibili al fotoperiodo, richiedono una certa lunghezza del giorno per poter passare alla fase riproduttiva. In alcuni casi il fotoperiodismo può sostituire la vernalizzazione. Alcuni tipi alternativi hanno una risposta fotoperiodica molto marcata, sufficiente a prevenire la differenziazione fiorale durante l'inverno.

### Esigenze idriche

Il consumo idrico unitario del frumento può variare da 0,45 a 0,55 m<sup>3</sup> per Kg di sostanza secca prodotta. Ne consegue che per ottenere delle produzioni soddisfacenti sono necessari da 4500 a 6500 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> di acqua, in funzione delle condizioni che regolano l'evapotraspirazione e a seconda della durata del ciclo della pianta.

Durante la fase di accostamento i consumi idrici sono piuttosto limitati. Ciò non di meno, condizioni di insufficienza idrica si riflettono negativamente sullo sviluppo della copertura vegetale. Dalla levata alla fioritura la pianta attraversa un periodo di forte attività vegetativa. Le esigenze idriche diventano sempre più consistenti, sia per il regime crescente delle temperature sia per la progressiva rapida espansione della copertura vegetale. Deficit idrici, se moderati, determinano una diminuzione della crescita cellulare e del LAI con Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

conseguente riduzione della fotosintesi per unità di superficie. Se la carenza idrica è più intensa si avrà un calo della fotosintesi netta in seguito alla progressiva chiusura degli stomi (Acevedo, 1991). La scarsità di acqua, inoltre, ha come effetto indiretto una accelerazione dello sviluppo fenologico, a causa dell'aumento di temperatura che si accompagna alla chiusura degli stomi (una ridotta traspirazione comporta un minore raffreddamento della pianta). Sono state misurate differenze di temperatura fino a 8°C fra piante ben irrigate e piante in carenza idrica (Blum et al., 1982).

La mancanza di acqua tra la spigatura e la fioritura, può avere un notevole impatto sul numero finale di cariossidi per unità di superficie (Hochman, 1982). Lo stress idrico in questa fase causa la riduzione del numero di spigette per spiga e la morte dei fiori basali e distali dell'infiorescenza.

Nella fase di granigione le disponibilità idriche giocano un ruolo fondamentale sul livello di produzione della coltura. Studi condotti in ambienti aridi, hanno evidenziato una correlazione positiva tra l'*Harvest Index* e l'acqua traspirata durante la fase di riempimento della cariosside (Passioura, 1977). La carenza idrica in questa fase non influisce sul numero, ma sul peso delle cariossidi. Quest'ultimo viene ridotto, in seguito all'accorciamento del periodo di riempimento a causa di una senescenza più veloce.

Gli eccessi idrici sono da temere, soprattutto se causano ristagno, perché portano alla formazione di uno strato asfittico nel terreno, predispongono agli attacchi fungini e lisciviano i nitrati creando condizioni di insufficienza nutritiva. Dopo la levata, sono molto pericolose le piogge battenti unite a vento forte giacché possono determinare fenomeni di allettamento. L'antesi e la fecondazione sono ostacolate dalla nebbia e dalla pioggia. Nella fase di pre-raccolta, se l'embrione ha superato la dormienza, come avviene normalmente nella maggior parte delle attuali varietà, una piovosità elevata può causare l'avvio della germinazione sulla spiga, con scadimento qualitativo sia per l'uso industriale che come semente.

### Esigenze pedologiche

I suoli più adatti alla coltivazione del frumento sono quelli profondi, permeabili, tendenzialmente argillosi. Si adatta comunque bene alle diverse condizioni pedologiche tranne che nei terreni in cui si verificano ristagni idrici e non vi è una sufficiente aerazione; in queste condizioni vengono compromessi lo sviluppo e la funzionalità delle radici e si

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

registra una maggiore incidenza di attacchi di mal del piede. Nei terreni sciolti la pianta soffre per deficienze nutritive (maggiori perdite per lisciviazione), per eccessiva aerazione, per deficienza idrica durante la granigione.

Il frumento predilige pH attorno alla neutralità, anche se si adatta abbastanza bene a terreni basici o leggermente acidi. Tollera discretamente la salinità (Toderi e D'Antuono, 2000).

### Esigenze nutritive e concimazione

La quantità di elementi nutritivi necessari alla pianta varia in funzione di fattori genetici e ambientali. Più alte sono le rese, maggiori sono le quantità di sostanze nutritive assorbite. Le asportazioni per la produzione di una tonnellata di granella di frumento (compresa la paglia) sono state stimate nell'ordine di 25-30 Kg ha<sup>-1</sup> di azoto, 14-16 Kg ha<sup>-1</sup> di anidride fosforica e 25-30 Kg ha<sup>-1</sup> di ossido di potassio. L'assorbimento degli elementi nutritivi avviene in quantità notevoli durante la fase della levata, al termine della quale la pianta ha assorbito almeno il 70-80% delle sue esigenze totali (Bonciarelli, 1998).

La più alta risposta della produzione di granella alla fertilizzazione azotata si verifica quando l'azoto viene applicato poco prima dell'inizio della levata (Codice Zadoks = DC 30; Zadoks et al., 1974). Concimare in questa fase, inoltre, abbassa il rischio di allettamento e riduce le perdite di fertilizzante (Brooking e Kirby, 1981; Wuest e Cassman, 1992a, 1992b). Le applicazioni azotate successive allo stadio di secondo nodo (DC 32) riducono progressivamente la loro efficacia sulla quantità della produzione. In particolare, dopo la formazione delle cariossidi (DC 70) non vi è più risposta in termini quantitativi, ma è stato osservato un incremento nel contenuto proteico della granella (Mossedaq e Smith, 1994). L'efficacia della concimazione viene aumentata quando si procede ad un frazionamento delle applicazioni (Sowers et al., 1994).

Solitamente, la tecnica di concimazione prevede due distribuzioni del fertilizzante azotato: la prima da effettuarsi nella fase di pre-viraggio utilizzando 1/3 della dose complessiva, la seconda in prossimità dell'inizio della levata con i restanti 2/3. Nel caso di terreni molto carenti può essere utile distribuire una piccola quantità di azoto alla semina, in maniera localizzata. Infine, va sottolineato che il frumento trae poco giovamento dalla concimazione organica diretta a causa del ritardo con cui l'azoto diviene disponibile per la coltura.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### 1.3 Obiettivi del lavoro

Lo studio riportato in questo lavoro di tesi è stato sviluppato nell'ambito del progetto "ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales", finanziato dal 6° Programma Quadro della comunità Europea (van der Linden e Mitchell, 2009). Il progetto è stato costituito con l'intento di fornire, a ricercatori, decisori politici, operatori pubblici e privati, informazioni sui previsti cambiamenti del clima ottenute tramite l'uso dei più sofisticati e moderni strumenti di analisi e modellizzazione del clima. La finalità principale del progetto è stata quella di produrre una misura dell'incertezza legata alle proiezioni climatiche future, così da fornire ai decisori politici, ad ogni livello, le informazioni necessarie per poter scegliere, opportunamente, le strategie utili a contrastare gli effetti negativi del cambiamento del clima.

L'obiettivo del lavoro presentato in questa tesi è stato quello di applicare una metodologia innovativa, che sfrutta le proiezioni climatiche probabilistiche prodotte nell'ambito del progetto, per la valutazione del rischio climatico per la coltura del frumento duro (*Triticum turgidum* subsp. *durum* Desf.). La procedura adottata è stata sviluppata attraverso una serie di passaggi che vengono riassunti di seguito:

- Calibrazione e validazione di un modello meccanicistico di simulazione della fenologia e delle rese del frumento duro;
- Semplificazione del modello meccanicistico mediante l'uso di una rete neurale artificiale (*Artificial Neural Network*; ANN) per riprodurre le rese simulate in funzione di alcune variabili climatiche e gestionali;
- Creazione di superfici di risposta (SR) dell'impatto, alterando la climatologia del periodo di riferimento rispetto ad alcune variabili climatiche chiave (es. temperatura, precipitazioni, CO<sub>2</sub>);
- Uso delle proiezioni probabilistiche prodotte per lo scenario di emissione A1B dal Met-Office Hadley Centre, per la valutazione del rischio, legato al clima futuro, di ottenere rese medie inferiori ad una soglia prestabilita;
- Generazione di mappe di rischio climatico, relative all'area in esame, fino alla fine del secolo.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## 2. Materiali e metodi

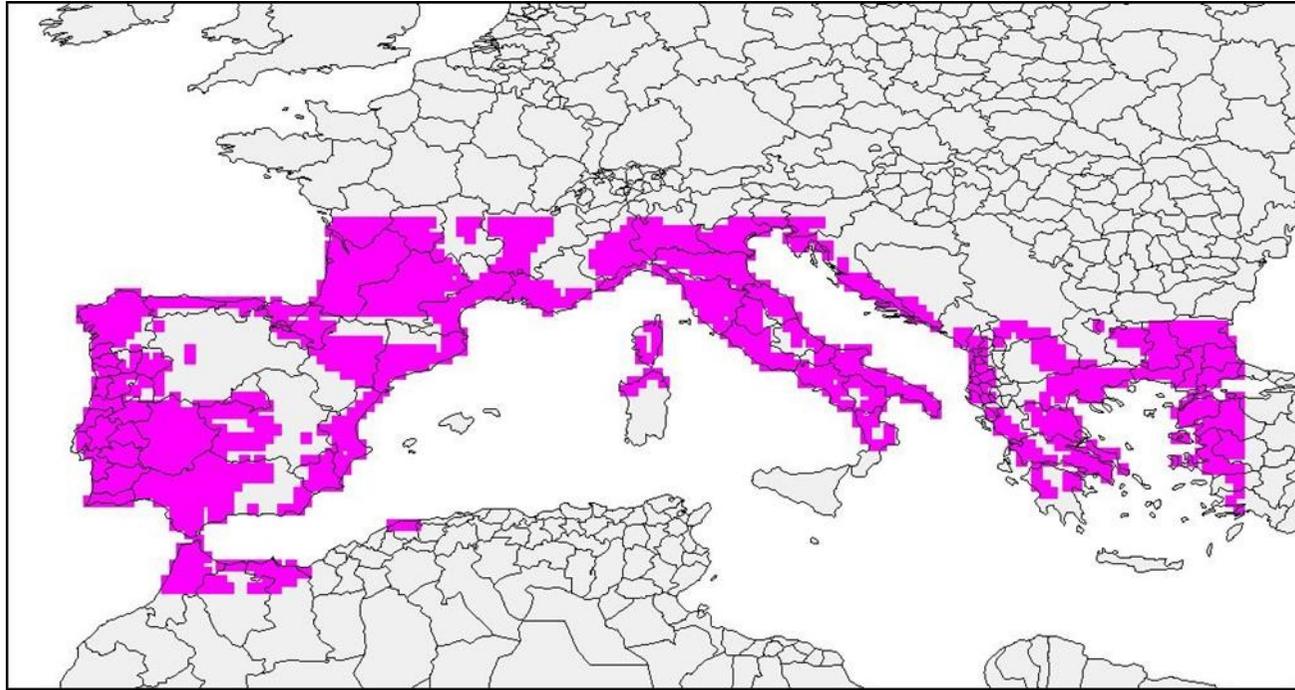
### 2.1 L'area di studio

L'area del bacino del Mediterraneo è una regione compresa tra 30°– 46° Lat N e tra - 5.8°– 38° Lon E ed è costituita dall'omonimo mare e dalle terre che lo circondano. Da un punto di vista climatico questa regione rappresenta un'area di transizione tra il clima tropicale e quello temperato. Il clima della regione è caratterizzato da inverni miti e piovosi e da estati calde e secche. Le precipitazioni annuali mediamente variano tra i 400 e i 900mm con un gradiente in leggera diminuzione spostandosi verso est. Raramente si registrano valori superiori ai 1200mm o inferiori ai 400mm per anno. Il 65% circa degli eventi piovosi si distribuisce nel periodo compreso tra novembre e aprile.

Gli inverni sono generalmente miti, con qualche sporadico episodio di freddo intenso che, comunque non perdura a lungo. Le estati sono caratterizzate dalla persistenza degli anticicloni delle Azorre e Sahariano. Quest'ultimo determina temperature decisamente elevate specialmente nelle aree sud-orientali del bacino. In media la temperatura dei mesi più caldi (luglio e agosto) oscilla tra i 25 e i 28°C, mentre nei mesi più freddi le temperature si attestano intorno ai 6-13°C.

L'estensione spaziale dei dati climatici probabilistici per il futuro, sui quali si basa la metodologia di valutazione del rischio adottata in questo studio, non copre le aree meridionali del bacino del Mediterraneo. Di conseguenza, alcune regioni, comunque importanti per la produzione di frumento duro, quali alcune zone dell'Italia meridionale, la Turchia centro-orientale e il Nord Africa, non sono state incluse nell'analisi.

All'interno delle aree di cui si possedevano i dati climatici, l'analisi è stata condotta per l'areale tipico della coltura, escludendo, quindi, le aree con altitudine superiore a 600m s.l.m. e quelle con precipitazioni medie annuali inferiori a 300mm, dove generalmente il frumento duro non è coltivato (Figura 2.1).



**Figura 2.1: Area di studio. La valutazione è stata effettuata nelle zone per le quali erano disponibili i dati probabilistici per il futuro. All'interno di queste, le aree con altitudine superiore a 600m s.l.m. e quelle con precipitazioni medie annuali inferiori a 300mm, dove generalmente il frumento duro non è coltivato sono state escluse dalla valutazione.**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## **2.2 Dati climatici**

### **2.2.1 Periodo Presente**

I dati meteorologici necessari alla creazione delle SR della resa sono stati estratti dal data-set “E-Obs” (Haylock et al., 2008) prodotto all’interno del progetto ENSEMBLES. Il database è costituito dai dati giornalieri di temperatura minima (Tn), massima (Tx), media (Tg) e precipitazione (Pr) riferiti ad una griglia di punti con risoluzione spaziale di 25 Km x 25 Km. Il database è stato ottenuto tramite tecniche di interpolazione spaziale dei dati giornalieri raccolti in più di 2300 stazioni sparse su tutto il territorio europeo e alcune regioni dell’Africa nord-occidentale. I dati meteorologici sono disponibili a partire dal 1950 fino al 2006.

In questo studio è stato utilizzato, come periodo di riferimento per il presente, il trentennio 1961-1990. La scelta di questo intervallo è stata dettata dal fatto che i dati probabilistici per il futuro sono stati forniti come anomalie di temperatura e precipitazione calcolati rispetto a questo periodo temporale.

### **2.2.2 Dati probabilistici per il futuro**

I modelli climatici globali (*Global Climate Models*: GCM) sono in grado di fornire informazioni dettagliate sull’andamento futuro del clima risolvendo le equazioni fisiche, chimiche e biologiche che descrivono il sistema climatico (McCarthy et al., 2001). Tuttavia, i GCM non sono delle riproduzioni perfette del mondo reale. La risoluzione spaziale di un GCM, ad esempio, è limitata dalla disponibilità di adeguate capacità di calcolo, così come, la rappresentazione dei diversi processi che contribuiscono alla determinazione del clima è limitata dalla nostra capacità di comprendere, misurare e modellizzare precisamente tutte le interazioni esistenti tra le svariate componenti del sistema stesso (Tebaldi e Knutti, 2007). Questo fa sì che le previsioni sull’andamento climatico futuro siano affette da incertezza.

Al di là degli sforzi tesi a sviluppare e migliorare modelli in grado di riprodurre la realtà nella maniera più fedele possibile, una delle principali attività del progetto ENSEMBLES è stata quella di produrre delle proiezioni probabilistiche del futuro cambiamento del clima, quantificando l’incertezza legata alle previsioni dei modelli climatici adottati. Le previsioni sono state prodotte dall’Hadley Centre del Met-Office Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

(MOHC) come funzioni di distribuzione delle probabilità (PDF) delle variabili climatiche di interesse. Le PDF sono una rappresentazione dell'incertezza nella previsione del clima futuro legata alla non perfetta conoscenza del sistema climatico e alla attuale capacità di osservarlo (misurarlo) e modellizzarlo.

La metodologia adottata per la produzione delle proiezioni climatiche probabilistiche è stata basata sull'approccio Bayesiano descritto da Rougier (2007) e implementato da Murphy et al. (2007, 2009).

Semplificando enormemente, un GCM può essere descritto come:

$$y = f(x),$$

dove  $y$  è il vettore delle variabili climatiche che devono essere stimate (ad es. la temperatura o la precipitazione di un determinato punto della superficie terrestre),  $x$  il vettore delle variabili in ingresso,  $f$  è il GCM, ossia la rappresentazione matematica delle leggi che regolano il sistema climatico e la cui risoluzione permette di stimare il valore della variabile desiderata.

L'approccio tradizionale per produrre delle proiezioni climatiche consiste nella scelta di quei valori di  $x$  che sono reputati essere le migliori stime dei parametri in ingresso necessari al GCM. Questo insieme di parametri, produce una sola proiezione di  $y$ , che rappresenta, quindi, una singola realizzazione di quello che potrebbe avvenire nel futuro. Un'estensione di questo approccio consiste nell'effettuare un insieme di simulazioni per un certo numero di stati iniziali dell'atmosfera e degli oceani, così da produrre un insieme di possibili proiezioni climatiche che tengano conto della naturale variabilità interna al sistema climatico.

Nell'ambito del progetto ENSEMBLES, la metodologia è stata ulteriormente implementata fornendo al modello anche diversi set di valori per le variabili in ingresso  $x$  (perturbed physics ensemble). Questa procedura permette di tenere in considerazione tanto l'incertezza iniziale del sistema, quanto l'incertezza legata alle interazioni tra le principali componenti fisiche, chimiche e biologiche del sistema che influenzano la risposta climatica.

La distribuzione dei possibili valori di  $y$  che risulta dall'uso di diverse versioni dei GCM, con diversi set di valori di input adottati, viene definita come la distribuzione *a priori*. Successivamente, ad ognuno dei GCM e dei set di valori in input viene attribuito un peso in funzione della capacità mostrata nel riprodurre gli andamenti del clima osservati per

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

il 20° secolo. Questi pesi vengono, quindi, utilizzati per modificare la distribuzione *a priori* e ottenere la distribuzione finale, definita *a posteriori*, delle proiezioni climatiche.

Questo approccio permette di raccogliere sia la variabilità interna al sistema climatico, che l'inevitabile incertezza nella rappresentazione dei processi climatici da parte dei modelli di simulazione.

La metodologia descritta ha permesso di ottenere superfici probabilistiche dei possibili cambiamenti congiunti di temperatura media superficiale e precipitazione fino alla fine del secolo (Harris et al., 2010) . I dati sono riferiti alla griglia di punti del GCM HADCM3 del MOHC (Pope et al., 2000) e presentano una risoluzione spaziale di 2.5° di latitudine x 3.75° di longitudine che ricopre il territorio europeo. I cambiamenti congiunti delle due variabili sono espressi in termini di anomalie assolute di temperatura e variazioni percentuali di precipitazione rispetto al trentennio di riferimento 1961-1990. Le PDF sono state prodotte sulla base dei livelli di emissione, e conseguenti forzanti radiativi, ipotizzati dallo scenario di sviluppo socio-economico SRES A1B (Nakicenovic et al., 2000). Per ogni punto di griglia le PDF sono state prodotte con cadenza decennale dal 2020 al 2090 e rappresentano le variazioni medie del ventennio centrato sull'anno a cui si riferiscono. Per maggiore chiarezza, la PDF che si riferisce al 2060 rappresenta la distribuzione dei valori medi di cambiamento stimati per il ventennio 2050-2070.

Per questo studio, le proiezioni probabilistiche sono state fornite dall'Hadley Centre del Met-Office, per ogni punto di griglia e per ogni finestra temporale futura, come un insieme di 10000 coppie di possibili combinazioni di cambiamento nelle temperature medie e nelle precipitazioni annuali. Le 10000 coppie di valori sono state estratte in maniera casuale dalle superfici probabilistiche e ognuna di esse rappresenta una combinazione equiprobabile della possibile variazione congiunta delle due variabili climatiche. Nella figura 2.2 è riportata una rappresentazione grafica delle proiezioni climatiche probabilistiche in una generica cella del dominio. Le nubi di diverso colore rappresentano, ognuna, una diversa finestra temporale e sono costituite dalle 10000 possibili combinazioni previste di Tg e Pr per quel periodo.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

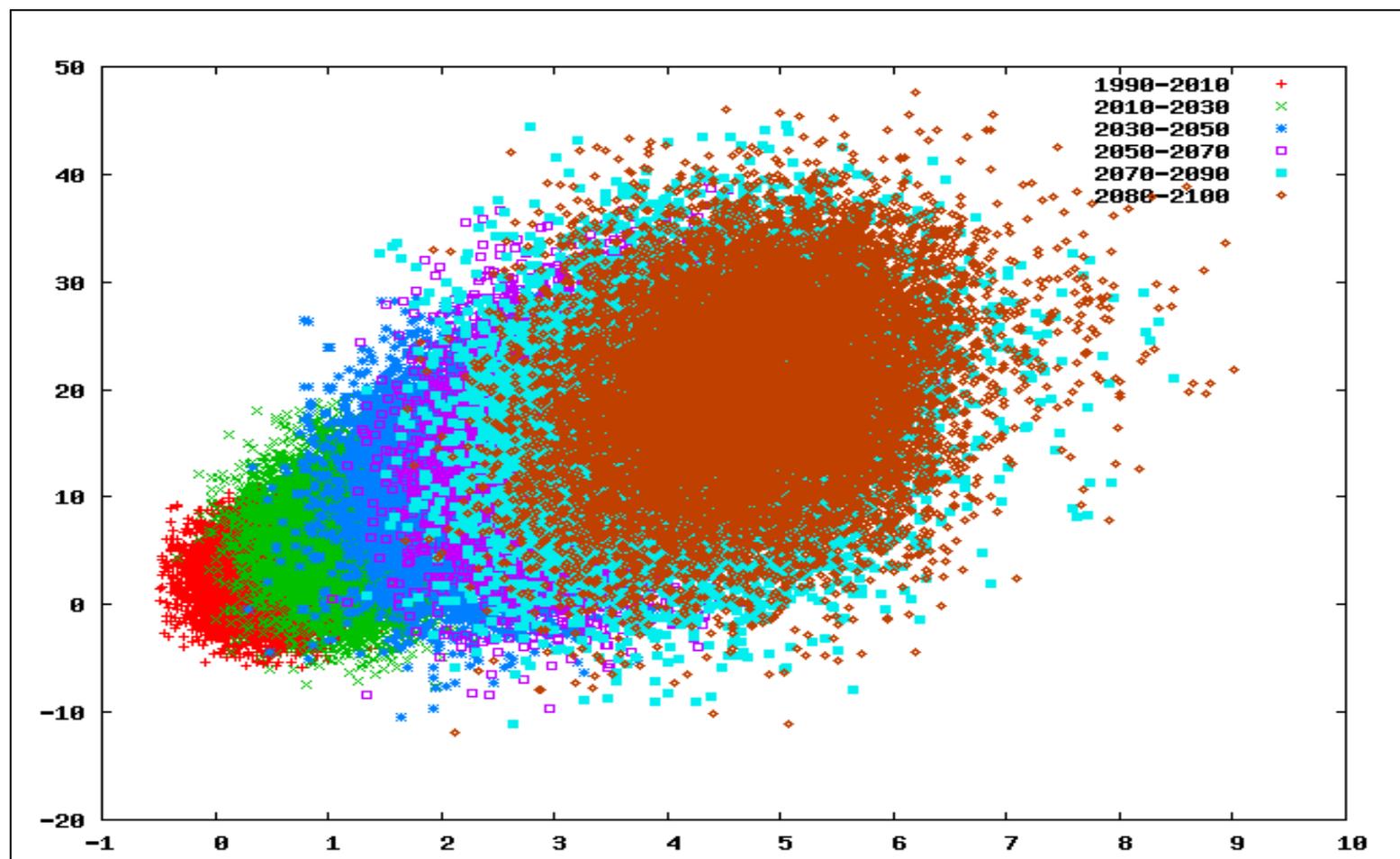


Figura 2.2: Esempio di proiezioni climatiche probabilistiche della distribuzione congiunta delle variazioni di Tg (in ascisse) e di Pr (in ordinata). Le variazioni di Tg, in termini assoluti, e quelle di Pr, in termini relativi, sono calcolate rispetto al periodo di riferimento 1961-1990. Le nubi di differente colore si riferiscono a periodi futuri diversi.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## 2.3 Il modello di impatto

Un modello è la rappresentazione semplificata di un sistema, o di parte di esso, che serve a simulare e a prevedere i suoi diversi comportamenti, che siano questi tecnici, operativi od economici (Bindi e Fibbi, 2003). In particolare un modello colturale è un insieme di relazioni di tipo logico-matematico fra parametri e variabili, che consente di descrivere, in forma semplificata e controllabile, i fenomeni legati alla fenologia e alla resa di una determinata coltura. A tal fine è necessario che il modello determini, con una certa accuratezza, alcune caratteristiche chiave dello sviluppo della coltura (Jamieson et al., 1998a), come:

- *i principali eventi fenologici* (ad es. fioritura, e maturità fisiologica), mediante una corretta descrizione della risposta fenologica ai diversi stimoli e fattori ambientali (temperatura, fotoperiodo, vernalizzazione);
- *la resa della coltura*, attraverso un'accurata predizione dello sviluppo fogliare e quindi della capacità della coltura di intercettare la radiazione, accumulare biomassa e ripartirla nelle diverse strutture della pianta;
- *l'utilizzo dell'acqua*, con una corretta valutazione dell'evapotraspirazione e del prelievo di acqua da parte della coltura;
- *l'uso dell'azoto*, descrivendo accuratamente i processi di mineralizzazione nel suolo, il prelievo da parte delle piante e la sua ripartizione nei diversi organi della pianta;
- *l'influenza delle carenze idriche e nutritive sulla crescita e lo sviluppo della coltura.*

### 2.3.1 Il Modello Sirius

In questo studio è stato adottato il modello di simulazione SIRIUS, sviluppato da Jamieson et al. (1998a). Questo è un modello colturale che simula lo sviluppo e la resa di una coltura di frumento. Il modello è in grado di determinare la resa giornaliera di biomassa come prodotto della quantità di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) intercettata dalla copertura vegetale per l'efficienza d'uso della radiazione (RUE). Al fine di evitare gli inconvenienti legati alla previsione del numero di cariossidi per unità di superficie, lo sviluppo della granella viene simulato assumendo che, in post-antesi, tutta la biomassa Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

prodotta ex-novo, più una certa proporzione di quella accumulata fino alla fioritura, venga traslocata nelle cariossidi in via di formazione. Sirius comprende anche un sotto-modello “suolo” che permette di determinare la distribuzione dell’acqua e dell’azoto lungo il profilo del terreno così da poterne valutare l’assorbimento da parte della coltura.

### Fenologia

Nella modellistica del frumento, una certa attenzione deve essere posta allo sviluppo fenologico e, in particolare, alla determinazione della data di antesi. In effetti, un errore nella stima di questo evento si traduce in una imprecisa valutazione della resa poiché lo sviluppo delle cariossidi viene simulato in un periodo diverso da quello reale e quindi, con differenti condizioni climatiche (Porter et al., 1993).

Sirius simula la fenologia del frumento suddividendo il ciclo biologico della coltura in sei fasi delle quali, in base a diversi criteri, ne determina la durata:

- *Pre-emergenza*: E' il periodo che intercorre tra la semina e l'emergenza della coltura; dipende dalla cv e viene calcolato dalla sommatoria termica delle temperature medie dell'aria.
- *Produzione fogliare*: La simulazione di questo stadio, che va dall'emergenza fino all'emissione della ligula della foglia bandiera, è una delle caratteristiche peculiari di Sirius. Il modello stima il numero finale di foglie sul culmo principale in funzione della risposta della coltura al fotoperiodo (Brooking et al., 1995) e alla vernalizzazione (Brooking, 1996; Robertson et al., 1996); la durata della fase viene poi determinata dal tasso di emissione fogliare il quale è proporzionale alla temperatura dell'apice vegetativo (Jamieson et al., 1995). Quest'ultima viene simulata dal modello assumendo che sia simile a quella della superficie del terreno, fino allo stadio di sviluppo Haun 4 (quarta foglia emersa), e successivamente, sia simile a quella della copertura vegetale (Jamieson et al., 1995).
- *Dalla comparsa della ligula dell'ultima foglia fino all'antesi*: La lunghezza di questa fase è calcolata dalla sommatoria termica della temperatura della copertura vegetale e, tipicamente, corrisponde a tre fillocroni (intervallo di tempo, espresso come sommatoria termica, intercorrente tra la comparsa di due foglie successive) (Brooking et al., 1995).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- *Dall'antesi all'inizio del riempimento della granella.* Similmente alla precedente, la durata di questa fase, pari ad un fillocrone, è stimata in base alla sommatoria termica della copertura vegetale.
- *Riempimento della granella:* Per lo svolgimento di questa fase, viene assunto che siano necessarie, in base alla cv, un certo numero di TU, calcolate in base alle temperature dell'aria.
- *Maturazione.* Dalla fine del riempimento delle cariossidi, il modello considera un ulteriore intervallo termico, calcolato dalla temperatura dell'aria, durante il quale la granella riduce il suo contenuto idrico (maturazione di raccolta).

La sommatoria termica necessaria al superamento delle singole fasi viene calcolata ponendo lo zero di vegetazione a 0°C. Sirius richiede come input i valori giornalieri di temperatura dell'aria, da cui è in grado di stimare la temperatura del suolo e quella della copertura vegetale mediante un algoritmo che considera il bilancio energetico delle due strutture.

#### *Determinazione del numero finale di foglie*

Da quanto visto finora, l'unica fase in cui il modello non utilizza intervalli costanti di TU è quella in cui viene simulata la produzione delle foglie. In effetti, secondo quanto riportato da Brooking et al. (1995), la vernalizzazione e la lunghezza del giorno influenzano l'epoca di fioritura per via del loro effetto sul numero finale di foglie sul culmo principale. Sirius è in grado di valutare la risposta della coltura a questi due fattori mediante la stima del numero di abbozzi fogliari. Tale valore può essere determinato direttamente dallo stadio fenologico della coltura, infatti il numero di primordi fogliari presenti nell'apice vegetativo è legato al numero di foglie emesse, ossia allo stadio di sviluppo della pianta espresso secondo la scala Haun (Kirby, 1990).

Di seguito vengono riportati schematicamente i principali aspetti che caratterizzano il modello di risposta fotoperiodica e di vernalizzazione in Sirius:

- le piante risultano insensibili al fotoperiodo fino a che il processo di vernalizzazione non viene completato.
- la vernalizzazione procede con velocità crescente al crescere delle temperature da 0°C a 15°C quindi subisce un calo repentino fino ad annullarsi a 17°C.

Temperature al di fuori di questa gamma non hanno effetto vernalizzante. Il

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

procedere del fenomeno viene descritto aggiornando quotidianamente un indice di vernalizzazione.

- Il completamento della fase si verifica quando l'indice di vernalizzazione raggiunge il valore di 1 oppure quando il numero di primordi fogliari nell'apice vegetativo eccede un determinato numero finale di foglie. Quest'ultimo valore si riduce con l'aumentare del tempo di esposizione alle temperature vernalizzanti.
- In risposta al fotoperiodo, un processo iterativo, a partire dallo stadio Haun 1.5, aggiorna quotidianamente la stima del numero finale di foglie fino a che questo non viene fissato definitivamente in base alla durata del giorno allo stadio di due foglie emerse dopo la differenziazione del primordio della foglia bandiera.
- Il numero massimo di foglie potenziale è definito come il numero di foglie ottenibile da un cv invernale cresciuta a temperature superiori a 17°C e in condizioni di giorno lungo. Il numero minimo di foglie potenziale è quello ottenuto da una cv vernalizzata prima dell'emergenza e cresciuta al caldo in condizioni di giorno lungo.

### Crescita biomassa totale

Il quantitativo totale di biomassa (escluse le radici) è il risultato dell'integrazione, a partire dal giorno dell'emergenza, del tasso di crescita giornaliero; questo, a sua volta, è il prodotto della PAR intercettata, e della efficienza d'uso della radiazione (RUE) (Monteith, 1977). Il valore massimo di RUE è compreso tra 2.2 e 2.5 g/MJ in funzione della latitudine. Infatti, è stato dimostrato che il valore di RUE cresce, a parità di radiazione globale, con l'aumento della radiazione diffusa; quindi a latitudini maggiori la RUE sarà più elevata. (Sinclair et al., 1992; Hammer e Wright, 1994). La quantità di PAR intercettata dipende dal valore della superficie d'area fogliare (LAI), secondo la legge di Lambert-Beer:

$$Q = PAR [1 - \exp(-k LAI)] \quad (2)$$

dove Q è la quantità di PAR intercettata e k è il coefficiente di estinzione della luce, che ha un valore fisso di 0.45 (Thorne et al., 1988), indipendentemente dalla presenza di stress idrici o azotati (Robertson e Giunta, 1994).

Il modello è in grado di valutare l'effetto sull'accumulo di biomassa di un incremento della concentrazione di anidride carbonica. L'effetto fertilizzante dell'incremento di CO<sub>2</sub>

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

viene simulato tramite un aumento lineare della RUE tale che per un raddoppiamento della concentrazione di CO<sub>2</sub> la RUE risulti incrementata del 30% (Jamieson et al., 2000)

Secondo quanto riportato da Jamieson et al. (1998a), l'errore introdotto da un'imprecisa valutazione del LAI, nella stima della radiazione intercettata, risulta significativo solo per valori di LAI inferiori a 3. Di conseguenza, è necessario che la simulazione sia effettuata con una certa precisione solo nella fase iniziale dello sviluppo fogliare. In Sirius l'andamento del LAI è suddiviso in quattro fasi principali:

- *Fase iniziale di espansione esponenziale*: In questa fase le risorse disponibili per l'espansione fogliare sono grosso modo proporzionali al LAI, e il tasso relativo di espansione fogliare è linearmente correlato alla temperatura per valori superiori a 0°C. Il modello utilizza un'approssimazione dell'integrale del tasso relativo di espansione:

$$LAI = g [\exp(h\tau) - 1] \quad (3)$$

dove  $\tau$  è la sommatoria termica dall'emergenza (T base 0°C) calcolata dalla temperatura della copertura vegetale,  $h$  e  $g$  sono ottenuti dalla regressione del logaritmo naturale del LAI in funzione della sommatoria termica. Questo stadio termina quando il LAI raggiunge un valore di 5 (intercettazione del 90%).

- *Fase di crescita lineare*: Durante questa fase il tasso di crescita fogliare è costante. Il valore di LAI presenta un incremento lineare in funzione della sommatoria termica passando da 5 al limite massimo, che in Sirius è posto pari a 8.5.
- *Fase costante*: Una volta raggiunto il valore massimo di LAI, il modello ammette che questo venga mantenuto tale fino all'antesi.
- *Diminuzione del LAI fino a zero*: In condizioni ottimali la durata termica di questa fase è pari al periodo compreso tra l'antesi e la fine del riempimento. Il modello è strutturato in maniera tale che questi due valori siano coincidenti, cosicché ogni stress che comporti un'accelerazione della senescenza fogliare determina anche una riduzione della fase di riempimento.

Come si può vedere, la sola fase che necessita di calibrazione è la prima, poiché tutte le altre sono direttamente legate allo sviluppo fenologico. In effetti, le diverse varietà differiscono tra di loro solo nelle fasi iniziali del loro sviluppo (Jamieson et al., 1998a).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### Crescita radicale

In Sirius le radici sono caratterizzate dalla loro espansione verticale lungo il profilo di suolo. Il modello considera che il loro accrescimento avvenga ad un ritmo giornaliero di 1.5 mm/°C, sulla base delle temperature dell'aria (Porter, 1993); inoltre si assume che le radici continuino ad estendersi fino a che non raggiungono la massima profondità di suolo oppure si verifica l'antesi. Per garantire un adeguato rifornimento idrico, la zona radicale viene stimata da 15 a 20 cm più profonda della lunghezza delle radici.

### Crescita della granella

La crescita della granella viene simulata ammettendo che tutta la biomassa prodotta dopo l'antesi si accumuli nelle cariossidi in via di formazione. In aggiunta, si assume che il 25% della biomassa già presente alla fioritura venga comunque trasferito alle cariossidi. A tale scopo il programma utilizza un tasso di traslocazione costante, ricavato sulla base della sommatoria termica necessaria al raggiungimento della fine della fase di riempimento (Jamieson, 1989).

### Dinamiche dell'acqua nel suolo

In Sirius il suolo è rappresentato come una successione di strati di 5 cm le cui caratteristiche chimico-fisiche possono variare da uno strato all'altro. Similmente al modello sviluppato da Amir e Sinclair (1991), l'acqua presente nel suolo viene descritta in funzione della capacità delle piante di estrarla. Si distinguono:

- *Acqua indisponibile* (potenziale idrico  $\psi < -1.5$  MPa): è l'acqua presente nel terreno al di sotto del punto di appassimento permanente. Le piante non sono in grado di assorbirla a causa della forza eccessiva con cui viene trattenuta dal terreno. L'azoto in essa disciolto non può essere utilizzato dalla coltura.
- *Acqua non mobile* ( $-1.5$  Mpa  $< \psi < -0.03$  Mpa): E' la quantità di acqua compresa tra il punto di appassimento permanente e la capacità di campo; nel suo complesso costituisce il volume di acqua disponibile (AWC). La metà di questa è considerata prontamente utilizzabile (RAW) e può essere prelevata dalle piante senza limitazione; della restante metà (TAW) solo il 15% può essere estratto ogni giorno.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- *Acqua mobile* ( $\psi > 0.03\text{MPa}$ ): compresa tra la capacità di campo e la saturazione. Questa quantità di acqua può muoversi per gravità attraverso i diversi strati di terreno e può essere facilmente estratta dalle piante.

Il modello considera che una frazione dell'acqua apportata con le precipitazioni viene intercettata dalle foglie e l'evaporazione di questa, fino a che non si esaurisce, sostituisce la traspirazione. L'acqua che giunge al suolo ricostituisce quella persa, a cominciare dalla frazione non mobile. L'eventuale quantità eccedente passa allo strato successivo e il processo continua finché l'acqua non si esaurisce o l'ultimo strato di suolo non è saturo; il resto si perde per drenaggio profondo.

### Evapotraspirazione

L'evapotraspirazione giornaliera viene calcolata come somma della traspirazione e della evaporazione da suolo.

La traspirazione massima è stimata in base al tasso di evapotraspirazione potenziale di Penman (1948) così come formulato da French e Legg (1979). Laddove non siano disponibili i dati di velocità del vento e umidità viene utilizzata l'equazione di Priestley e Taylor (1972). L'acqua necessaria a soddisfare la richiesta traspirativa è estratta dalla zona radicale; per prima viene intaccata la frazione di acqua mobile, successivamente viene prelevata l'AWC e, all'interno di questa, la RAW prima della TAW.

Le restrizioni alla traspirazione sono associate all'incompleta copertura del terreno da parte della coltura e al deficit idrico nel suolo ( $M_d$ ), calcolato come differenza tra il volume di acqua presente nella zona radicale e la AWC. La formula utilizzata è la seguente:

$$E_p = E_p [1 - \exp(-k) \text{LAI}] F_w \quad (4)$$

in cui  $E_p$  è il tasso di evapotraspirazione potenziale e  $F_w$  è un fattore di riduzione che rende conto di  $M_d$ . Più in particolare,  $F_w$  assume valore 1 fino a quando  $M_d$  è inferiore al 50% di AWC (Tanner e Ritchie, 1974), quindi decresce linearmente con l'aumentare del deficit idrico, secondo la formula:

$$F_w = 1 - [(M_d - 0.5 \text{AWC}) / 0.5 \text{AWC}] \quad \text{per } M_d \geq 0.5 \text{AWC} \quad (5)$$

L'evaporazione dal suolo è limitata al volume di acqua, mobile e immobile, dei primi otto strati di terreno ed è stimata in base al bilancio energetico del suolo.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### Bilancio e prelievo dell'azoto

La dinamica dell'azoto nel terreno viene simulata assumendo che gli apporti dell'elemento provengano dalla concimazione e dalla mineralizzazione dell'azoto organico, mentre le perdite siano dovute ai processi di denitrificazione e alla lisciviazione.

Il modello considera che l'azoto apportato con le concimazioni sia tutto in forma nitrica. Il tasso di mineralizzazione netta viene calcolato in funzione della quantità di azoto organico e in relazione alla temperatura e all'umidità del suolo (Aslyng e Hansen, 1982; Addiscott, 1983).

La quantità di azoto che passa nella soluzione circolante viene determinata in base alle precipitazioni, all'umidità del terreno e alla temperatura (Aslyng e Hansen, 1982); si considera che ogni giorno vada in soluzione non meno del 5% del totale. L'elemento si distribuisce liberamente nei diversi volumi di acqua e si muove passivamente, tra gli strati, in soluzione con l'acqua mobile. Inoltre, una frazione dell'azoto in soluzione viene persa per denitrificazione.

La richiesta di azoto da parte delle piante viene simulata in funzione della differenza tra l'attuale concentrazione di azoto nella coltura e la massima concentrazione ammessa; quest'ultima si considera che decresca in maniera esponenziale con l'età delle piante (Porter, 1993). L'azoto può essere estratto esclusivamente dalle fasi mobile e immobile dell'acqua, fin quando la sua concentrazione, nella soluzione circolante, supera un valore minimo al di sotto del quale le piante non sono in grado di prelevarlo. In risposta al deficit idrico il tasso di prelievo viene limitato dal fattore  $F_w$ , utilizzato per ridurre la traspirazione.

### Traslocazione dell'azoto nella granella

Per determinare l'accumulo di azoto nelle cariossidi in via di sviluppo vengono utilizzati: un tasso di traslocazione costante rispetto alla sommatoria termica (Blacklow e Incoll, 1981) e l'indice di raccolto azotato (NHI), definito come il rapporto tra la quantità di azoto nella granella e quella presente in tutta la biomassa epigea. Secondo uno studio condotto da Spiertz e Vos (1985), il valore massimo di NHI per il frumento è circa 0.8.

Il modello considera che l'NHI cresca linearmente in funzione della sommatoria termica, variando da zero, all'inizio dello sviluppo, fino ad arrivare a 0.8 quando sono state accumulate il 75% delle TU necessarie al completamento del riempimento della granella. In Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

tal modo, qualunque fattore che causi una riduzione della fase di riempimento superiore al 25% determina anche una diminuzione dell'accumulo di azoto nelle cariossidi.

### Effetti delle carenze idriche e azotate

Le limitazioni nella disponibilità di acqua e di azoto agiscono attraverso:

- la riduzione del tasso di incremento del LAI durante la fase di espansione fogliare (fasi 1 e 2 dello sviluppo del LAI)
- l'aumento del tasso di senescenza fogliare
- la riduzione della RUE, nel caso di forti carenze idriche o nutritive.

La carenza idrica viene espressa dal fattore di riduzione  $F_w$ , di cui si è già discusso.

Un analogo fattore  $F_n$  viene utilizzato per valutare la carenza di azoto nella coltura:

$$F_n = 2 [(N_{\text{crop}} - N_{\text{min}})/(N_{\text{max}} - N_{\text{min}})] \quad (6)$$

dove  $N_{\text{crop}}$  rappresenta la concentrazione di azoto nella pianta,  $N_{\text{min}}$  e  $N_{\text{max}}$  indicano, rispettivamente, la minima e la massima concentrazione di azoto ammessa. Il fattore 2 permette di considerare il lussureggiamento della vegetazione in caso di disponibilità azotate che eccedano quanto strettamente richiesto per la crescita (Porter, 1993).

Per simulare l'effetto degli stress sul LAI, il modello adotta un fattore di riduzione dell'espansione fogliare ( $F_l$ ) che, a sua volta, utilizza due variabili  $F_{lw}$  e  $F_{ln}$ , rispettivamente definite in relazione al deficit idrico e azotato:

$$F_{lw} = -0.5 + 1.5 F_w \quad (7)$$

$$F_{ln} = -0.5 + 1.25 F_n (F_n + 0.15) \quad (8)$$

Le due variabili sono concepite in maniera tale da assumere un valore negativo in presenza di deficit eccessivi. In tal caso il valore di LAI subisce una riduzione, in quanto le perdite dovute ad un aumento della senescenza non vengono controbilanciate dalla neoformazione di tessuto verde.

Quando la fase di espansione è terminata, il LAI risulta influenzato solo dalla senescenza fogliare. Per simulare l'accelerazione della senescenza in risposta ad uno stress, è stato introdotto un fattore  $F_{lk}$  utilizzato per ridurre la superficie fogliare durante la fase 3 e accelerare il declino del LAI durante la fase 4.  $F_{lk}$  è definito in termini di  $F_l$ : il suo valore è 1 finché  $F_l$  non scende sotto 0.7, quindi incrementa linearmente fino ad un massimo di 1.5 quando  $F_l$  è uguale a 0.4.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Similmente a quanto visto per il LAI, la RUE viene ridotta da un fattore  $F_b$  definito in termini di  $F_n$  e  $F_w$  per mezzo di:

$$F_{bw} = 2F_w \quad (9)$$

$$F_{bn} = 0.4 + 4.0 F_n \quad (10)$$

## 2.4 Calibrazione e validazione di SIRIUS

Il modello SIRIUS per poter riprodurre lo sviluppo di una determinata varietà necessita di una serie di informazioni riguardanti alcune caratteristiche tipiche della varietà oggetto della simulazione. Il set completo di parametri varietali necessari al modello è dato da:

- TTSOWEM: unità termiche (sommatoria dei valori giornalieri di temperatura media) che intercorrono tra la data di semina e l'emergenza;
- TTANBGF: unità termiche tra l'antesi e l'inizio della fase di riempimento della granella;
- TTANEG: unità termiche tra l'antesi e la fine della fase di riempimento della granella;
- TTEGFMAT: unità termiche tra la fine della fase di riempimento e la maturità di raccolta;
- CEPT: intercetta dell'equazione che descrive lo sviluppo del LAI (valore iniziale di LAI);
- SLOPE: tasso relativo di crescita del LAI;
- VERNY: coefficiente di vernalizzazione. Questo valore è posto pari ad 1 per le varietà invernali, mentre è 0 per quelle primaverili (es. frumento duro);
- PHYLL: fillocrone. Rappresenta, in unità termiche, il tempo che intercorre tra la comparsa di due foglie successive, ossia per lo sviluppo completo di una foglia;
- AMNLFNO: numero minimo assoluto di foglie che la varietà può produrre;
- SLDL: risposta della produzione di foglie alla durata del giorno;
- VAI: risposta del tasso di vernalizzazione alla temperatura [ $^{\circ}\text{Cdays}$ ]-1. Questo parametro viene tralasciato in una varietà primaverile;

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- VBEE: tasso di vernalizzazione a temperatura 0°C, 1/days. Questo parametro viene tralasciato in una varietà primaverile;
- AMXLFNO: numero massimo assoluto di foglie che la varietà può produrre;
- EXTINC: coefficiente di estinzione della PAR;
- GenProteinConc: concentrazione massima delle proteine nella granella;
- ALPHAMAX: massima grandezza potenziale della foglia bandiera m<sup>-2</sup>;
- H: distanza tra la base della spiga e il terreno, mm.

Il modello, inizialmente sviluppato per la simulazione dello sviluppo del frumento tenero, è stato calibrato in precedenza per la varietà di frumento duro Cresco, sulla base dei dati raccolti in una sperimentazione di pieno campo. L'esperimento, volto a valutare la risposta quanti-qualitativa del grano duro in relazione alla data di semina e alla concimazione azotata, è stato condotto presso l'Università degli Studi di Firenze nelle annate agrarie 2002-2003 e 2004-2005. Il modello si è dimostrato in grado di riprodurre in maniera soddisfacente la variazione nelle dinamiche di sviluppo delle foglie, degli steli e dell'accumulo di sostanza secca e di azoto nelle cariossidi in relazione alle condizioni sperimentali (Ferrise et al., 2010).

#### **2.4.1 Calibrazione di SIRIUS per una varietà generica di frumento duro**

Per gli scopi di questo lavoro, il modello è stato riadattato per poter riprodurre lo sviluppo e la resa di una generica cv di frumento duro. La calibrazione è stata effettuata modificando i parametri varietali necessari al modello, sulla base dei dati di fenologia e resa osservati in tre località del nord (Milano, 9.3° E, 45.4° N), centro (Roma, 12.2° E, 41.8° N) e sud (Foggia, 15.7° E, 41.5° N) Italia. I dati relativi allo sviluppo della coltura, alle proprietà del suolo e alla gestione della coltura (es. data di semina e quantità e modalità di distribuzione della concimazione azotata) sono stati forniti dall'Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura per il periodo 1999-2003 per le stazioni sperimentali di Roma e Milano e per il periodo di 2000-2004 per la stazione di Foggia. Per ognuna delle località, i valori giornalieri di Tn, Tx, Pr e radiazione (Rd) sono stati ottenuti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

I parametri varietali relativi alla calibrazione della cv Creso, sono stati modificati mediante un'analisi di sensibilità fino a trovare la combinazione di parametri che maggiormente erano in grado di riprodurre la fenologia e le rese osservate. I parametri interessati dall'analisi sono stati le unità termiche per la fase di emergenza per quella di riempimento della cariosside e per il fillocrone, il numero minimo e massimo di foglie.

L'analisi è stata svolta modificando, uno per volta, i parametri varietali nell'intorno dei valori individuati per la cv Creso. La capacità delle diverse combinazioni di parametri nel riprodurre i dati osservati è stata valutata calcolando il valore dell'errore quadratico medio (RMSE) e del coefficiente di Pearson ( $r$ ).

#### **2.4.2 Validazione di SIRIUS a scala regionale**

Una volta calibrato, allo scopo di valutare la capacità del modello nel simulare le rese a scala regionale, SIRIUS è stato utilizzato per eseguire delle simulazioni su 6 località variamente distribuite nell'area del Mediterraneo. L'abilità del modello nel riprodurre le rese a tale livello di scala è stata valutata tramite il calcolo di RMSE e di  $r$ , ottenuti dal confronto dei risultati delle simulazioni con le rese osservate. La scelta delle località è stata fatta in base alla disponibilità dei dati di resa osservati, con cui confrontare i risultati delle simulazioni di SIRIUS, e rappresentando tutta l'area di studio. Le rese osservate di frumento duro sono state estratte dal database dell'Ufficio Statistico della Commissione Europea (EUROSTAT). Il database dell'EUROSTAT raccoglie i dati di produzione di svariate colture agricole, aggregati a livello regionale, per diverse aree dell'Europa e per diversi periodi temporali. In generale, le serie temporali più lunghe, a nostra disposizione, coprivano il periodo 1989-2004, ma in alcuni casi erano limitate a 6 anni.

Per alimentare il modello, le serie complete di dati meteorologici riferite ai periodi e alle aree considerate, sono state estratte dall'archivio del progetto MARS-JRC. Questo data-set è stato prodotto, nell'ambito dell'omonimo progetto, attraverso una procedura di interpolazione spaziale dei dati provenienti da 256 stazioni meteorologiche di riferimento sparse su tutto il territorio europeo. I dati giornalieri di  $T_n$ ,  $T_x$ ,  $Pr$  e radiazione ( $R_d$ ) per il periodo 1975-2005 sono riferiti ad una griglia di punti con risoluzione spaziale di 50Km x 50 Km (Beek et al., 1992; van der Voet et al., 1993).

Le informazioni riguardanti le principali pratiche agricole, in particolare la data di semina, le quantità e la modalità di distribuzione della concimazione azotata, non sono disponibili ad un tale livello di aggregazione. Per poter effettuare le simulazioni, la data Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

ottimale di semina è stata determinata sulla base di un criterio climatico. Nel periodo compreso tra il primo Ottobre e il 15 Febbraio, la data di semina veniva fissata quando la Tg giornaliera risultava  $<13^{\circ}\text{C}$  e le piogge  $<2\text{mm}$  per almeno 5 giorni consecutivi. Con riferimento alla concimazione azotata, è stato ipotizzato che venisse fornito un quantitativo di 120 Kg di azoto ad ettaro, distribuito per un terzo durante la fase di accostamento (stadio Zadoks 21, Zadoks et al., 1974) e per 2/3 all'inizio della levata (stadio Zadoks 31, comparsa del primo nodo).

Per ogni stazione è stato creato un profilo di suolo in base ai dati forniti da *ESDBv2 Raster Archive* derivati dal *Database Europeo dei Suoli versione 2 (European Commission and the European Soil Bureau Network, CD-ROM, EUR 19945 EN)*.

## **2.5 Sviluppo di un emulatore del modello di impatto**

Nonostante la metodologia delle superfici di risposta riduca notevolmente il tempo di calcolo rispetto all'approccio delle simulazioni multiple, l'applicazione su un'area piuttosto vasta e per un certo numero di finestre temporali, costituisce, comunque, un notevole impegno di risorse. Allo scopo di ridurre i tempi e la potenza di calcolo necessari a condurre l'analisi, è stato sviluppato un emulatore del modello SIRIUS, che ha previsto l'utilizzo di una rete neurale artificiale (ANN). Il modello SIRUS è stato utilizzato per produrre un ampio database della risposta produttiva del frumento duro a diverse condizioni climatiche e gestionali. Il database, quindi, è stato usato per l'allenamento e la validazione della ANN.

### **2.5.1 Le reti neurali**

Le reti neurali sono delle particolari strutture matematiche in grado di definire, a partire dai dati sperimentali che sono loro forniti come esempi, una mappa delle relazioni intercorrenti tra le grandezze coinvolte in un certo fenomeno e la grandezza che quantifica il fenomeno stesso (Jorgensen e Bendoricchio, 2001). In altri termini un modello neuronale, come un modello formulistico, fornisce per ogni insieme di valori delle grandezze di *input*, il corrispondente valore della grandezza di *output*. Rispetto ad altre tecniche metamodellistiche, le ANN hanno il vantaggio di descrivere le relazioni intercorrenti tra le variabili in ingresso e in uscita, senza una conoscenza a priori dei legami tra le variabili

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

stesse. Sono inoltre capaci di individuare le interazioni e le risposte non-lineari esistenti tra le variabili considerate (Batchelor et al., 1997).

Le reti neurali sono costituite da unità elementari di calcolo dotate di una piccola quantità di memoria (neuroni) che sono connesse tra loro da canali di comunicazione (sinapsi) (McClelland *et al.*, 1986a, b).

In generale i neuroni sono organizzati in strati: alcuni di essi ricevono segnali dall'esterno (neuroni dello strato di ingresso), altri hanno solamente compiti di elaborazione (neuroni dello strato intermedio) e infine altri ancora hanno il compito di fornire all'esterno (neuroni dello strato di uscita) i valori di una data grandezza, funzione delle grandezze in ingresso (Kartalopoulos, 1996).

Tra le reti neurali più estesamente applicate sono quelle a più strati con propagazione del segnale dai neuroni di ingresso verso i neuroni di uscita (*Multi layer feed-forward networks* MLFF). Una generalizzazione delle MLFF sono le reti dinamiche come le *Recurrent Neural Networks* (RNN) che funzionano in modo ricorrente cioè legando uno o più neuroni dello strato di output ad uno o più neuroni input dello stesso o del precedente strato (intermedio).

In una prima fase (detta di apprendimento) vengono forniti alla rete degli esempi (training set): i valori delle grandezze di ingresso con i valori di uscita desiderati (target). Basandosi sugli esempi forniti, la rete riesce a costruirsi un modello interno delle relazioni tra le grandezze che partecipano a un dato fenomeno, questa caratteristica consente di evitare la definizione a priori di un modello analitico da adattare ai dati sperimentali. Successivamente, su un insieme di esempi (validation set), diverso da quello usato nella fase di apprendimento, viene controllata la capacità di generalizzare della rete neurale (fase di validazione). Terminate le fasi di apprendimento e di test è sufficiente introdurre i valori di input per ottenere i valori di output (fase operativa) (Kosko, 1992; Rumelhart et al., 1986).

### **2.5.2 Preparazione del dataset per l'allenamento**

Per poter allenare la rete neurale, il modello SIRIUS è stato utilizzato per condurre un'analisi di scenario su alcune celle del dominio. Al fine di prendere in considerazione la variabilità climatica della regione oggetto di studio, tutte le celle del data-set MARS-JRC, appartenenti all'area di studio, sono state raggruppate in 9 classi omogenee. Il

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

raggruppamento è stato eseguito mediante una *cluster analysis* sulla base dei valori medi trentennali di Tg e Pr annuale, invernale e primaverile.

La cluster analysis è una tecnica che permette di raggruppare gli oggetti di un dato insieme in classi omogenee, non definite a priori. Alla fine del raggruppamento, gli oggetti appartenenti ad una stessa classe presenteranno, tra loro, maggiori similitudini rispetto agli oggetti assegnati alle altre classi. Esistono due tecniche principali per la suddivisione degli oggetti in classi: tecniche divisive e gerarchiche (Kauffman e Rousseuw, 1990). Le tecniche divisive permettono la suddivisione degli oggetti iniziali in classi distinte. Ogni oggetto viene attribuito ad una, e solo una, classe. Le tecniche gerarchiche, invece, attribuiscono gli oggetti a delle classi, che, a loro volta, vengono raggruppate in classi di ordine superiore, sempre più grandi, fino ad una unica classe finale che le contiene tutte. In questo studio è stata adottata la tecnica divisiva che utilizza l'algoritmo *K-Means* inclusa nel software statistico *R* (R Development Team, 2006).

All'interno di ognuna delle 9 classi identificate, è stata, quindi, selezionata una cella sulla quale condurre l'analisi di scenario. Nella **Tabella 2.1** sono riportate le celle selezionate, la localizzazione geografica e i valori centrali delle variabili meteorologiche delle classi di appartenenza.

**Tabella 2.1: Localizzazione geografica dei 9 punti di griglia selezionati per effettuare l'analisi di scenario necessaria a produrre il dataset di allenamento della ANN. Per ogni punto, sono riportati i valori centrali di Tg e Pr annuali, invernali e primaverili delle classi climatiche di appartenenza.**

	Lat N	Lon E	Altitudine (m s.l.m.)	Temperature (°C)			Precipitazioni (mm)		
				Annual	Winter	Spring	Annual	Winter	Spring
<b>Southern Italy (Sicily)</b>	37.24	14.91	271	17.1	10.4	18.6	429	163	50
<b>Turkey (Aydin)</b>	37.51	27.54	273	17.1	10.7	18.5	625	231	85
<b>Central Greece (Thessalia)</b>	39.29	22.11	304	15.7	9.1	17.5	521	144	104
<b>North-eastern Spain (Aragon)</b>	41.12	0.34	312	16.1	9.9	17.7	360	92	88
<b>Central Italy (Lazio)</b>	41.87	12.31	60	15.9	9.6	17.3	827	252	133
<b>North-western Spain (Galicia)</b>	43.27	-8.13	316	14.2	9.8	15.0	1592	453	322
<b>Central France (Midi-Pyrenees)</b>	44.43	2.38	517	13.4	7.8	15.0	1047	263	239
<b>North-western Italy (Piedmont)</b>	44.62	8.05	349	12.7	5.8	15.4	869	172	227
<b>North-eastern Italy (Veneto)</b>	45.05	11.23	10	13.9	7.4	15.9	690	155	163

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Per ognuna delle celle selezionate, sono state simulate le rese di frumento duro per diverse combinazioni di temperatura, pioggia, CO<sub>2</sub>, concimazione azotata e capacità idrica del suolo (SWC).

Gli scenari climatici sono stati creati modificando il clima del periodo di riferimento (1975-2005) con variazioni annuali di temperatura (7 livelli, da -2°C a +10°C) e di precipitazione (6 livelli, da -60% a +40%). Per ognuno degli scenari climatici ottenuti sono state effettuate le simulazioni con SIRIUS utilizzando 5 livelli di concentrazione della CO<sub>2</sub> (da 350 a 750ppm), 3 diversi tipi di suolo (leggero, medio e pesante) e 3 livelli di concimazione azotata (110, 170 e 230 Kg ha<sup>-1</sup>). Per quanto riguarda la SWC, sono state adottate tre tipologie di suolo con disponibilità crescente della capacità idrica potenziale (

Tabella 2.2). Ad ogni classe di suolo è stata attribuita una SWC calcolata come differenza tra il contenuto idrico a capacità di campo e quello relativo al punto di appassimento, per una profondità di 1m. Le proprietà idrologiche del suolo sono state calcolate a partire dai valori di tessitura utilizzando le equazioni descritte da Campbell (Campbell, 1985).

**Tabella 2.2: Caratteristiche dei suoli usati per creare il dataset di allenamento della ANN. Il contenuto idrico potenziale si riferisce ad una profondità di 1m.**

	Classi di suolo		
	Leggero	Medio	Pesante
<b>Sabbia %</b>	92	37	7
<b>Argilla %</b>	5	20	8
<b>Capacità di campo (vol%)</b>	13	27	31
<b>Punto di appassimento (vol %)</b>	6	12	10
<b>Contenuto idrico potenziale per 1m (mm)</b>	70	140	210

Con riferimento alla gestione della coltura, l'epoca di semina è stata determinata adottando un criterio climatico. La data di semina è stata fissata quando, a partire dal primo ottobre e non oltre il 15 febbraio, si presentano almeno 5 giorni consecutivi con Tg inferiori

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

a 13°C e Pr minori di 2mm. La concimazione azotata è stata somministrata per 1/3 durante l'accestimento e per 2/3 all'inizio della levata.

Per ognuna delle 17010 combinazioni risultanti (7 Temp x 6 Prec x 5 CO<sub>2</sub> x 3 suoli x 3 livelli di concimazione x 9 punti di griglia), gli output di SIRIUS sono stati utilizzati per calcolare le rese medie trentennali che, a loro volta, sono state impiegate per l'allenamento della rete neurale.

### **2.5.3 L'allenamento della rete neurale**

Per riprodurre le rese medie trentennali calcolate dal modello meccanicistico è stata utilizzata una rete neurale multilivello ricorrente (multi-layer perceptron con configurazione feedback). Questa struttura è formata da elementi processanti (strati e neuroni) che sono dotati di funzione di trasferimento non lineare (sigmoide logaritmica), con connessioni in retroazione (feedback o ricorrente), per l'allenamento supervisionato, basate sull'algoritmo della *back-propagation* descritto da Rumelhart et al. (1986). Per ogni coppia input-output della rete è calcolato un errore in funzione della differenza tra output della rete e output desiderato. I pesi di connessione sono modificati in base alla derivata parziale della funzione d'errore rispetto ai singoli pesi, finché l'errore complessivo, per ogni coppia I/O inviato alla rete assume un valore basso accettabile.

Le variabili di input della ANN (predittori) sono state selezionate in base all'approccio suggerito da Olesen (2007). Sono state scelte 5 variabili con l'intento di legare le rese simulate da SIRIUS alle condizioni climatiche, al suolo e alla concimazione azotata della coltura:

- concentrazione di CO<sub>2</sub>, in ppm
- contenuto idrico potenziale del suolo (SWC), calcolato come differenza tra il contenuto idrico a capacità di campo e quello al punto di appassimento, in mm
- livello di concimazione azotata, in Kg ha<sup>-1</sup>
- Tg (AMJ): temperatura media primaverile (Aprile, Maggio, Giugno)
- Pr (AMJ): precipitazione cumulata primaverile.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Inizialmente sono stati considerati anche i valori di temperatura e precipitazioni delle diverse stagioni, ma quelli relativi alla primavera hanno permesso le performance migliori della rete neurale nell'emulazione del modello SIRIUS. L'esclusione delle variabili climatiche, concernenti le altre stagioni, non ha influito sull'accuratezza delle previsioni della ANN, permettendo, contemporaneamente, un notevole risparmio, in termini di tempo e potenza di calcolo, durante la fase di allenamento.

Una rappresentazione schematica della struttura della ANN utilizzata è mostrata nella figura 2.3; si può vedere come ognuna delle 5 variabili di input sia connessa con 20 nodi nello strato nascosto e come questi ultimi, a loro volta, siano connessi con la variabile di output formando una rete a 3 strati. Il programma utilizzato per calcolare la rete neurale è stato Qnet97 per Windows, sviluppato dalla Vesta Service.

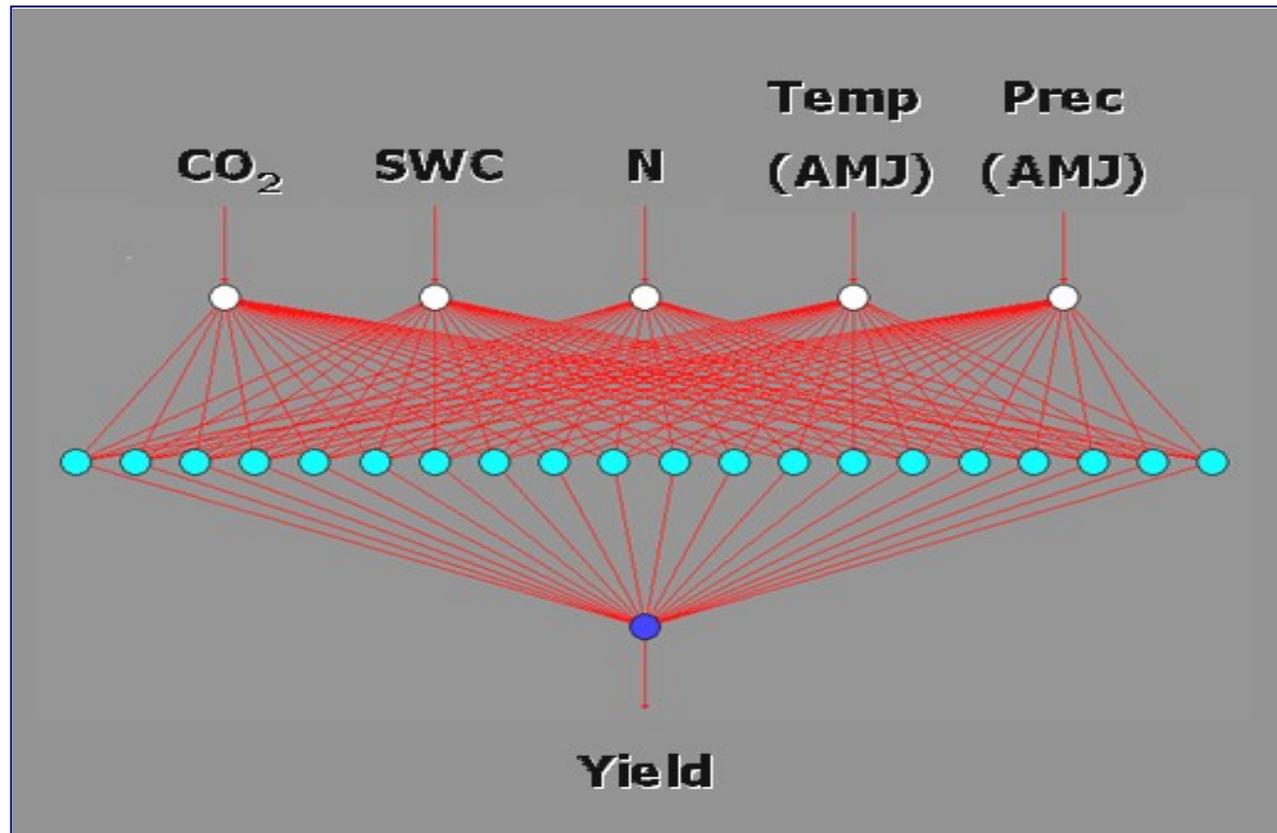
#### **2.5.4 Validazione della rete neurale**

Come per ogni altro modello statistico, l'ANN una volta allenata (calibrata), deve essere testata (validazione) utilizzando un insieme di dati diverso da quello usato nella fase di apprendimento. A questo scopo, l'80% dell'insieme di dati prodotto da SIRIUS (13608 combinazioni su 17010 totali) è stato selezionato casualmente e fornito alla rete per la fase di allenamento. Il restante 20% è stato utilizzato come dataset indipendente sul quale testare la rete, una volta terminato l'apprendimento.

In aggiunta, è stato effettuato un controllo della capacità previsionale della rete su un punto di griglia diverso da quelli utilizzati per la generazione dei dati per l'allenamento. Il punto selezionato è situato nel sud della Francia (Lat 43.65 N, Lon 4.96 E, Altitudine 80m s.l.m.). I dati climatici sono stati estratti dal dataset MARS-JRC per il periodo 1975-2005. Sono stati generati 40 diversi scenari ottenuti alterando i dati meteorologici del periodo di riferimento per 5 livelli di Tg (da 0°C a +8°C) combinati con 4 livelli di Pr (da -40% a +20%) e 2 livelli di CO<sub>2</sub> (350ppm e 550ppm). Il contenuto idrico potenziale è stato fissato a 125mm e la concimazione azotata fornita è stata di 170 Kg ha<sup>-1</sup> di azoto.

I valori in output della rete neurale sono stati confrontati con quelli del modello SIRIUS e l'accuratezza delle simulazioni è stata valutata mediante il calcolo del RMSE e del coefficiente di Pearson.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 2.3:** Architettura della rete neurale utilizzata per l'emulazione degli output di SIRIUS (Yield). La rete ha una struttura a tre strati di cui uno nascosto (nodi azzurri). Le variabili in ingresso sono: la concentrazione atmosferica di  $CO_2$ , il contenuto idrico potenziale del suolo (SWC), il livello di concimazione azotata (N), le temperature medie primaverili (Temp(AMJ)) e le precipitazioni cumulate primaverili (Prec (AMJ)).

## 2.6 Creazione delle superfici di risposta

Una volta allenata, la rete neurale è stata utilizzata per costruire le superfici di risposta (SR) della resa media di lungo periodo del frumento duro. Per ognuno dei punti di griglia dell'area oggetto di studio e per ogni intervallo temporale futuro, sono state create le SR della resa in funzione della variazione media annuale di temperatura, di precipitazione e di concentrazione della CO<sub>2</sub>. I dati di suolo e di concimazione azotata, fissata a 170 Kg ha<sup>-1</sup> di azoto, sono stati mantenuti costanti in tutte le simulazioni.

I dati meteorologici utilizzati per l'analisi sono stati estratti dal data-set E-Obs (risoluzione spaziale 25Km x 25Km) e come periodo di riferimento è stato scelto il trentennio 1961-1990, rispetto al quale sono state calcolate le anomalie congiunte di temperatura e pioggia che costituiscono le proiezioni probabilistiche per il futuro. Per abbracciare tutta la variabilità delle proiezioni climatiche future, le superfici sono state generate modificando la climatologia del periodo di riferimento con variazioni di temperatura media annuale nell'intervallo da -2°C a +10°C e variazioni delle precipitazioni da -60% a +40%. Le variazioni di temperatura e precipitazione sono state applicate uniformemente senza considerare possibili alterazioni della variabilità interstagionale osservata per il periodo presente.

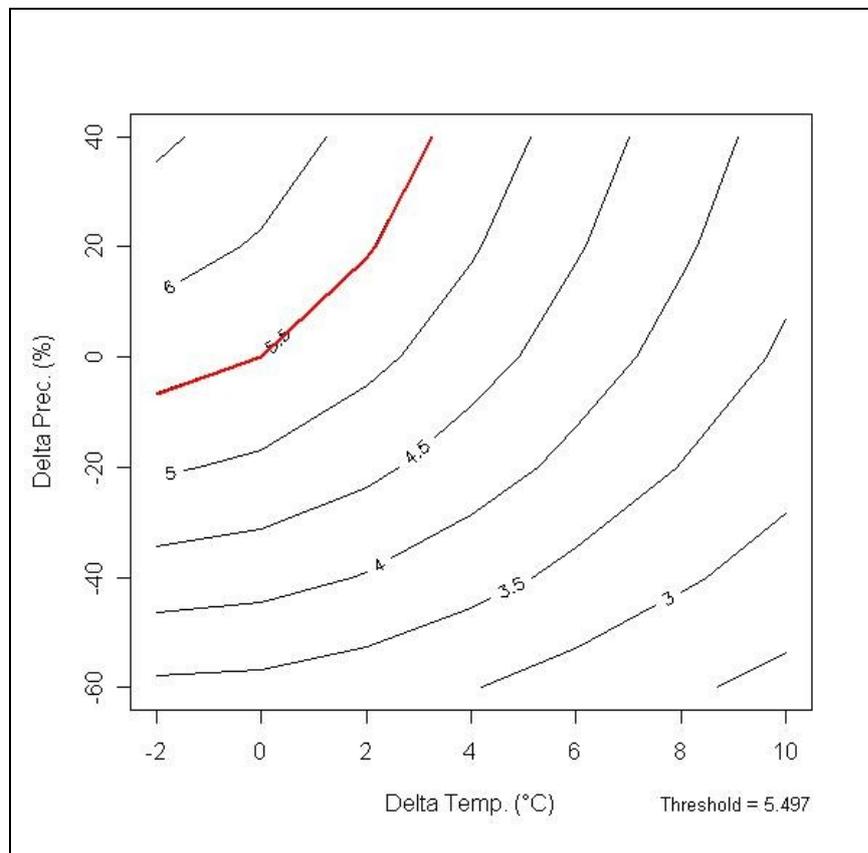
Allo stesso modo dei dati climatici probabilistici, per ogni punto di griglia le SR sono state prodotte con cadenza decennale dal 2020 al 2090 e si riferiscono alle variazioni medie di Tg e Pr previste per il ventennio centrato sull'anno a cui si riferiscono. Per ognuna delle finestre temporali considerate, il livello della concentrazione di CO<sub>2</sub> è stato fissato in accordo con quanto previsto dallo scenario di sviluppo socio-economico A1B (Nakicenovic et al., 2000).

Nella figura 2.4 è riportata una rappresentazione grafica di una superficie di risposta per un generico punto di griglia e per una determinata concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'atmosfera. Sull'asse delle ascisse sono riportate le variazioni di temperatura (in termini assoluti), mentre sulle ordinate sono rappresentate le anomalie di precipitazione (in termini percentuali). Le variazioni (delta) delle due variabili sono calcolate rispetto alla climatologia del periodo di riferimento (1961-90). Le curve all'interno del diagramma sono il luogo geometrico dei punti di uguale resa e rappresentano, quindi, i diversi livelli di resa

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

che si possono ottenere dalla combinazione delle due variabili climatiche riportate sugli assi. Le superfici di risposta relative a due diversi periodi temporali, differiscono tra di loro per la differente concentrazione di CO<sub>2</sub> utilizzata per il calcolo.

La superficie di risposta delimita, quindi, uno spazio in cui è possibile associare ad una qualsiasi coppia di valori delle variabili indipendenti (in questo caso, variazioni di Tg e Pr) un preciso valore di resa. Poiché le proiezioni climatiche future sono state fornite come distribuzione delle possibili coppie di valori, delle stesse variabili climatiche usate per la costruzione delle SR, è sufficiente sovrapporre alle SR le proiezioni climatiche per ottenere una distribuzione probabilistica delle rese medie di frumento in risposta alle variabili climatiche considerate.



**Figura 2.4: Esempio di una superficie di risposta della resa media alle variazioni congiunte di Tg e Pr.**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## 2.7 La determinazione del rischio climatico

Come già riportato nella parte introduttiva, il rischio climatico è rappresentato dalla probabilità che un determinato evento, considerato pericoloso, possa verificarsi (Carter et al., 2007).

In questo studio il pericolo climatico è stato definito da quelle combinazioni di variazione delle temperature, delle precipitazioni e della concentrazione di CO<sub>2</sub> che comportano una resa media stimata inferiore ad una determinata soglia produttiva. Per ogni punto di griglia, sono state adottate due soglie di rischio. La prima (S1) è stata fatta coincidere con la resa media trentennale simulata per il periodo di riferimento (1961-1990); la seconda (S2) è stata rappresentata da quei valori di resa corrispondenti ad una riduzione del 10% rispetto alla media di lungo periodo.

Il rischio climatico è stato stimato calcolando la proporzione della distribuzione di variazioni congiunte di Tg e Pr che determina una resa media inferiore alla soglia di rischio. Ovvero, dato  $N$  il numero delle combinazioni equi-probabili di variazione congiunta di Tg e Pr, appartenenti all'insieme delle variazioni previste per un certo periodo futuro, ed  $n$  il numero di combinazioni climatiche appartenenti al sotto-insieme che costituisce il pericolo climatico (cioè, determina rese inferiori alla soglia), il rischio è determinato da:

$$rischio = n/N * 100$$

Per maggiore chiarezza, ipotizzando che delle 10000 possibili combinazioni congiunte di variazione di temperatura e pioggia fornite per una determinata finestra temporale, 7000 causino una resa inferiore a quella scelta come soglia critica, allora, il rischio climatico, per quella determinata cella e per quel determinato periodo, è pari al 70%. Utilizzando la terminologia ufficiale dell'IPCC (Risbey e Kandikar, 2007), a riguardo della comunicazione delle probabilità legate ai risultati, si dirà: “E' *probabile* (>66%) che nel periodo considerato ci sia una resa inferiore alla soglia di rischio selezionata”.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

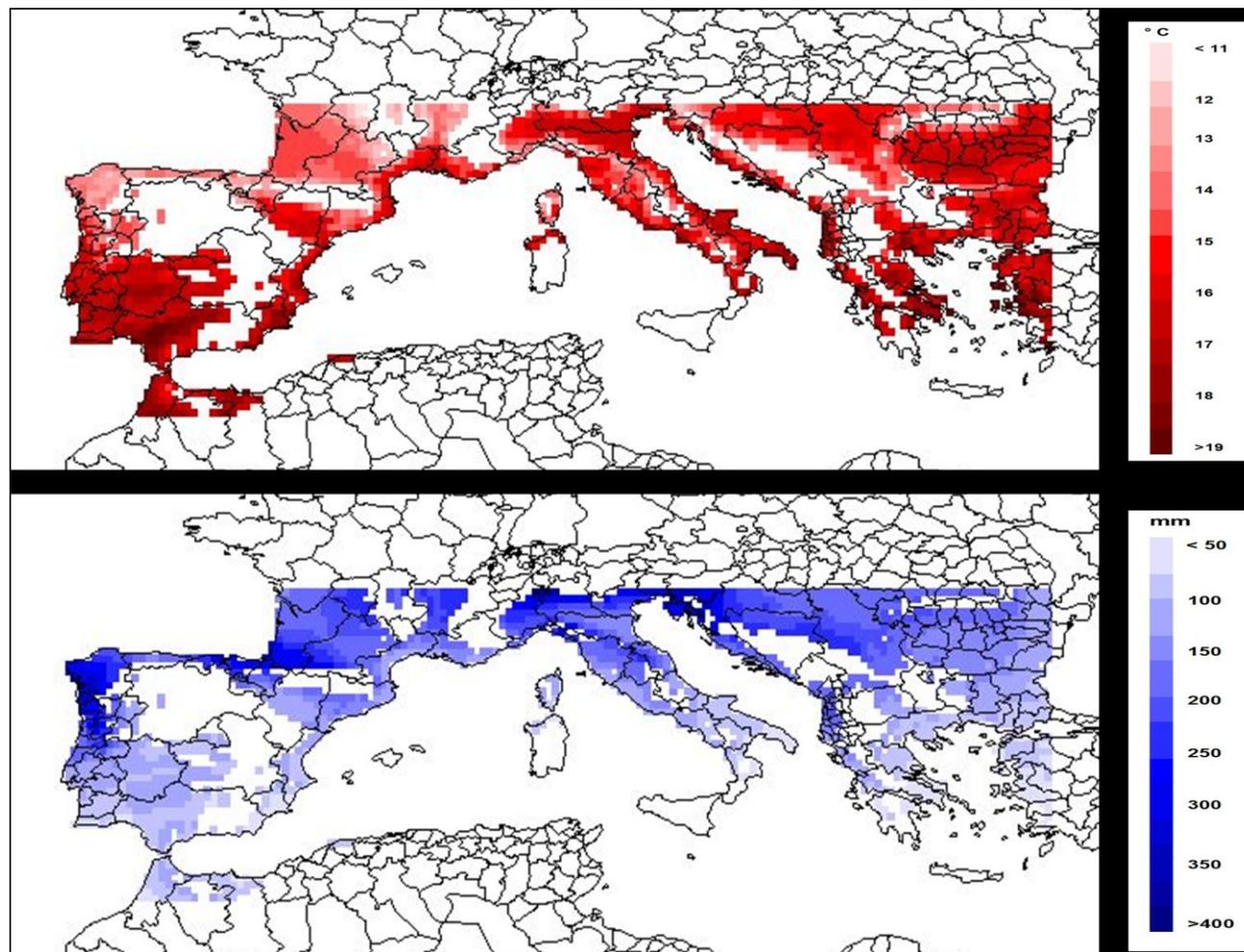
## **3. Risultati**

### **3.1 Il clima nell'area di studio**

#### **3.1.1 Il clima presente**

Dall'analisi della climatologia del periodo di riferimento (1961-1990), risulta che le temperature medie del periodo primaverile (T(AMJ)), nell'area di studio, variano tra 12.0°C e 19.6°C (Figura 3.1a). Le aree più calde, con T(AMJ) generalmente superiori a 18.5°C si registrano nella zona meridionale della Penisola Iberica (regione della Guadiana) e in alcune aree costiere intorno al Mar Egeo. Temperature appena più basse si riscontrano nelle aree circostanti nonché in Marocco e in Sud Italia (Puglia). La pianura Padana e l'ovest della Spagna sono caratterizzate da temperature medie di circa 17°C. Le aree più fresche si collocano in Galizia e nella parte occidentale della Francia.

Le precipitazioni primaverili (Figura 3.1b) mostrano un chiaro gradiente latitudinale con valori decrescenti spostandosi verso il sud. Le regioni più piovose sono situate in Galizia, nella zona dei Pirenei e nei Balcani settentrionali con quasi 350mm di pioggia, mentre le aree più secche si ritrovano nel sud dell'Italia, nelle regioni sud-orientali dell'area di studio, in Marocco e in alcune aree della costa sud-orientale della Spagna con meno di 80mm di pioggia. Nelle restanti aree la piovosità primaverile si attesta intorno a 110-180mm.



**Figura 3.1:** Temperature medie (a) e precipitazioni cumulate (b) del periodo primaverile (Aprile-Giugno). I dati rappresentano i valori medi calcolati per il trentennio di riferimento (1961-1990).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### **3.1.2 Il clima futuro**

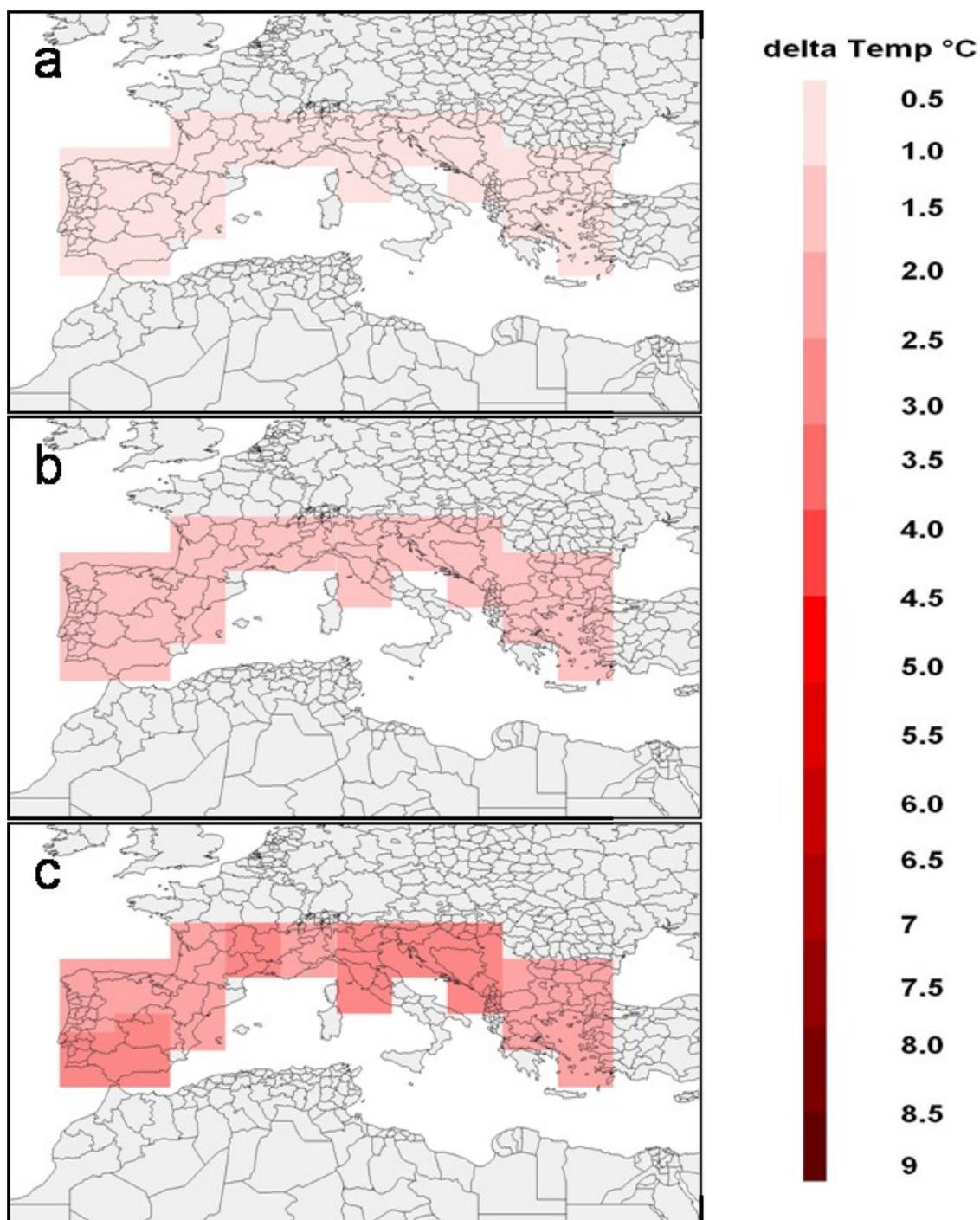
Le proiezioni climatiche per il futuro sono state fornite come distribuzione delle probabilità congiunte di variazione delle temperature e delle precipitazioni fino alla fine del secolo. Per esporre i risultati si utilizzerà il valore del 50° percentile della distribuzione mentre l'incertezza nelle proiezioni verrà descritta come differenza tra il 10° e il 90° percentile.

Con riferimento alla temperatura, le proiezioni indicano un progressivo incremento del valore mediano che si attesta, in media, intorno a +1.4°C nel 2010-2030 (Figura 3.2b) e arriva fino a quasi +4.7°C alla fine del secolo (Figura 3.3b). I maggiori incrementi sono previsti nelle regioni centro-settentrionali del dominio, mentre rialzi più contenuti sono stati simulati per le regioni sud-orientali del bacino.

L'incertezza nelle proiezioni, espressa dalla variabilità delle stesse, muta man mano che ci si allontana dal presente. Nel prossimo futuro le differenze tra 10° e 90° percentile della distribuzione non superano 1.8°C (Figura 3.2a,c). La variabilità delle proiezioni cresce man mano che si procede verso la fine del secolo e raggiunge in media 4.4°C con punte di oltre 5°C in Andalusia e Albania-Montenegro. (Figura 3.3a,c)

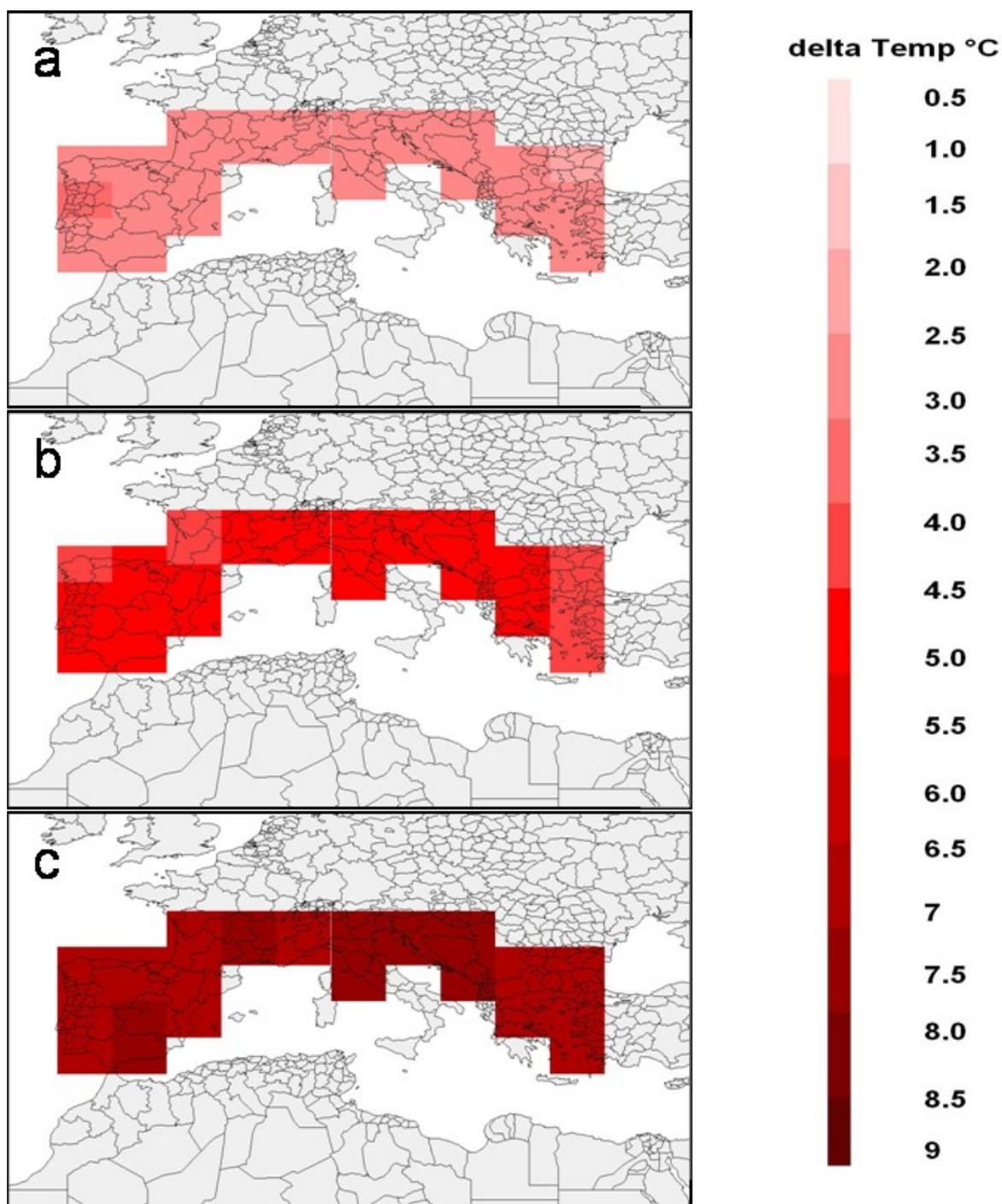
Per quel che riguarda le precipitazioni, le proiezioni climatiche descrivono una situazione di progressiva riduzione delle precipitazioni su tutta l'area di studio. Nei prossimi decenni, la riduzione si prevede moderata con valori non inferiori a -9% (Figura 3.4b), ma alla fine del secolo la diminuzione sarà più consistente attestandosi, in media, intorno al 15%. La situazione si presenta piuttosto critica per le aree centrali della Penisola Iberica e della Grecia che mostrano riduzioni, per la fine del secolo, fino a più del 24% rispetto al clima di riferimento (Figura 3.5b).

Similmente a quanto osservato per le temperature, anche per le precipitazioni l'incertezza delle proiezioni cresce muovendosi nel futuro. Per alcune aree la variabilità delle proiezioni, per la fine del secolo, è tale che ci sono significative probabilità che il clima possa presentarsi sia più secco che più umido rispetto al presente (Figura 3.5a,c).



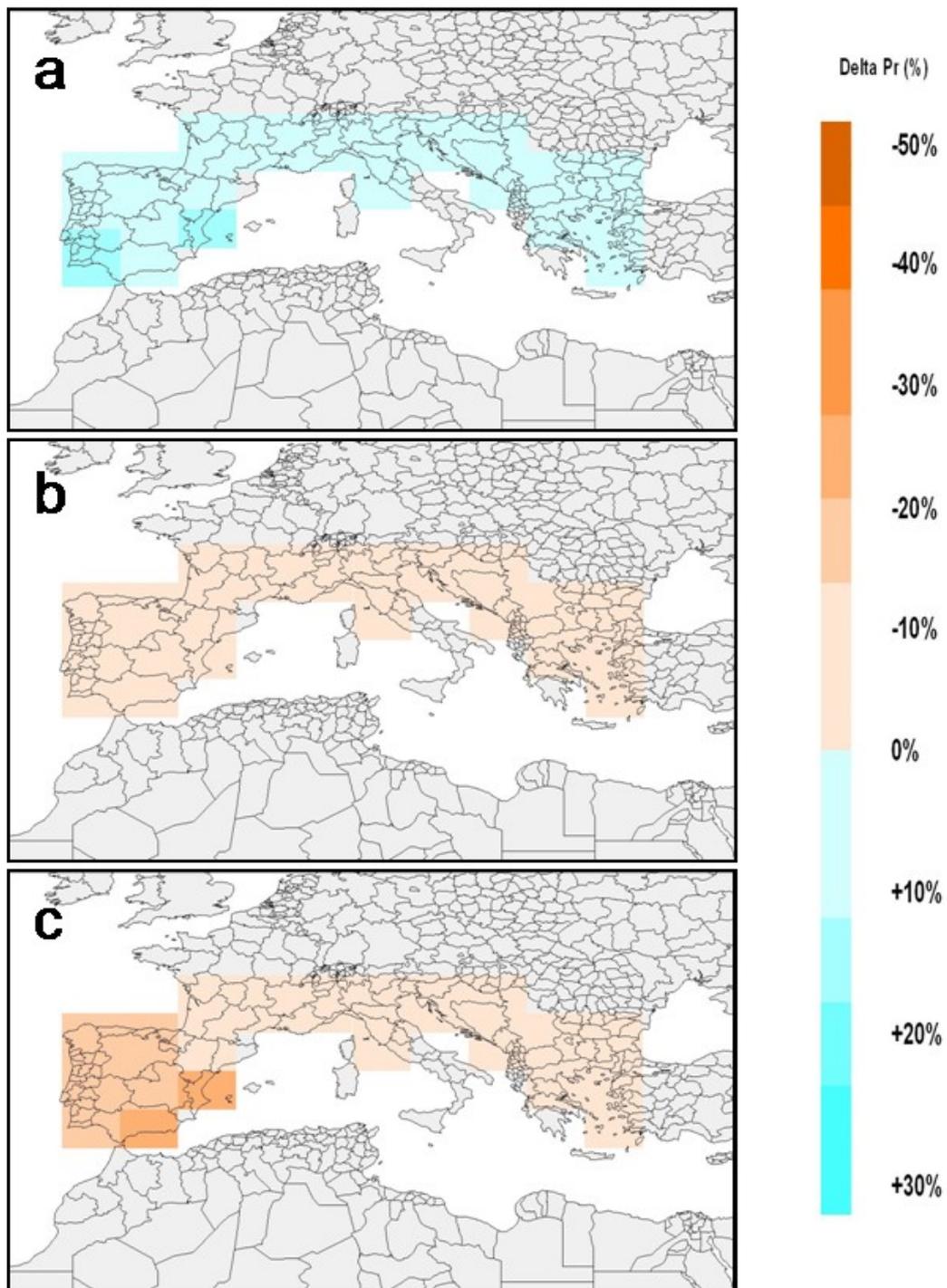
**Figura 3.2: Distribuzione spaziale del 10° (a), 50° (b) e 90° (c) percentile della distribuzione delle variazioni di temperatura (°C) media annua prevista per il 2010-2030. Le variazioni sono state calcolate in riferimento al trentennio 1961-1990**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



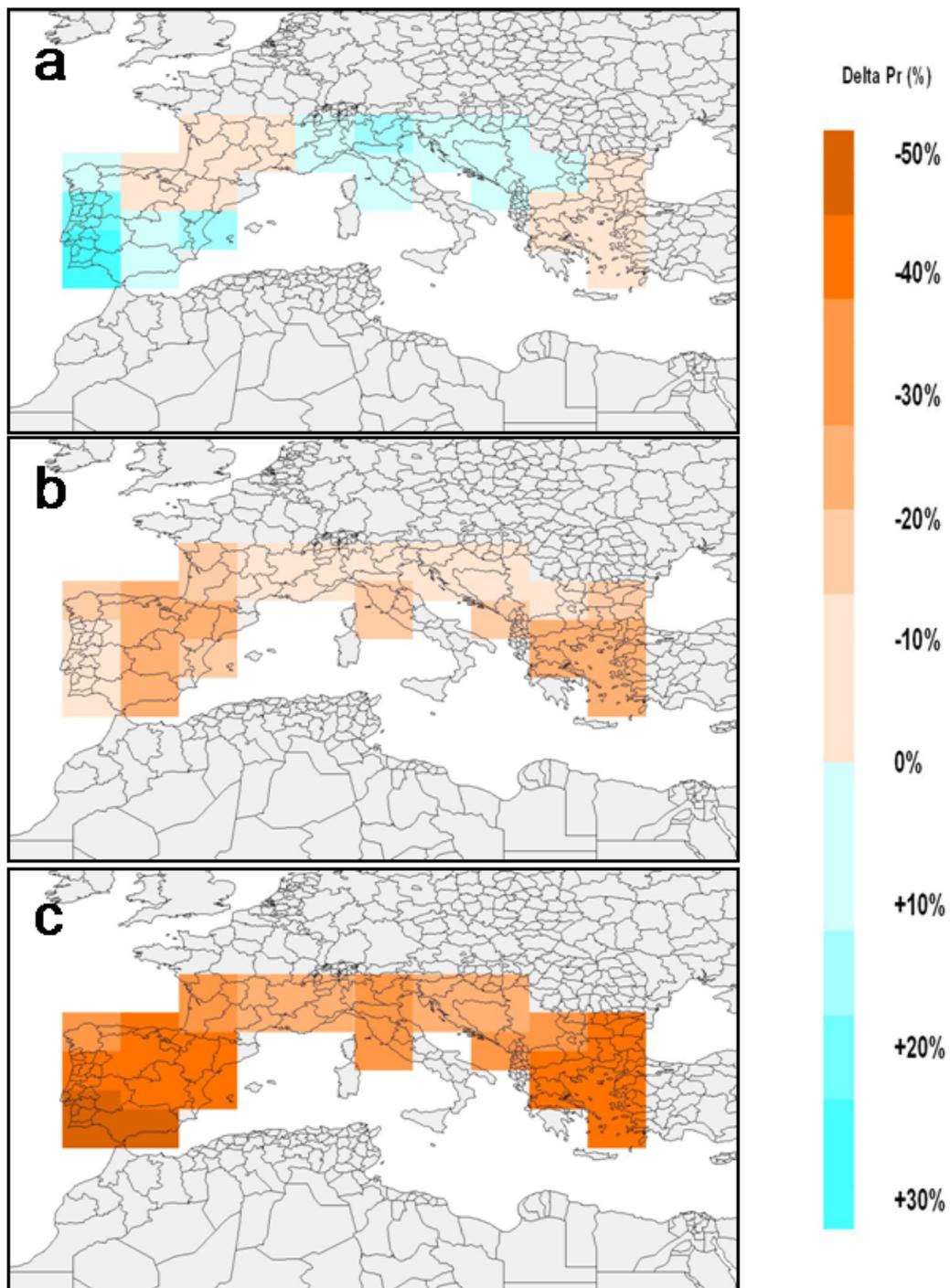
**Figura 3.3:** Distribuzione spaziale del 10° (a), 50° (b) e 90° (c) percentile della distribuzione delle variazioni di temperatura (°C) media annua prevista per il 2070-2090. Le variazioni sono state calcolate in riferimento al trentennio 1961-1990

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 3.4: Distribuzione spaziale del 10° (a), 50° (b) e 90° (c) percentile della distribuzione delle variazioni di precipitazione (%) media annua prevista per il 2010-2030. Le variazioni sono state calcolate in riferimento al trentennio 1961-1990**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 3.5:** Distribuzione spaziale del 10° (a), 50° (b) e 90° (c) percentile della distribuzione delle variazioni di precipitazione (%) media annua prevista per il 2070-2090. Le variazioni sono state calcolate in riferimento al trentennio 1961-1990.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## 3.2 Calibrazione e validazione di SIRIUS e della ANN

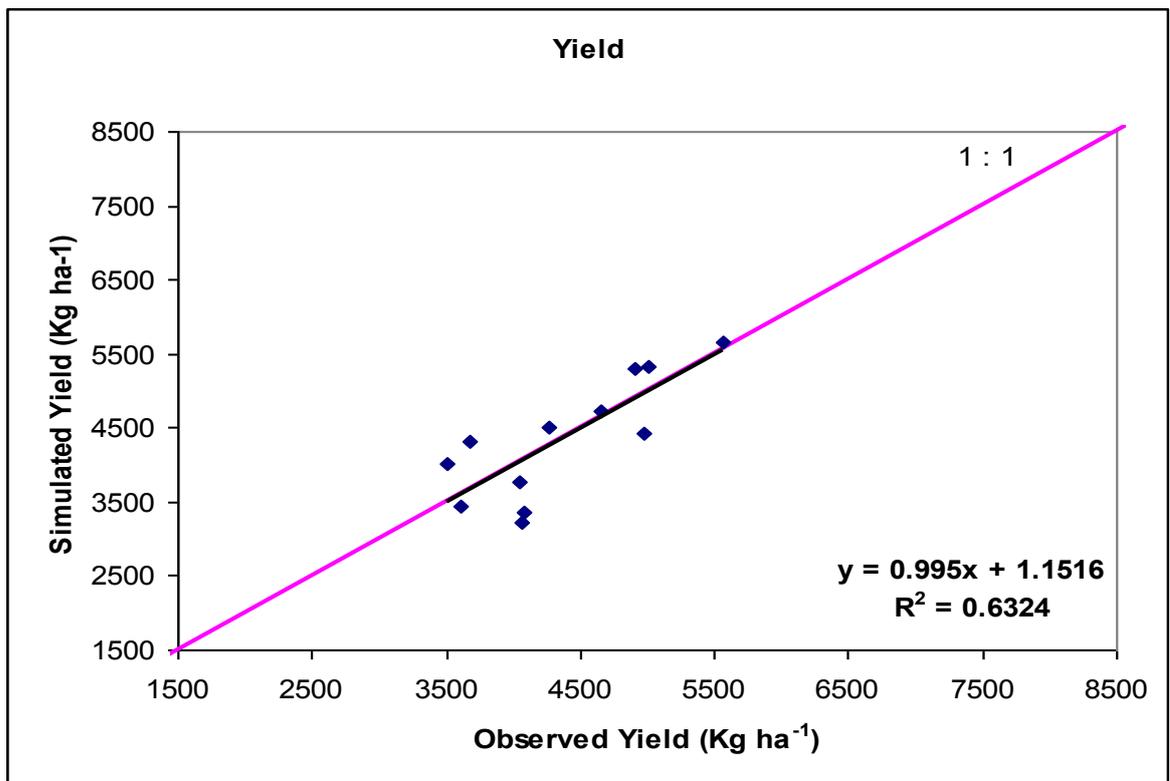
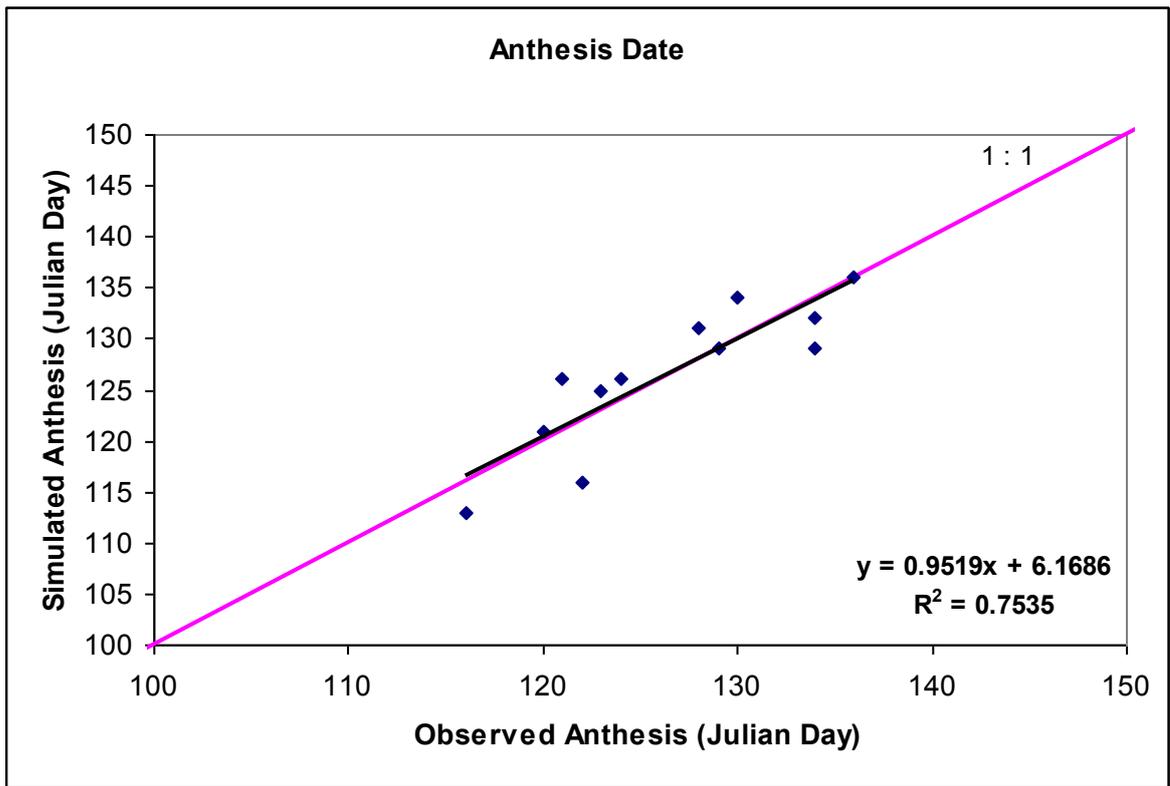
### 3.2.1 Calibrazione di SIRIUS per un varietà generica

Il modello SIRIUS è stato calibrato per riprodurre lo sviluppo e la resa di una generica varietà di frumento duro, utilizzando i dati provenienti da tre località italiane. La calibrazione è stata effettuata modificando i parametri varietali che descrivono, nel modello, la varietà Creso (Ferrise et al., 2010). Nella tabella 3.1 è riportata la combinazione di parametri che ha prodotto il risultato migliore in termini di corrispondenza dei risultati simulati con i dati reali. Utilizzando questo set di parametri, il modello è stato in grado di riprodurre soddisfacentemente (Figura 3.6) tanto la data di antesi (RMSE=3.3 giorni;  $r=0.87$ ,  $p<0.001$ ,  $gf=11$ ), quanto le rese (RMSE=0.46 MG ha<sup>-1</sup>;  $r=0.80$ ,  $p<0.01$ ;  $gf=11$ )

**Tabella 3.1: Parametri varietali adottati per la descrizione di una cv generica di frumento duro**

<i>Parametri varietali</i>	<i>Unità di misura</i>	<i>Valore</i>
TTSOWEM	gradi giorno sopra 0°C	185
TTANBGF	gradi giorno sopra 0°C	100
TTANEG	gradi giorno sopra 0°C	650
TTEGFMAT	gradi giorno sopra 0°C	200
CEPT		6.0
SLOPE	(gradi giorno) <sup>-1</sup>	0.006
PHYLL	gradi giorno sopra 0°C	92
AMNLFNO		7.00
SLDL	Foglie (ore di luce) <sup>-1</sup>	1.15
VAI	(gradi giorno) <sup>-1</sup>	0.00
VBEE	giorni <sup>-1</sup>	0.00
AMXLFNO		17
EXTINC		0.45
GenProteinConc	%	17
ALPHAMAX	m <sup>-2</sup>	0.0025
H	mm	897

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.



**Figura 3.6: Confronto tra i dati simulati da SIRIUS e quelli osservati di data di antesi (in alto) e resa (in basso).**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### 3.2.2 Validazione di SIRIUS a scala regionale

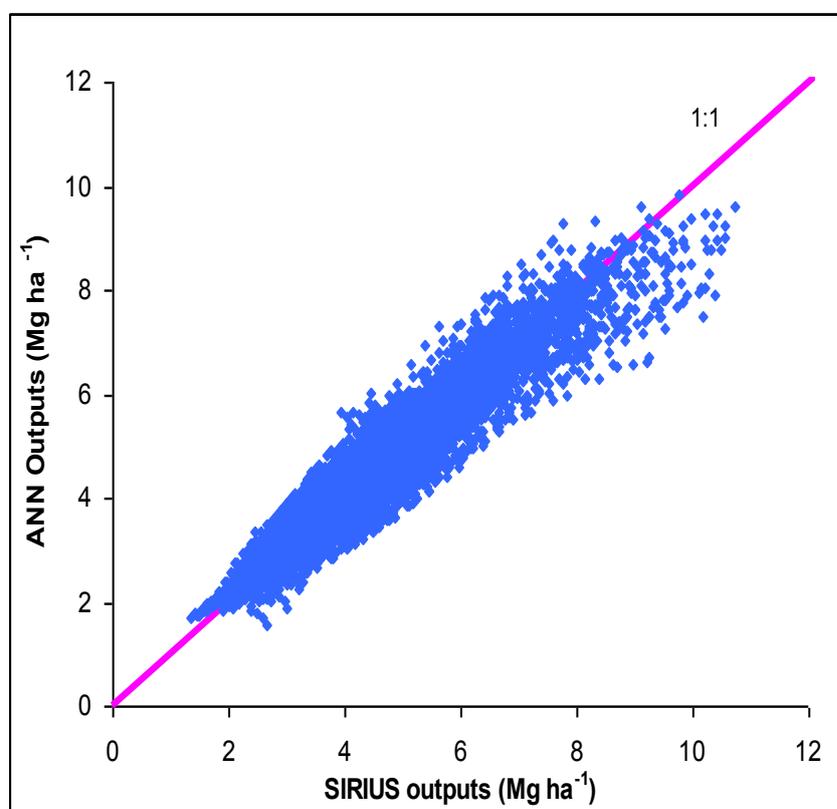
Una volta calibrato, SIRIUS è stato testato per valutare la capacità di riproduzione delle rese a scala regionale. Seppure con una certa dispersione intorno alla retta di perfetta corrispondenza, SIRIUS ha simulato con buona approssimazione i dati annuali di resa osservati (RMSE=0.85 Mg ha<sup>-1</sup>; r=0.70; p<0.001; gf=50). Il confronto dei dati aggregati per regione (Tabella 3.2), ha evidenziato che il modello è in grado di riprodurre piuttosto fedelmente la variabilità spaziale delle rese con un RMSE = 0.382 Mg ha<sup>-1</sup> e un coefficiente di Pearson r=0.92 (p<0.01; gf=5)

Tabella 3.2: Risultati della validazione di SIRIUS a scala regionale

	Lat N	Lon E	Observed Yield (Mg ha <sup>-1</sup> )	Simulated Yield (Mg ha <sup>-1</sup> )
<b>Francia meridionale</b>	43.65	4.96	3.26	3.62
<b>Nord Italia</b>	45.48	11.88	4.88	4.53
<b>Centro Italia</b>	42.34	11.73	2.89	3.31
<b>Sud Italia</b>	37.78	12.68	2.17	2.21
<b>Grecia centrale</b>	39.73	22.19	3.02	2.83
<b>Spagna meridionale</b>	36.83	-5.34	2.50	3.14

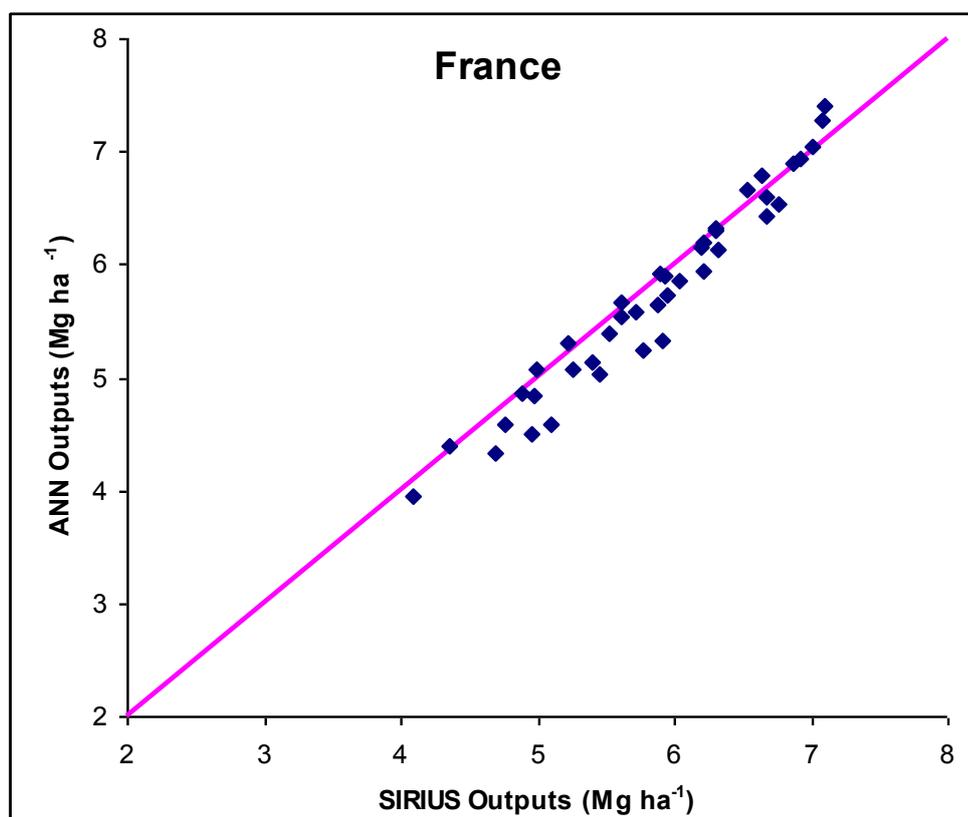
### 3.2.3 Validazione della ANN

Il modello SIRIUS è stato utilizzato per l'allenamento della rete neurale creando un apposito dataset di simulazioni attraverso un'analisi di scenario condotta su alcuni punti di griglia dell'area oggetto di studio. L'allenamento della ANN è stato effettuato sull'80% dei dati prodotti dall'analisi di scenario, il restante 20% è stato usato per testare la capacità della ANN di riprodurre gli output di SIRIUS (Figura 3.7). Inoltre, è stato eseguito un confronto anche tra le simulazioni dei due modelli su un punto di griglia indipendente da quelli utilizzati per l'allenamento della ANN (Figura 3.8).



**Figure 3.7: Confronto tra gli output della ANN e le rese simulate da SIRIUS in una cella esterna indipendente da quelle usate per l'allenamento della rete.**

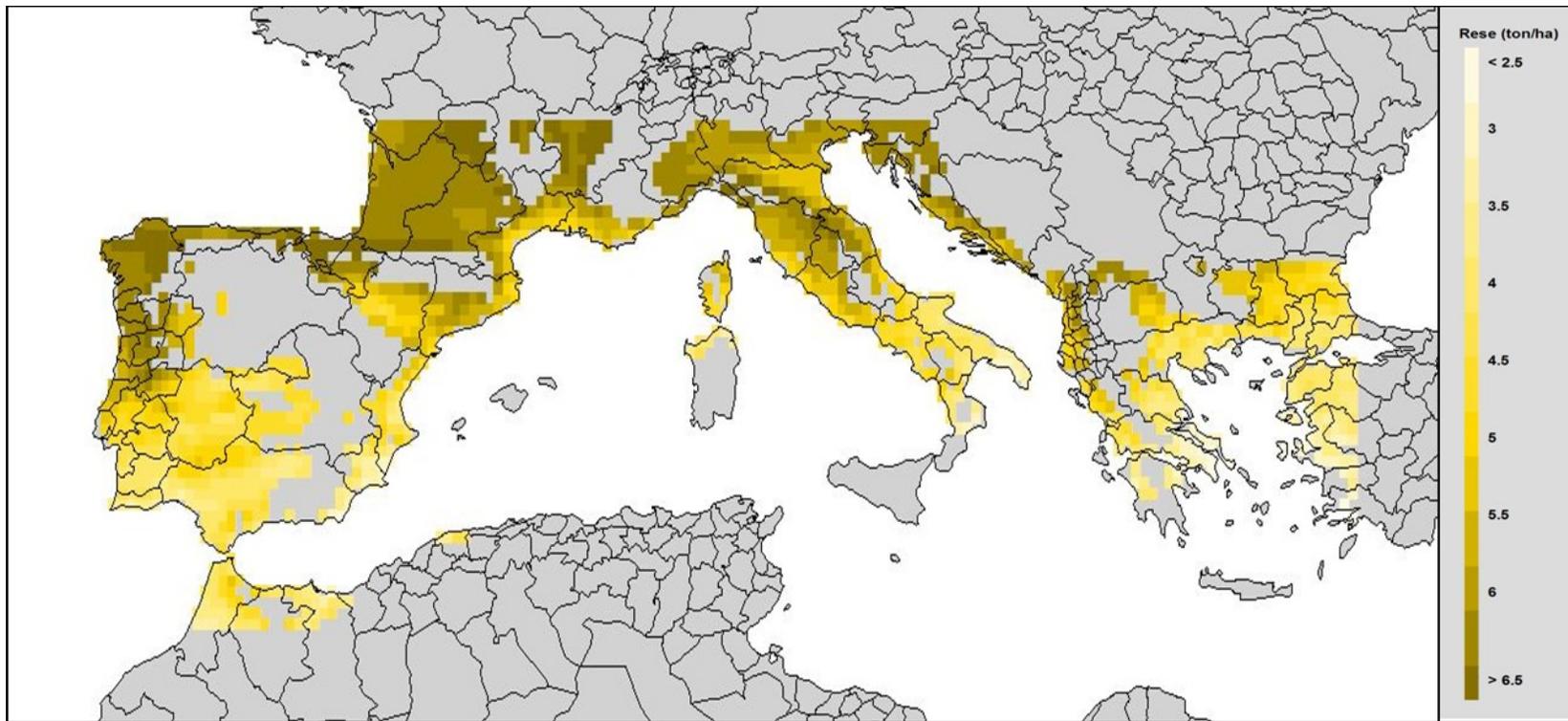
In ambedue i casi, l'analisi dei risultati ha evidenziato un alto livello di corrispondenza tra le rese simulate da SIRIUS e gli output della ANN. Con riferimento al primo test (20% dei risultati dell'analisi di scenario) l'RMSE è risultato pari a  $0.495 \text{ Mg ha}^{-1}$ ; con un coefficiente di correlazione  $r=0.95$ ), risultati ancora più soddisfacenti sono stati ottenuti dal confronto delle rese simulate nella cella indipendente (RMSE =  $0.231 \text{ Mg ha}^{-1}$ ;  $r=0.97$ ;  $p<0.001$ ;  $gf=39$ ).



**Figura 3.8:** Confronto tra gli output della ANN e le rese simulate da SIRIUS in una cella esterna, indipendente da quelle usate per l'allenamento della rete.

### **3.3 Distribuzione delle rese per il periodo presente**

Le rese medie potenziali di lungo periodo, simulate dalla ANN per il periodo presente (Figura 3.9), variano tra  $2.9 \text{ Mg ha}^{-1}$  e  $7.2 \text{ Mg ha}^{-1}$  con un chiaro gradiente latitudinale. Le rese più elevate sono state registrate in Galizia e nel sud della Francia con più di  $6.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Rese generalmente elevate si sono registrate anche nelle regioni centro-settentrionali dell'Italia e lungo le coste orientali del Mare Adriatico, mentre le rese più basse, con valori inferiori a  $3.5 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sono state simulate per le aree meridionali del bacino del Mediterraneo. Questi risultati sono in accordo con altri lavori di valutazione della produttività del frumento a scala europea (es. Harrison et al. 1995) che riportano una simile distribuzione spaziale delle rese



**Figura 3.9:** Distribuzione spaziale delle rese ( $\text{MG ha}^{-1}$ ) simulate dalla rete neurale per il periodo di riferimento (1961-1990).

### 3.4 Un caso studio: una cella in Toscana

Allo scopo di illustrare le dinamiche che sottendono alla determinazione del rischio, in questo paragrafo vengono riportati i risultati delle elaborazioni condotte per una singola cella del dominio.

La cella è situata in Toscana (Lat 42.62° N; Lon 11.38° E) in una zona tipicamente dedicata alla coltura del frumento duro. Come per tutte le altre celle del dominio, le SR sono state calcolate modificando la climatologia del periodo di riferimento per variazioni annuali di temperatura tra -2°C e +10° e per variazioni percentuali della precipitazione annua tra -60% e +40%. La creazione degli scenari climatici è stata effettuata senza alterare l'andamento stagionale delle due variabili nel periodo di riferimento.

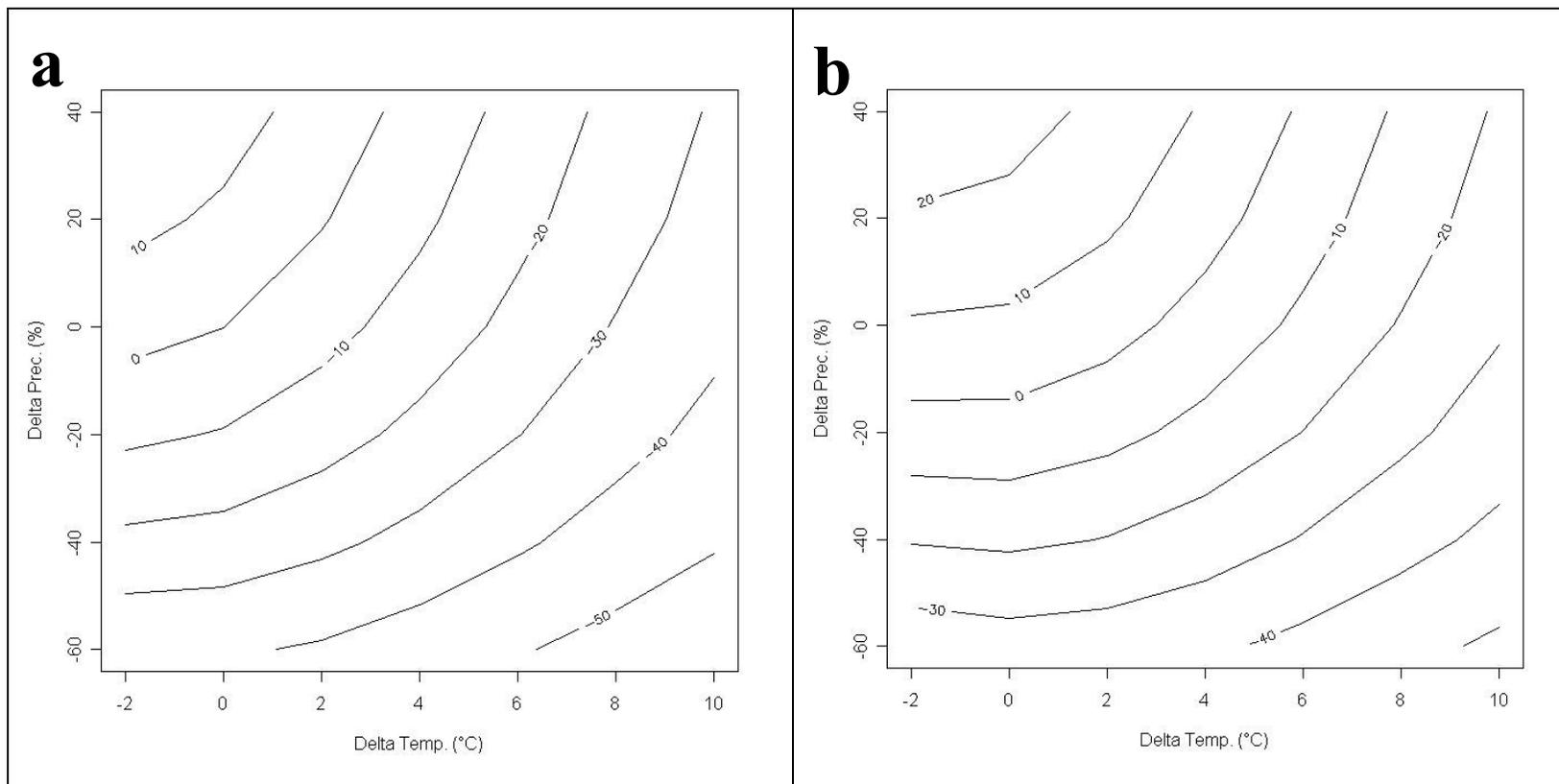
Nella figura 3.10 sono rappresentate graficamente due SR calcolate per due livelli di concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub>: 350ppm e 570ppm. Le SR si riferiscono alla variazione percentuale delle rese rispetto alla resa media di lungo periodo stimata per il trentennio di riferimento (1961-1990). Sulle ascisse è riportata la variazione di temperatura media annua, in termini assoluti, mentre sulle ordinate è rappresentata la riduzione, in termini percentuali, delle precipitazioni annuali.

Per ambedue le concentrazioni di CO<sub>2</sub>, la disposizione delle isolinee rende evidente l'effetto negativo dell'incremento di temperatura e della riduzione delle precipitazioni. La resa, infatti, tende a ridursi spostandosi verso destra (incremento di temperatura) e verso il basso (riduzione delle precipitazioni). Mantenendo costante la CO<sub>2</sub> ai valori attuali (350 ppm, Figura 3.10a), la resa si riduce del 14% e del 31% per incrementi di temperatura di +4°C e +8°C (nessuna variazione delle Pr), mentre le precipitazioni comportano variazioni di resa comprese tra +14% e -39% (nessuna variazione di Tg). Le maggiori riduzioni della resa (superiori al 50%) si riscontrano per le combinazioni di temperature elevate insieme a forte diminuzione delle precipitazioni. L'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> causa un complessivo incremento delle rese, che si manifesta con lo slittamento verso destra delle isolinee, nella RS calcolata per la concentrazione più alta di CO<sub>2</sub> (Figura 3.10b). In questo caso la variazione di resa, rispetto al presente, è di -4% e -20% a +4°C e +8°C, mentre la precipitazione determina il calo produttivo per variazioni inferiori a circa -18%. Per le

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

combinazioni di variazione più deleterie ( $T_g > 8^{\circ}\text{C}$  e  $Pr < -50\%$ ), la riduzione di resa si attesta intorno al 40%.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

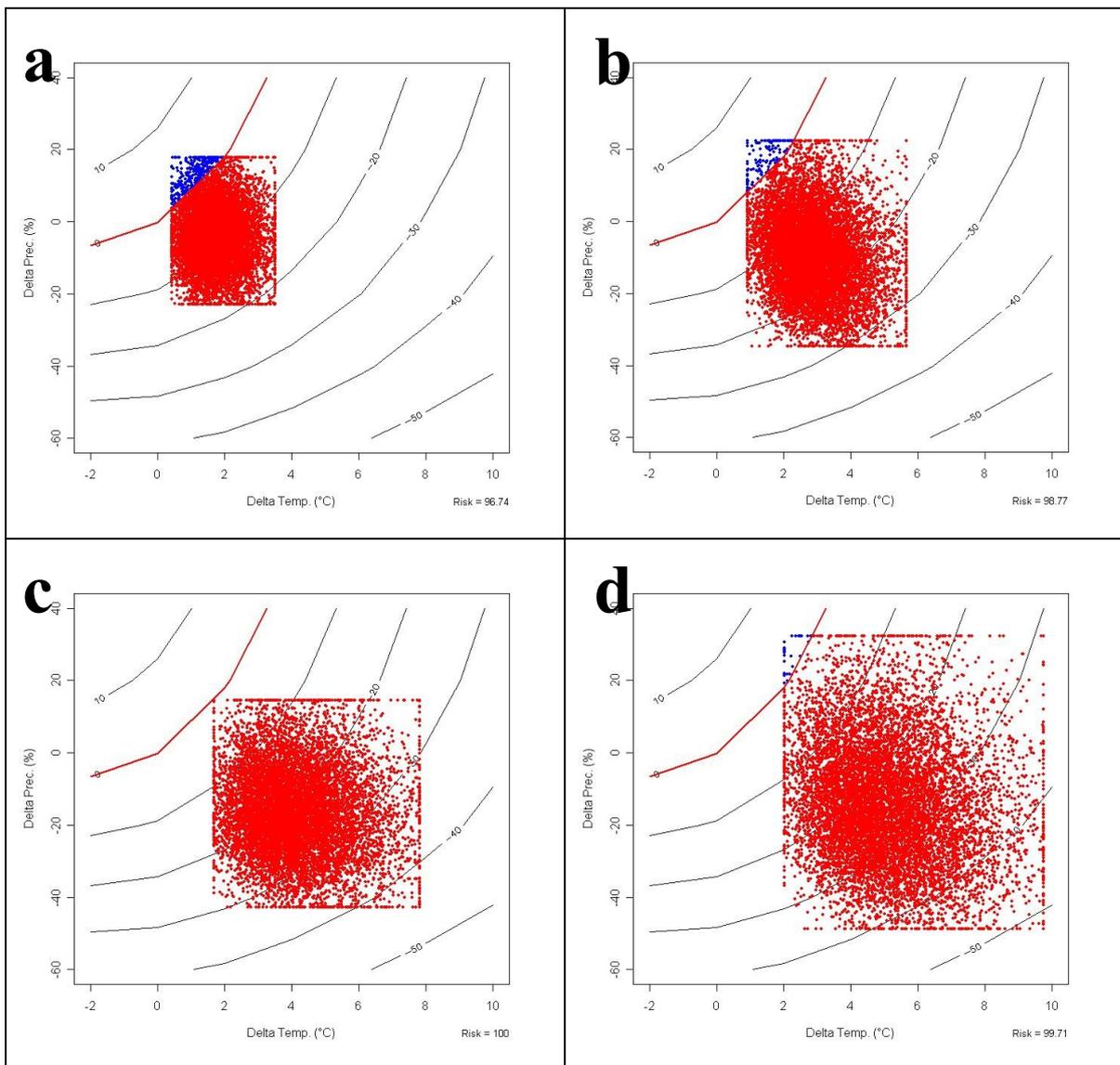


**Figura 3.10: Superfici di risposta della variazione percentuale di resa, rispetto al valore medio di lungo periodo, per una concentrazione di CO<sub>2</sub> di 350 ppm (a) e 550 ppm (b).**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

In una prima fase, il rischio di rese inferiori alla soglia critica è stato determinato in funzione della sola variazione delle due variabili climatiche. In questo caso le superfici di risposta sono state calcolate mantenendo costante la concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub> ai valori del periodo di riferimento (350ppm). Nella figura 3.11 sono riportate le SR della variazione di resa, con sovrapposte le distribuzioni delle variazioni congiunte di Tg e Pr per 4 finestre temporali future centrate sul 2020, 2040, 2060 e 2080. La soglia di rischio è rappresentata dalla resa media trentennale riferita al periodo presente (isolinea rossa).

Nella prima finestra temporale, la nube di punti che rappresenta la distribuzione delle variazioni congiunte di Tg e Pr è concentrata nell'area compresa tra +0.4°C e +3°C di Tg e tra -21% e +17% di Pr. La corrispondente distribuzione delle rese risulta inclusa tra -20% e +5% della media di lungo periodo. Il 96.7% delle possibili combinazioni di Tg e Pr determina una resa inferiore alla soglia critica. Questa stessa percentuale rappresenta, quindi, il rischio, definito come la probabilità che si verifichi il pericolo climatico, ovvero quelle combinazioni di Tg e Pr che causano una resa inferiore alla soglia critica. Nelle successive finestre temporali la nube di punti si muove sulla SR verso destra e verso il basso, in conformità al progressivo incremento di Tg e alla riduzione di Pr. Contemporaneamente, la maggiore incertezza della previsione climatica si manifesta con una maggiore dispersione dei punti che costituiscono la nube e che si riflette in una maggiore variabilità della distribuzione delle rese previste. Il rischio di rese inferiori alla soglia critica sale al 98.8% nel 2040 e risulta totale (100%) nel 2060. Nell'ultima finestra temporale la grande incertezza che caratterizza le proiezioni climatiche causa una così ampia dispersione della nube che alcuni punti ricadono al di sopra della soglia critica e il rischio risulta di poco inferiore al 100%.



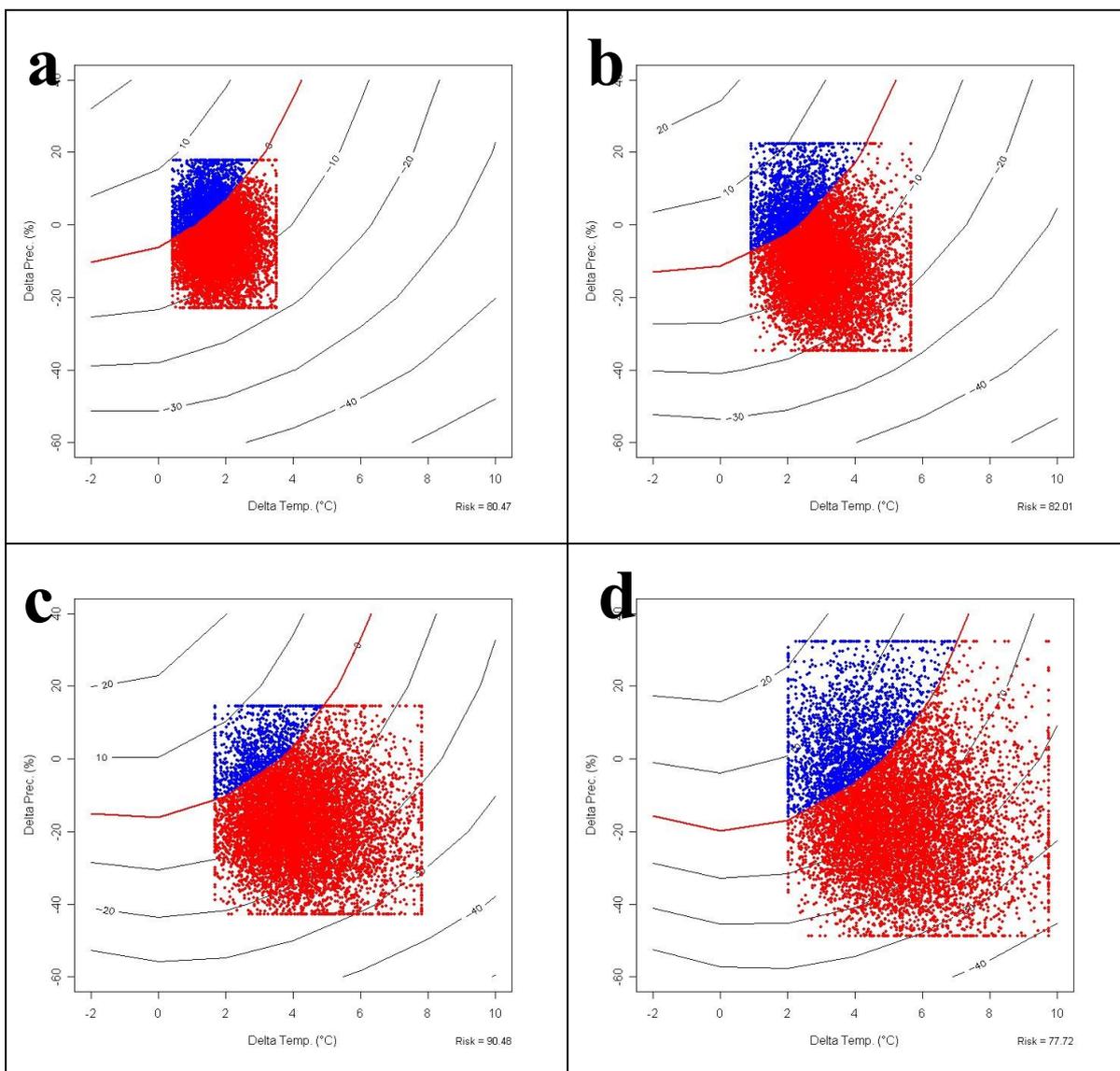
**Figura 3.11: Superfici di risposta con sovrapposte le proiezioni probabilistiche per il 2010-2030 (a), 2030-50 (b), 2050-70 (c) e 2070-90 (d). Le SR sono costruite con un valore costante di CO<sub>2</sub> di 350ppm.**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

L'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> ha un effetto positivo sulle rese che si contrappone alla riduzione causata dalle variazioni di Tg e Pr.

Nella figura 3.12 sono riportate le SR relative alle stesse finestre temporali dell'analisi precedente, ma questa volta prodotte con una concentrazione di CO<sub>2</sub> variabile in accordo con lo scenario di emissione A1B.

Nella prima finestra temporale la stessa distribuzione probabilistica delle variazioni di Tg e Pr determina una distribuzione delle rese che oscilla tra -20% e +10%, rispetto alla media di lungo periodo. Lo slittamento delle isolinee verso destra fa sì che la percentuale di punti che determina una resa inferiore alla soglia critica sia minore rispetto a quanto osservato per una concentrazione di 350ppm di CO<sub>2</sub>. Il valore del rischio climatico si attesta intorno all'80%. Nel 2040 l'ulteriore riduzione delle rese, legata all'incremento di Tg e alla riduzione di Pr, viene parzialmente controbilanciata dall'aumento della CO<sub>2</sub> e il rischio risulta solo lievemente aumentato (82%). Il rischio raggiunge il massimo valore nel 2060, quando, nonostante l'incremento della CO<sub>2</sub> causi un ulteriore aumento delle rese, la proporzione delle possibili variazioni congiunte di Tg e Pr che determinano una resa inferiore alla soglia critica risulta di poco superiore al 90%. Nell'ultima finestra temporale la forte dispersione della nube di punti, congiuntamente all'incremento della CO<sub>2</sub>, determina una distribuzione delle rese che varia da +21% a -40%. La probabilità che la soglia critica non venga raggiunta si riduce, rispetto al periodo precedente, e si attesta a 77.7%.



**Figura 3.12: Superfici di risposta con sovrapposte le proiezioni probabilistiche per il 2010-2030 (a), 2030-50 (b), 2050-70 (c) e 2070-90 (d). Le SR sono costruite con un valore di CO<sub>2</sub> variabile in accordo con lo scenario A1B pari, rispettivamente a 420, 490, 570 e 650 ppm: .**

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

### 3.5 Il rischio climatico nel bacino del Mediterraneo

#### Il rischio di rese inferiori alla media di lungo periodo

Contrariamente a quanto riportato in numerosi studi precedenti, in cui si afferma che, almeno nell'immediato futuro, il frumento possa trarre beneficio da un incremento della concentrazione di anidride carbonica che controbilancerebbe l'effetto negativo delle variazioni di temperatura e precipitazione (es. Olesen e Bindi, 2002; Parry et al, 2004), in questo lavoro i risultati ottenuti sono piuttosto preoccupanti.

Già nell'immediato futuro (Figura 3.13a) il rischio che le rese medie si attestino ad un livello inferiore a quello stimato per il presente, è piuttosto elevato. Su quasi tutto il bacino del Mediterraneo i risultati danno come *probabile* (probabilità compresa tra 66% e 90%) una resa inferiore a quelle medie del trentennio di riferimento. Solo in alcune piccole aree posizionate ai limiti settentrionali dell'area di studio (Galizia, Francia centrale e Balcani settentrionali) la probabilità è compresa tra il 33% e il 66% (*ugualmente probabile o non probabile*). Le aree a maggior rischio (>85%) si collocano nelle regioni centrali di Spagna e Portogallo, nella Francia occidentale e meridionale e in alcune aree dell'Italia nord-occidentale. Il rischio, seppure alto, risulta più contenuto (tra 75% e 85%) nelle regioni sud-occidentali della Penisola Iberica, a sud dei Pirenei, nell'Italia centrale, e in tutte le regioni orientali del dominio. Infine, nella Spagna orientale e Italia centro-meridionale del versante adriatico, il rischio risulta inferiore al 75%.

Nella successiva finestra temporale (Figura 3.13b) si può apprezzare una leggera riduzione del rischio in tutta la parte centro-occidentale del dominio, mentre si registra un aumento nella regione orientale. Nella quasi totalità della Penisola Iberica e dell'Italia, il rischio si mantiene al di sotto dell'85%, con valori intorno al 70% nella regione sud-occidentale e lungo la costa orientale. Le previsioni migliorano anche in Galizia dove la percentuale di rischio scende, in alcuni punti, al di sotto del 33%. In Francia, il rischio rimane sempre elevato, ma l'area caratterizzata da valori superiori all'85% si riduce notevolmente. In Italia, la quasi totalità del territorio presenta valori di rischio intorno all'80%. Le previsioni peggiorano nettamente in Grecia e Turchia dove i valori di rischio sono sempre superiori all'85%.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

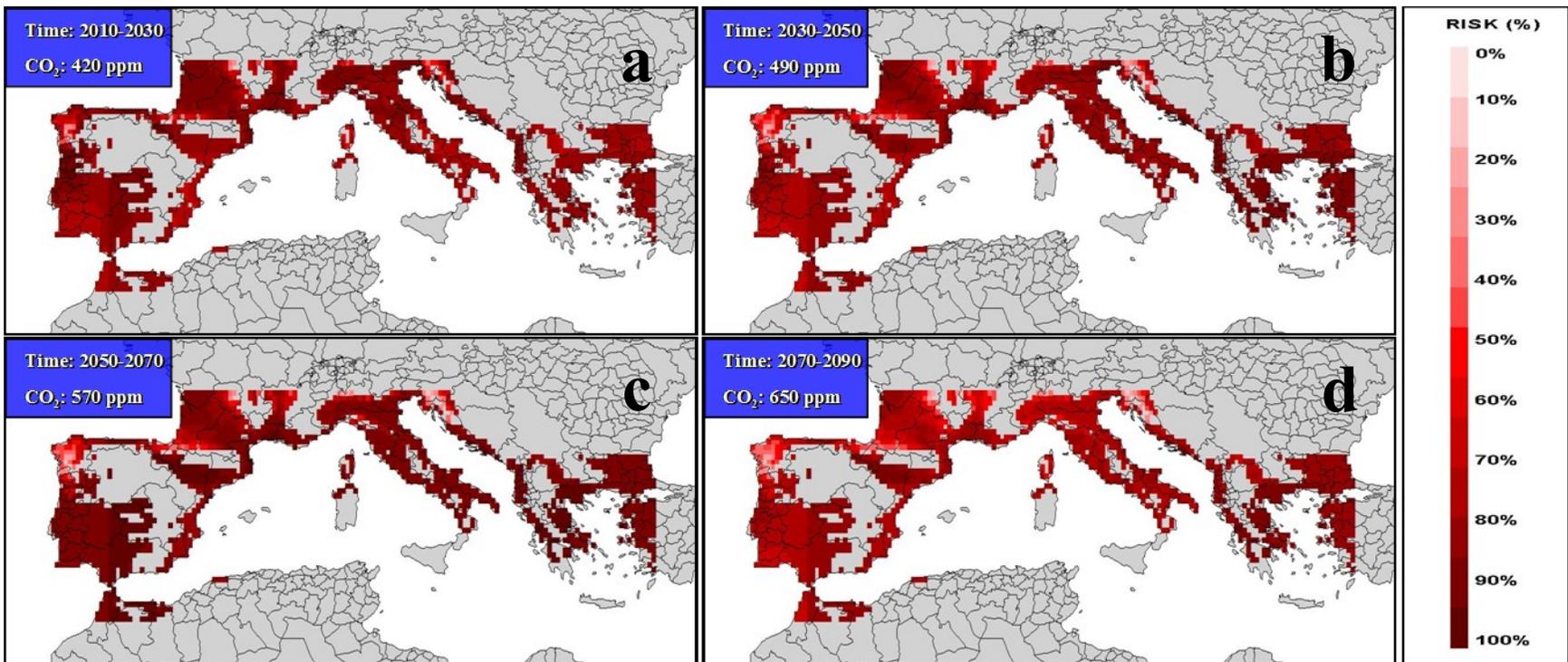


Figura 3.13: Mappe del rischio climatico che la produttività del frumento duro non raggiunga le rese medie simulate per il periodo di riferimento (1961-1990).

Nel 2060 (Figura 3.13c), il rischio climatico raggiunge il massimo picco su tutto il dominio. Nelle regioni centrali della Penisola Iberica, in buona parte dell'Italia centrale, in Grecia e in Turchia risulta *molto probabile* (>90%) una riduzione di resa rispetto alla media di lungo periodo. Nelle restanti regioni del dominio il rischio climatico è classificato come *probabile* (>66%), ma in realtà si attesta su valori compresi tra 80% e 90%. Solo in Galizia e in pochissime aree della Francia centrale e dei Balcani settentrionali la probabilità di rischio risulta inferiore al 66%.

Verso la fine del secolo (Figura 3.13d) si assiste nuovamente ad una riduzione del rischio che, ad eccezione della Grecia centrale e del nord-est della Spagna, raramente supera l'80%. In molte aree della fascia settentrionale del dominio la probabilità che non si raggiungano rese superiori alla soglia critica risulta *ugualmente probabile o non probabile*.

#### Il rischio di rese inferiori di almeno il 10% della media di lungo periodo

L'adozione di una diversa soglia di rischio ha prodotto dei risultati sostanzialmente differenti.

Nella prima finestra temporale analizzata (Figura 3.14a), il rischio di rese inferiori alla soglia prescelta è decisamente basso. In tutto il dominio, il rischio varia da *molto improbabile* (<10%), nella parte settentrionale del dominio, a *non probabile* (<33%) nelle regioni meridionali. Solo in una piccola area nella zona sud-orientale della Penisola Iberica il rischio di rese inferiori alla S2 è risultato compreso tra 33% e 66% (*ugualmente probabile o non probabile*).

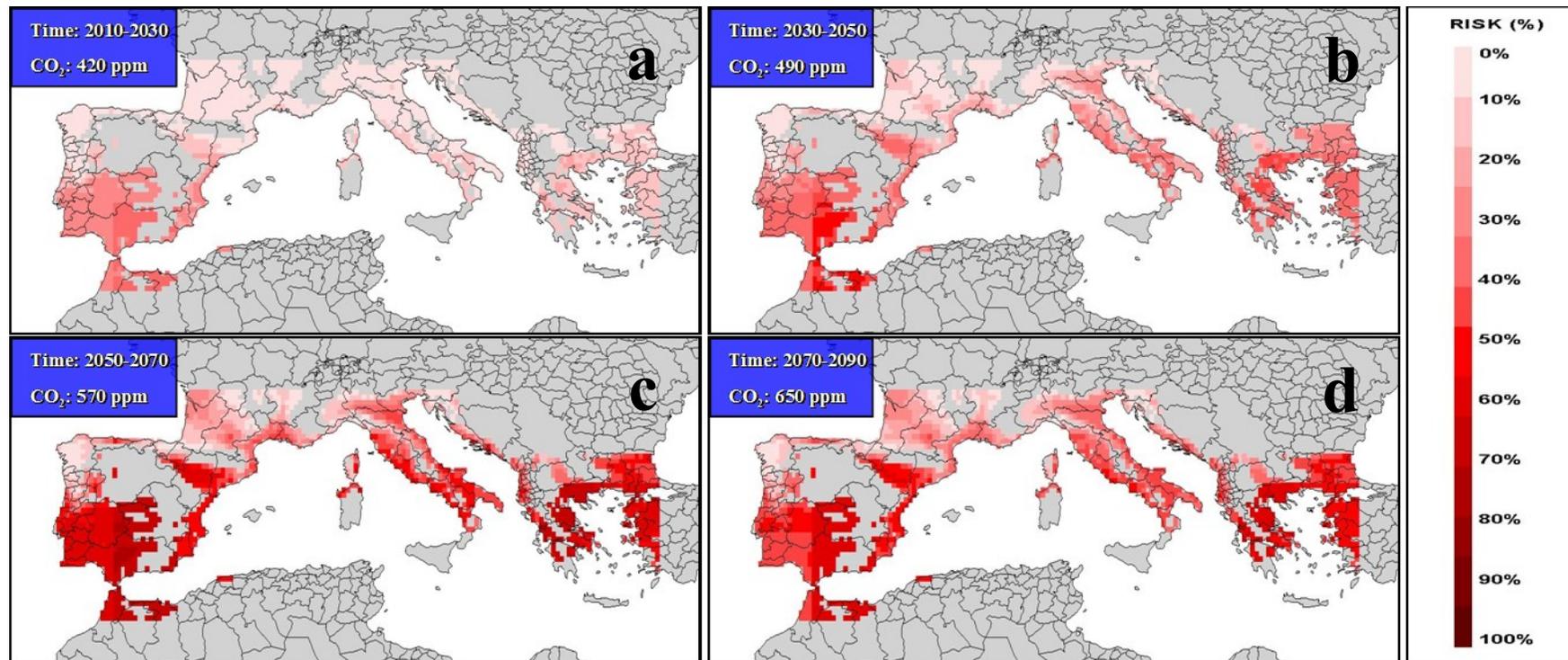
Nella seconda finestra temporale (Figura 3.14b) si assiste ad un progressivo incremento del rischio che si estende dalle regioni meridionali verso latitudini maggiori. Il sud della Penisola Iberica e le regioni che circondano il Mare Egeo presentano un rischio intorno al 50%. Le aree con rischio *molto improbabile* (<10%) sono confinate nella fascia settentrionale dell'area di studio (Galizia, Francia centrale, nord-ovest dell'Italia e Balcani settentrionali); nella restante parte del dominio il rischio si attesta intorno al 20-30% (*improbabile*).

Anche con la soglia S2, il rischio massimo si raggiunge intorno alla metà del secolo (Figura 3.14c). Nella finestra temporale relativa al 2060, il rischio risulta inferiore al 33% solo nelle aree più settentrionali. In tutto il resto del dominio il rischio è *ugualmente*

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

*probabile o non probabile*, ad eccezione delle aree centro-meridionali della Penisola Iberica che presentano valori di rischio intorno al 70% (*probabile*).

Alla fine del secolo (Figura 3.14d), il rischio climatico tende a ridursi. La fascia più settentrionale dell'area di studio, con una propaggine lungo l'area appenninica dell'Italia, presenta un rischio *molto improbabile*, mentre in tutto il resto del dominio, il rischio si attesta come *ugualmente probabile o non probabile*, con valori comunque prossimi al 50-60% nelle regioni sud-orientali della Spagna e in Grecia.



**Figura 3.14:** Mappe del rischio climatico che la produttività del frumento duro sia di almeno il 10% inferiore alle rese medie simulate per il periodo di riferimento (1961-1990).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

## 4. Discussioni

In questo studio è stato analizzato il rischio che le rese di frumento duro, in un'area del Bacino del Mediterraneo, non raggiungano determinati livelli produttivi come risultante degli effetti del cambiamento del clima. A tale scopo è stato sviluppato un modello statistico (rete neurale) per riprodurre su larga scala gli output di un modello meccanicistico di sviluppo e crescita del frumento (SIRIUS).

I modelli di simulazione rappresentano un valido, e spesso l'unico, strumento per la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici (Tubiello e Fischer, 2007). Esistono diverse tipologie di modelli che si differenziano per il numero e il grado di complessità dei processi che simulano per riprodurre il sistema (Confalonieri et al., 2009). Questa complessità, a sua volta, si riflette nel numero e nell'accuratezza delle informazioni di cui i modelli necessitano per effettuare le simulazioni. La scelta di un modello piuttosto che un altro è oggetto di dibattito all'interno della comunità scientifica, ma, sostanzialmente dipende dalle finalità dell'applicazione e dalla disponibilità dei dati necessari al modello (Confalonieri et al., 2010). Modelli molto complessi possono essere utilizzati per comprendere e spiegare le dinamiche che sottendono ad un determinato processo del sistema (Jamieson et al., 1998b), ma possono risultare dispendiosi e di difficile applicazione, per le risorse di calcolo e le quantità di dati richiesti, se applicati per valutazioni a livello di sistema. D'altra parte modelli più semplici, pur non fornendo informazioni dettagliate riguardo i sotto-processi del sistema, richiedono, generalmente un minor numero di informazioni in entrata e sono più facilmente gestibili quando il numero di simulazioni da effettuare è elevato come ad esempio nelle valutazioni di impatto a scala regionale (Jamieson et al., 1998b; Iglesias et al., 2009).

Fattore essenziale per la scelta di un modello è la sua robustezza o attendibilità previsionale (Confalonieri et al., 2010). Normalmente questa viene valutata tramite il confronto dei risultati delle simulazioni con un insieme di dati osservati diverso da quello usato nella fase di calibrazione (es. Bellocchi, 2009). Il modello potrà essere ritenuto affidabile quando le performances alla fine della fase di calibrazione non sono significativamente migliori di quelle prodotte nella fase di validazione (Confalonieri et al. 2009).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Diversamente dai semplici modelli regressivi, quelli meccanicistici sono in grado di riprodurre lo sviluppo e la produzione delle colture, tenendo conto anche della risposta non-lineare delle colture alle condizioni ambientali (es. clima, suolo, gestione) e delle loro interazioni (Van Ittersum e Donatelli, 2003). Tuttavia, per far questo viene richiesto un certo numero di parametri che sono necessari a descrivere, nel modello, le specifiche caratteristiche varietali della coltura simulata, le condizioni pedologiche in cui si sviluppa e le pratiche di gestione colturale adottate.

Uno dei problemi maggiori nell'applicazione di questi modelli per un'analisi di impatto a scala regionale consiste proprio nella difficoltà a reperire questo tipo di informazioni (Leenhardt et al., 2006). In Europa, sebbene esistano database in grado di fornire dati meteorologici giornalieri o riguardo le caratteristiche dei suoli, informazioni basilari per l'applicazione dei modelli, come ad esempio le date dei diversi stadi di sviluppo, oppure indicazioni sulle pratiche colturali utilizzate, sono praticamente inesistenti (Janssen et al., 2009; Therond et al., 2010). Gli stessi rendimenti osservati, che vengono utilizzati per validare i modelli, sono il risultato di diverse condizioni di suolo e diverse strategie di gestione (data di semina, fertilizzazione etc...) che possono variare, all'interno della stessa area, oltre che di anno in anno, e che sono difficili da misurare e rappresentare (Reidsma et al., 2009).

In questo lavoro è stato adottato il modello SIRIUS perché, rispetto ad altri modelli meccanicistici, necessita di un numero ridotto di informazioni in entrata (parametri varietali, suolo e pratiche gestionali), ma la capacità di simulare le rese è simile a quella dei modelli più complessi. Inoltre, la semplicità di SIRIUS lo rende ideale per lavori in cui sono richiesti un numero elevato di elaborazioni. SIRIUS si è dimostrato in grado di riprodurre le rese al pari di modelli più complessi (es. AFRCWHEAT2), ma con tempi di calcolo fino a 20-30 volte inferiori (Jamieson et al., 1998b).

SIRIUS è stato calibrato per riprodurre una varietà generica di frumento duro, modificando alcuni parametri varietali, affinché il modello riproducesse la fenologia e le rese osservate in tre località italiane, per le quali erano disponibili dati sufficientemente dettagliati. Utilizzando la combinazione di parametri varietali che ha prodotto i risultati migliori nella fase di calibrazione, il modello è stato quindi testato su alcune aree del Mediterraneo confrontando i risultati delle simulazioni con i dati statistici relativi ottenuti dall'EUROSTAT. Tuttavia, il confronto tra i rendimenti medi aggregati per regione,

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

(Tabella 3.2) indica che il modello ha catturato molto bene la variabilità spaziale della resa. Se la variabilità interannuale delle rese dipende principalmente dalle pratiche gestionali (date di semina, varietà, concimazione etc.), la variabilità spaziale delle rese medie, può essere attribuita prevalentemente alla variabilità climatica delle aree analizzate (Reidsma e Ewert, 2008). Il modello quindi è stato ritenuto idoneo per gli scopi di questo lavoro: simulare la produttività media del frumento duro, a scala regionale, in risposta alla variazione media annuale di temperature, precipitazione e concentrazione di CO<sub>2</sub>.

La scelta di adottare un emulatore è stata determinata dalla necessità di ridurre l'impiego di risorse, in termini di tempo e potenza di calcolo, necessarie all'applicazione della metodologia su un'area vasta come quella considerata in questo studio. La costruzione delle SR, infatti, prevede l'utilizzo del modello di impatto per condurre un'analisi di sensibilità rispetto alle variabili climatiche chiave (nel nostro caso Temperature e Precipitazioni), per le quali sono fornite le proiezioni probabilistiche. Per considerare l'effetto della CO<sub>2</sub> è necessario produrre una SR per ognuno dei livelli di CO<sub>2</sub> considerati. L'applicazione della procedura all'intero dominio avrebbe significato produrre diverse centinaia di migliaia di simulazioni con tempi di calcolo improponibili. Lo sviluppo di un meta-modello in grado di emulare i risultati di SIRIUS, seppure introducendo un'ulteriore fonte di incertezza comporta un risparmio di tempo e potenza di calcolo senza confronto.

SIRIUS è stato adottato per simulare le rese in un'ampia gamma di condizioni climatiche, e produrre un dataset su cui allenare la rete neurale, con lo scopo di ricondurre le rese a poche variabili esplicative. In realtà, per ricondurre la resa ad alcune variabili climatiche, sarebbe stato sufficiente sviluppare la rete neurale direttamente sulle rese osservate. Come già detto, però, la qualità e la quantità delle osservazioni non è sufficiente per sviluppare un modello statistico senza introdurre un errore grossolano. Inoltre, l'utilizzo del modello meccanicistico ha permesso di produrre valori di resa anche per condizioni climatiche decisamente diverse da quelle finora osservate (es. forti variazioni di precipitazione e temperatura, o semplicemente, l'incremento della CO<sub>2</sub>).

La ANN e' stata in grado di riprodurre adeguatamente la variabilità spaziale delle rese, su tutto il dominio, semplicemente utilizzando la temperatura media e le precipitazioni del periodo primaverile, in accordo con quegli studi che affermano che la resa del frumento è molto sensibile alle condizioni climatiche che si verificano durante la seconda parte della

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

stagione di crescita (García del Moral et al., 2003, Porter e Semenov, 2005, Reidsma e Ewert, 2008).

Le proiezioni probabilistiche, fornite dal MOHC, sono conformi ai risultati riportati, per l'Europa, in altri studi basati sulle simulazioni dei più avanzati modelli climatici a scala globale e regionale per lo stesso scenario (Giorgi e Lionello, 2008) e per scenari più ottimistici o pessimistici (Giorgi et al., 2004). Le variazioni di temperatura, precipitazione e CO<sub>2</sub> sono state calcolate in conformità con lo scenario di sviluppo socio-economico A1B. Tale scenario appartiene alla famiglia A1 in cui si descrive un mondo caratterizzato da una forte crescita economica, con la popolazione globale che raggiungerà un massimo intorno al 2050 per poi ridursi, e con una rapida introduzione di tecnologie nuove e più efficienti. Lo scenario A1B è considerato uno scenario intermedio in cui l'energia viene ricavata equamente da fonti fossili e alternative (Nakicenovic, 2001). Il quadro complessivo che ne deriva, rivela un sostanziale riscaldamento e inaridimento della regione mediterranea, con incrementi di temperatura nell'ordine di +4°C e riduzioni delle precipitazioni fino a -20% per la fine del secolo.

Questa tendenza dovrebbe dunque influenzare notevolmente le rese delle colture non irrigue, come ad esempio il frumento duro, soprattutto in ambienti, come il Mediterraneo, in cui la produttività delle colture è già fortemente condizionata dal clima (cfr. Olesen e Bindi, 2002; Alcamo et al., 2007). Come è noto, infatti, i processi biofisici alla base dello sviluppo, della crescita e della resa di una coltura sono variamente influenzati dalle condizioni climatiche ed in particolare dalla temperatura, dalla disponibilità idrica, dalla radiazione e dalla concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria (DaMatta et al., 2010; Tubiello e Ewert, 2002; Richter e Semenov, 2005; Olesen e Bindi, 2002).

I risultati dell'analisi svolta, indicano, sin dal prossimo futuro, un rischio elevato di ottenere rese inferiori alla media di lungo periodo, in tutto il bacino del Mediterraneo. Questa tendenza, seppur con qualche oscillazione, si mantiene pressoché inalterata fino alla fine del secolo. Tale rischio è attribuibile prevalentemente alla risposta negativa della coltura, in riferimento all'incremento di temperature e alla contemporanea riduzione delle precipitazioni, non adeguatamente controbilanciata dall'effetto fertilizzante dell'aumento di CO<sub>2</sub> atmosferica.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Dall'analisi delle SR risulta che l'incremento di temperatura e la riduzione delle precipitazioni determinano un progressivo calo delle rese, mentre all'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> corrisponde un generale aumento delle stesse.

Il principale effetto dell'incremento di temperatura consiste nella riduzione della durata dello sviluppo fenologico della coltura e conseguente anticipo delle diverse fasi di sviluppo (DaMatta et al., 2010, Batts et al., 1997). Questo, comporta una riduzione della radiazione intercettata dalla copertura vegetale, sia per la minore durata delle varie fasi, sia per lo slittamento delle stesse in periodi con minore numero di ore di luce e minore intensità radiante (Barnabás et al., 2008). Il risultato è che la pianta durante la fase vegetativa, accumula una minore quantità di biomassa, che si riflette in una minore quantità traslocata durante la fase di riempimento della granella e quindi in rese più basse. L'incremento di temperatura comporta anche una riduzione del guadagno netto di carbonio fissato dalla pianta. Nel frumento, che ha metabolismo di tipo C3, il tasso di fotosintesi raggiunge generalmente la saturazione tra 20°C e 32°C, mentre il tasso di respirazione aumenta rapidamente a partire da 15°C e raggiunge il massimo a circa 40°C (Porter e Semenov, 2005). Non ultimo, temperature elevate implicano spesso la riduzione delle aperture stomatiche, a causa dell'incremento del deficit evapotraspirativo, con conseguente riduzione della fotosintesi legata al minore afflusso di CO<sub>2</sub> nelle foglie (DaMatta et al., 2010).

La disponibilità idrica è probabilmente il fattore che maggiormente influisce sulla resa in ambienti semi-aridi come quello Mediterraneo (Araus et al., 2003, Wilhite, 1993). La risposta della coltura allo stress idrico è determinata da diversi fattori tra cui l'intensità dello stress e il momento nel quale si verifica (cfr parte introduttiva). In linea generale l'effetto negativo della carenza idrica può essere ricondotto alla ridotta evapotraspirazione che ne consegue, come viene riportato in diversi studi che hanno messo in evidenza una risposta pressoché lineare tra l'evapotraspirazione e la resa finale (Zhang e Oweiss, 1999). In condizioni di carenza idrica, infatti, la traspirazione viene ridotta significativamente e questo, oltre ad un minore afflusso di CO<sub>2</sub> nelle foglie determinato dalla riduzione delle aperture stomatiche, determina anche la diminuzione della dispersione del calore dalle foglie con conseguente aumento della temperatura della pianta (Kimball e Bernacchi, 2006).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

L'effetto dell'incremento di CO<sub>2</sub> si contrappone agli effetti negativi causati dalle temperature elevate e dalle ridotte precipitazioni (Ainsworth e Long, 2005). La principale conseguenza dell'aumento di CO<sub>2</sub> consiste nell'aumento del tasso di fotosintesi che determina l'aumento dell'efficienza d'uso della radiazione. A questo si accompagna la riduzione della conduttanza stomatica con conseguente diminuzione della traspirazione che porta, a sua volta, ad una maggiore efficienza d'uso dell'acqua (Drake et al 1997). L'insieme di queste risposte fisiologiche, a parità di altre condizioni, porta ad un incremento delle rese che, per il frumento, coltivato in condizioni idriche e nutritive non limitanti, si aggira intorno al 12-15% (Kimball et al., 2002; Ainsworth e Long, 2005) per concentrazioni di CO<sub>2</sub> di 550ppm.

La risposta della coltura, alle tre variabili prese in considerazione, non è lineare ed esistono degli effetti di interazione (Tubiello e Ewert, 2002). Queste risposte fisiologiche e fenologiche sono state implicitamente prese in considerazione durante l'allenamento della rete neurale, basato sulle simulazioni di SIRIUS risultanti da tutte le possibili combinazioni di variazioni di Tg, Pr e CO<sub>2</sub>, comprese nella gamma di variazione prospettata dalle proiezioni climatiche probabilistiche (variazioni da -2°C a +10°C per Tg, da -60% a +40% per Pr e da 350 a 750ppm di CO<sub>2</sub>). Va comunque evidenziato che la risposta di una coltura al clima dipende non solo dal clima medio, ma anche dalla distribuzione stagionale delle variabili climatiche. In questo studio, impiegando le variazioni medie annue di Tg e Pr, è stato assunto che non ci fosse alcuna variazione stagionale nell'andamento del clima futuro, e quindi i risultati potrebbero essere non necessariamente corretti se le distribuzioni stagionali future delle variabili climatiche risultassero molto diverse da quelle impiegate durante l'allenamento della ANN.

Nella nostra analisi, la variazione delle precipitazioni è il fattore che maggiormente influenza la resa in condizioni di scarsa disponibilità idrica (riduzione delle piogge), mentre all'aumentare delle precipitazioni, la temperatura diventa, progressivamente, il fattore limitante. La disposizione quasi orizzontale delle isolinee nelle SR, per variazioni negative delle precipitazioni e fino a incrementi di circa +2°C indica, per l'appunto, una scarsa risposta della resa alla variazione di temperatura in tali condizioni. L'effetto negativo delle temperature diventa predominante per valori di temperatura superiori o per variazioni positive delle precipitazioni (tendenza delle isolinee a disporsi verticalmente).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

L'aumento della CO<sub>2</sub> porta ad un generale incremento produttivo che si attesta intorno al 10% per valori di circa 550ppm. L'effetto della CO<sub>2</sub>, oltre ad uno slittamento delle isolinee verso destra (aumento delle rese), ne determina anche una leggera riduzione della pendenza. Questo indica che la più alta concentrazione di CO<sub>2</sub> tende a controbilanciare maggiormente l'effetto negativo delle temperature piuttosto che quello delle precipitazioni. Una possibile spiegazione risiede nel fatto che, al ridursi delle precipitazioni, il deficit evapotraspirativo aumenta e gli effetti negativi sulla crescita e lo sviluppo della pianta diventano via via predominanti rispetto all'effetto fertilizzante della CO<sub>2</sub>. Dinamiche simili sono state riscontrate anche da Richter e Semenov (2005) in uno studio in cui si riporta che gli effetti compensativi della CO<sub>2</sub> tendono a ridursi in presenza di valori elevati di evapotraspirazione e limitata capacità idrica del suolo

Nell'AR4, l'IPCC riporta che alle medie e alte latitudini la produttività delle colture potrà aumentare leggermente per incrementi di temperatura compresi tra +1°C e +3°C, tuttavia, nell'area del Mediterraneo, dove già la produttività delle colture, soprattutto quelle non irrigue, è fortemente limitata dalle alte temperature e dalla disponibilità idrica, si prevede che la risposta negativa delle colture al cambiamento del clima non verrà del tutto controbilanciata dall'incremento di CO<sub>2</sub> e porterà ad una complessiva riduzione delle rese (Olesen, Bindi, 2002, Ewert, 2005, Maracchi, 2005; Giannakopoulos et al., 2009).

Con riferimento alle SR riportate per la Toscana, si può osservare che la riduzione di resa attesa per incrementi di temperatura di circa +2°C, associati a riduzioni di Pr di circa il 10%, verrebbe pressoché bilanciata da valori di CO<sub>2</sub> intorno a 550ppm. D'altra parte, nello scenario adottato, 550ppm di CO<sub>2</sub> si raggiungono all'incirca nel 2050, quando la variazione prevista di temperatura, però, è superiore a +3°C e la riduzione delle piogge è circa 12%. Similmente alla fine del secolo l'ulteriore incremento produttivo determinato dalla CO<sub>2</sub> potrebbe annullare gli effetti negativi di temperature fino a +4°C purché le precipitazioni non scendano al di sotto del 10%. mentre i valori previsti (mediana della distribuzione probabilistica) sono rispettivamente +4.9 e -15%. Di conseguenza, l'effetto fertilizzante della CO<sub>2</sub>, non è mai risultato in grado di controbilanciare gli effetti deleteri delle variazioni di temperatura e precipitazioni.

La risposta delle colture all'incremento di CO<sub>2</sub> è, generalmente, più grande, se i valori di temperatura, in cui si sviluppano, sono inferiori a quelli ottimali (Soussana et al., 2010). Se le temperature invece sono superiori, la fertilizzazione carbonica è meno efficace (Batts

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

et al., 1998; Amthor, 2001). In questo caso anche moderati incrementi di temperatura possono essere sufficienti ad annullare l'effetto della CO<sub>2</sub> (Polley, 2002).

I risultati di questo studio, che attestano valori di rischio elevati già nei prossimi decenni, con incrementi di temperatura previsti di circa +1.4°C, suggeriscono che le attuali condizioni climatiche siano già limitanti e ulteriori aumenti delle temperature non potranno essere controbilanciati dalla CO<sub>2</sub>. A conforto di questa ipotesi, studi recenti evidenziano che, anche nelle regioni temperate, ci sono dei segnali significativi che l'incremento delle temperature verificatosi negli ultimi decenni ha già cominciato ad avere un impatto negativo sulle rese di importanti colture come il frumento (Soussana et al., 2010). Supit et al (2010) hanno condotto uno studio, a scala europea, sulla variazione delle produzioni potenziali (calcolate utilizzando un modello di simulazione meccanicistico) e osservate (ricavate dalle statistiche nazionali) di diverse colture, durante il periodo 1975-2005. Dalla loro analisi risulta che la produttività potenziale del frumento, soprattutto nelle regioni mediterranee, manifesta un chiaro trend negativo che viene interpretato come un sopravanzamento degli effetti negativi delle temperature rispetto all'incremento derivante dall'aumento di CO<sub>2</sub> e di altri fattori non climatici. Nello stesso periodo, le statistiche nazionali della resa riportano valori in aumento, ma il tasso d'incremento si sta progressivamente riducendo. Risultati simili sono riportati anche da Peltonen-Sainio et al. (2007) a livello globale, Schar et al. (2004) a livello europeo, da Gate (2009) riguardo le rese di frumento in Francia.

Secondo Ewert (2005) gli incrementi di CO<sub>2</sub> osservati negli ultimi decenni hanno sicuramente influito positivamente sulle rese di questo periodo, tuttavia l'effetto è decisamente piccolo in confronto a quello di altri fattori. Nello stesso studio, si riporta che il fattore tecnologico (ad es. tecniche di coltivazione, introduzione di nuove varietà, meccanizzazione, etc) ha avuto e avrà un peso determinante nel condizionare la produttività delle colture, anche se il suo effetto, comunque, andrà progressivamente riducendosi.

Il rischio di ottenere rese inferiori ad una certa soglia, può essere quindi, ridotto adottando opportune strategie di adattamento, volte a contrastare gli effetti negativi di un clima più caldo e secco. E' opportuno quindi considerare sia modifiche alle caratteristiche delle colture, che alla gestione di queste ultime, così da ridurre l'esposizione agli stress idrici e da calore, e/o allungarne il ciclo di crescita per garantire un adeguato accumulo di biomassa (Iglesias et al., 2009).

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Le possibili strategie di adattamento ai cambiamenti climatici dovrebbero prevedere l'uso di varietà maggiormente resistenti alla siccità, in grado di utilizzare più efficientemente la risorsa idrica e/o con una fenologia che meglio si adatti alle nuove condizioni ambientali. L'accorciamento del ciclo di crescita, infatti, è un fattore che riduce notevolmente le rese, e la selezione o l'impiego di varietà a ciclo più lungo può essere un modo per compensare la riduzione del tempo a disposizione della pianta per l'accumulo di biomassa in condizioni più calde (Tubiello et al. 2000). Nel Mediterraneo è possibile optare per varietà ad antesi anticipata, così che il periodo di riempimento si verifichi in momenti più freschi ed umidi, evitando la siccità estiva e lo stress da caldo. Si possono inoltre adottare tutte le pratiche di gestione che favoriscano l'anticipo delle fasi fenologiche, come ad esempio la semina anticipata (Moriondo et al., 2010). Nel bacino del Mediterraneo la maggior tolleranza alla siccità è probabilmente la caratteristica più importante nella scelta varietale per una coltura in asciutta (Araus et al., 2003), ma è necessario considerare anche altre strategie, come ad esempio l'irrigazione delle colture durante le fasi di crescita che sono più sensibili allo stress idrico (Zhang e Oweis, 1999), o l'aratura profonda per aumentare il contenuto d'acqua disponibile del suolo.

La metodologia utilizzata in questo studio, basata sull'uso delle superfici di risposta, ha evitato il gran numero di simulazioni che sarebbe stato necessario effettuare utilizzando l'approccio multi-simulativo. In questo caso, per la stima dell'impatto, le proiezioni probabilistiche delle variazioni congiunte di Tg e Pr, costituite da 10000 coppie di valori per ogni punto di griglia e per ogni finestra temporale futura, sarebbero dovute essere utilizzate per la creazione di altrettanti scenari climatici con cui alimentare il modello d'impatto. Tutto questo, a sua volta, avrebbe comportato un notevole dispendio di tempo ed energie legato alla generazione degli scenari climatici, alla loro gestione, e, non ultimo, all'applicazione del modello stesso per così tante simulazioni.

Per la creazione delle SR, invece, è stato possibile limitare le simulazioni del modello ad un numero contenuto ma sufficiente a coprire la variabilità, prospettata per il futuro, delle due variabili climatiche. Una volta prodotte le SR, è bastato sovrapporvi le PDF, che descrivono i cambiamenti futuri delle variabili in esame, per ottenere una distribuzione probabilistica dell'impatto (variazione di resa). Il confronto di questa distribuzione con la soglia critica prescelta ha, quindi, permesso di stimare il rischio legato al cambiamento del clima.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Tuttavia, si possono rilevare alcune importanti limitazioni in questa metodologia. Il principale svantaggio dell'approccio delle SR è che può risultare inappropriato quando i modelli d'impatto, come sono quelli meccanicistici di simulazione delle colture, sono fortemente dipendenti da molte variabili. In questo caso, si renderebbe necessario procedere alla costruzione di una SR multi-dimensionale, che, però, aumenta in maniera esponenziale il numero di simulazioni necessario a coprire tutte le possibili combinazioni delle variabili di interesse. Inoltre, l'interpretazione della SR che ne risulta può essere estremamente complicato (Fronzek et al., 2010). D'altra parte, la costruzione di una SR bidimensionale richiede necessariamente una semplificazione del modello, o comunque, la formulazione di una ipotesi sulla relazione tra le due variabili selezionate rispetto a tutte quelle che influiscono sul fenomeno analizzato.

In questo lavoro l'analisi è stata focalizzata sul rischio di una diminuzione delle rese legata ai cambiamenti climatici; non sono state valutate altre fonti di incertezza, ed in particolare quelle relative a i) il modello di impatto, ii) il modello statistico per la semplificazione del modello di impatto e iii) ai valori futuri delle altre variabili esplicative (quelle diverse da Tg e Pr).

I modelli di crescita delle colture, anche se di tipo meccanicistico, possono implicare molte relazioni semplici, derivate empiricamente, che non rappresentano compiutamente i reali processi della pianta. Molti aspetti, come le infestanti, i parassiti, gli eventi climatici estremi e le condizioni del suolo (salinità o acidità) sono poco considerati, o talvolta, completamente omessi, e rappresentano, di fatto, un'ulteriore fonte di incertezza (Iglesias et al., 2009).

L'incertezza aumenta ancora quando si adottano modelli statistici per la semplificazione di un modello di impatto meccanicistico. Come riportano Iglesias et al. (2009), l'impiego dei modelli statistici, per riprodurre la risposta delle colture in funzione delle più importanti variabili ambientali e gestionali, consente di estendere facilmente l'analisi su vasta scala, ma spiega solo in parte i meccanismi causali, e introduce un'ulteriore fonte di incertezza a causa delle semplificazioni o delle ipotesi circa il legame fra le variabili esplicative e la serie completa delle variabili di input richiesta dal modello.

Un interessante sviluppo futuro del presente lavoro potrebbe riguardare dunque l'analisi di tali incertezze, prendendo in considerazione l'adozione di diversi modelli di impatto così come di differenti modelli statistici nella valutazione del rischio.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

Infine, uno dei passaggi cruciali, forse il più importante, per gli aspetti pratici dell'applicazione di questa metodologia, consiste nella selezione della soglia di rischio, la definizione della quale può comportare grande eterogeneità nei risultati finali. In questo lavoro, sono state adottate due diverse soglie per la determinazione del rischio: il rendimento medio nel lungo periodo e una riduzione di resa del 10% rispetto al primo valore. La scelta di questi limiti è stata operata in maniera del tutto arbitraria, con la finalità di mettere in risalto l'importanza della soglia critica nella valutazione finale del rischio. Ad ogni modo, la produttività media di lungo periodo può essere considerata come il risultato dell'adattamento della coltura all'ambiente circostante. Di conseguenza, il rischio che le rese non raggiungano questo limite produttivo può essere interpretato come il risultato di un'alterazione dell'equilibrio tra clima e coltura, con tutto quello che ne consegue da un punto di vista ambientale, economico, politico e sociale.

Questa metodologia permette di ottenere informazioni riguardanti la probabilità, legata al cambiamento climatico, che una determinata soglia critica possa non essere raggiunta (o, al contrario, possa essere superata). L'adozione di una soglia diversa fornirà risultati differenti. La metodologia descritta, quindi, deve essere necessariamente inquadrata in un contesto più ampio, in cui la soglia di rischio, determinata grazie alla collaborazione tra gli esperti dei diversi settori (agricolo, economico, sociale, etc.) che costituiscono il sistema in esame, rappresenti effettivamente un criterio valido per la definizione del danno che il sistema stesso può sopportare. In questo modo, allora, si potrà fornire al decisore politico quella informazione essenziale affinché possano essere intraprese le più opportune contromisure.

## 5. Conclusioni

In questo lavoro è stata utilizzata una metodologia innovativa per la valutazione dell'impatto dei cambiamenti climatici in agricoltura. Grazie all'uso di proiezioni climatiche probabilistiche, questo approccio ha permesso di fornire un'indicazione riguardo la probabilità che una determinata soglia critica (in questo caso, una resa) possa non essere raggiunta (o al contrario, superata) in funzione delle condizioni climatiche future.

Nell'ambito di una valutazione degli impatti, finalizzata alla pianificazione delle possibili strategie di risposta al cambiamento del clima, l'utente finale (decisore politico, *stakeholder*, etc.) ha la necessità di conoscere la probabilità che quanto prospettato dall'analisi possa realmente accadere. Contrariamente agli approcci tradizionali, dove la valutazione dell'impatto è condizionata dalla scelta degli scenari climatici analizzati, per i quali però non può essere fornita alcuna indicazione riguardo la possibilità che possano realmente verificarsi, questa metodologia si prospetta, quindi, come un valido strumento di supporto decisionale in grado di soddisfare le richieste dell'utente finale sulla plausibilità dell'impatto.

L'utilizzo delle superfici di risposta, rispetto alla metodologia delle multi-simulazioni, seppure introducendo una ulteriore fonte di incertezza, legata alla semplificazione del modello d'impatto e alla necessità di ricondurre la risposta della coltura a due sole variabili climatiche esplicative, ha permesso, tuttavia, di applicare la metodologia ad un'area piuttosto vasta con un notevole risparmio di risorse in termini di tempi e capacità di calcolo.

I risultati dell'analisi svolta, delineano un quadro complessivo piuttosto preoccupante. Sin dal prossimo futuro, si rileva una tendenza alla riduzione delle rese medie di frumento duro, evidenziata dal fatto che il rischio di ottenere rese inferiori a quelle medie di lungo periodo risulta *probabile* (tra 66% e 90%) su quasi tutto il dominio e, seppur con qualche oscillazione, si mantiene a livelli elevati fino alla fine del secolo. Tale andamento è attribuibile prevalentemente alla risposta negativa della coltura, in riferimento all'incremento delle temperature e alla contemporanea riduzione delle precipitazioni, non adeguatamente controbilanciata dall'effetto fertilizzante dell'aumento di CO<sub>2</sub> atmosferica. L'incertezza che accompagna le proiezioni climatiche cresce spostandosi verso il futuro e

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

determina un progressivo aumento della variabilità della distribuzione delle rese che a sua volta si riflette, in particolare negli ultimi decenni del secolo, in una riduzione del rischio.

In questo lavoro, l'analisi è stata focalizzata sul rischio di una diminuzione delle rese legato all'incertezza che accompagna le proiezioni del cambiamento climatico medio. Ulteriori studi dovranno essere prodotti allo scopo di includere nell'analisi anche le altre fonti di incertezza. In particolare, è necessario esplorare la possibilità di valutare la risposta della coltura anche in funzione della variabilità climatica inter-stagionale, così come prevedere e integrare nella metodologia l'uso di diversi modelli di impatto e/o diversi emulatori necessari a semplificare le operazioni di calcolo.

## 6. Bibliografia

- Acevedo E., 1991. Morphophysiological traits of adaptation of cereals to Mediterranean environments. In: Acevedo E., Fereres E., Giménez C. e Srivastava J.P., (coordinatori), Improvement and Management of Winter Cereals under Temperature, Drought and Salinity Stress. Proc. ICARDA-INIA Symp., Cordoba, Spain, 26-29 Oct. 1987, pp. 85-96.
- Addiscott T.M., 1983. Kinetics and temperature relationships of mineralization and nitrification in Rothamsted soils with differing histories. *J. Soil Sci.* 34, 343-353.
- Ainsworth E.A., Long S.P., 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO<sub>2</sub> enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO<sub>2</sub>. *New Phytologist*, 165: 351–372
- Alcamo J, Moreno JM, Novaky B, Bindi M, Corobov R, Devoy R, Giannakopoulos C, Martin E, Olesen JE, Shvidenko A, 2007. Europe. In: Parry M, Canziani O, Palutikof J, Hanson C, van der Linden P (eds) *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.* Cambridge University Press, Cambridge, pp 541–580
- Amir, J., Sinclair, T.R., 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Res.* 28, 59-69.
- Amthor JS., 2001. Effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration on wheat yield: review of results from experiments using various approaches to control CO<sub>2</sub> concentration. *Field Crops Research* 73, 1–34
- Araus J.L., Villegas D., Aparicio N., García del Moral L. F., El Hani S., Rharrabti Y., Ferrio J. P., Royo C., 2003. Environmental Factors Determining Carbon Isotope Discrimination and Yield in Durum Wheat under Mediterranean Conditions. *Crop Sci.* 43:170-180
- Arnell NW, 2003. Effects of IPCC SRES emissions scenarios on river runoff: a global perspective. *Hydrol Earth Syst Sci* 7:619–641
- Aslyng H.C., Hansen S., 1982. Water Balance and Crop Production Simulation. Model WATCROS for Local and Regional Application. The Royal Veterinary and Agricultural University, Copenhagen, 200 pp.
- Barnabás B., Järgen K., Fehér A., 2008. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. *Plant, Cell and Environment*, 31, 11–38.
- Batchelor W.D., Yang X.B., Tschanz A.T., 1997. Development of a neural network for soybean rust epidemics. *Trans. ASAE* 40, 247–252.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Batts G.R., Morison J.K.L., Ellis R.H., Hadley P., Wheeler T.R., 1997. Effects of CO<sub>2</sub> and temperature on growth and yield of crops of winter wheat over four seasons. *Development in Crop Science*, 25:67-76.
- Batts GR, Ellis RH, Morison JIL, Nkemka PN, Gregory PJ, Hadley P., 1998. Yield and partitioning in crops of contrasting cultivars of winter wheat in response to CO<sub>2</sub> and temperature in field studies using temperature gradient tunnels. *Journal of Agricultural Science* 130, 17–27.
- Beek E.G., Stein A., Jansen L.L.F., 1992. Spatial variability and interpolation of daily precipitation amount. *Stochastic Hydrology and Hydraulics* 6, 304–320.
- Bellocchi G., Rivington M., Donatelli M., Matthews K., 2009. Validation of biophysical models: issues and methodologies. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, doi:10.1051/agro/2009001.
- Bindi M., Fibbi L., 2003. Modelli di simulazione delle colture. In: *Meteorologia e Climatologia applicate* (a cura di G. Maracchi). Istituto Geografico Militare, Firenze, pp. 182-204
- Bindoff, N.L., J. Willebrand, V. Artale, A. Cazenave, J. Gregory, S. Gulev, K. Hanawa, C. Le Quéré, S. Levitus, Y. Nojiri, C.K. Shum, L.D. Talley e A. Unnikrishnan, 2007: Observations: Oceanic Climate Change and Sea Level. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Blacklow W.M., Incoll L.D., 1981. Nitrogen stress of winter wheat changed the determinants of yield and the distribution of nitrogen and total dry matter during grain filling. *Aust. J. Plant Physiol.* 8, 191-200.
- Blake D., Rowland F., 1988. Continuing worldwide increase in tropospheric methane, 1978 to 1987. *Science*, 239, 1129–1131.
- Blum A., Mayer J., Gozlan G., 1982. Infrared thermal sensing of plant canopies as a screening technique for dehydration avoidance in wheat. *Field Crops Res.* 5:137–146.
- Bonciarelli F., Bonciarelli U., 1998. Cereali. In: *Coltivazioni erbacee*. Ed. Edagricole, Bologna, pp. 3-85.
- Brohan P., Kennedy J.J., Harris I., Tett S.F.B., Jones P.D., 2006. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J. Geophys. Res.*, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
- Brooking I.R., Kirby E.J.M., 1981. Interrelationships between stem and ear development in winter wheat: the effects of a Norin-10 dwarfing gene Gai/Rht2. *J. Agric. Sci.*, 97: 373-381.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: *Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali*, Università degli studi di Sassari.

- Brooking I.R., Jamieson P.D., Porter J.R., 1995. The influence of day length on final leaf number in spring wheat. *Field Crops Res.* 41, 155-165.
- Brooking, I.R., 1996. The temperature response of vernalization in wheat: a developmental analysis. *Ann. Bot.* 78, 507-512. da Ruiter, J.M., Stol, W., van Keulen, H., 1993. Simulation of yield and quality of malting barley. *Proc. Agron. Soc. NZ* 23, 11-19.
- Brovkin, V.M., et al., 2004. Role of land cover changes for atmospheric CO<sub>2</sub> increase and climate change during the last 150 years. *Global Change Biol.*, 10, 1253–1266.
- Campbell G.S., 1985. *Soil Physics with BASIC: Transport Models for Soil–Plant Systems*. Elsevier, New York, 150 pp.
- Carter T.R., Fronzek S., 2010. The use of probabilistic climate projections in assessing the risk of impacts in Europe. In Carter T., Leckebusch G., Olesen J.E. (eds): *Applying ensemble climate change projections for assessing risks of impacts in Europe*. *Natural Hazards and Earth System Science* (in press)
- Carter TR, Parry ML, Harasawa H, Nishioka S, 1994. IPCC technical guidelines for assessing climate change impacts and adaptations. UCL, London, and CGER, Tsukuba
- Carter, T.R., R.N. Jones, X. Lu, S. Bhadwal, C. Conde, L.O. Mearns, B.C. O'Neill, M.D.A. Rounsevell and M.B. Zurek, (2007) *New Assessment Methods and the Characterisation of Future Conditions*. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 133-171.
- Cazenave, A., Nerem R.S., 2004. Present-day sea level change: observations and causes. *Rev. Geophys.*, 42(3), RG3001, doi:10.1029/2003RG000139.
- Collins M., 2007. Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 365:2053-2075.
- Comiso J.C., 2003. Large scale characteristics and variability of the global sea ice cover. In: *Sea Ice - An Introduction to its Physics, Biology, Chemistry, and Geology* [Thomas, D. and G.S. Dieckmann (eds.)]. Blackwell Science, Oxford, UK, pp. 112–142.
- Conde, C., Lonsdale K., 2005. Engaging stakeholders in the adaptation process. *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, B. Lim, E. Spanger-Siegfried, I. Burton, E. Malone and S. Huq, Eds., Cambridge University Press, Cambridge and New York, 47-66.
- Confalonieri R., Acutis M., Bellocchi G., Donatelli M., 2009. Multi-metric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological Modelling*, 220:1395-1410.
- Roberto Ferrise, *Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro*, Tesi di dottorato in: *Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali*, Università degli studi di Sassari.

- Confalonieri R., Bregaglio S., Acutis M., 2010. A proposal of an indicator for quantifying model robustness based on the relationship between variability of errors and of explored conditions. *Ecological Modelling*, 221:960-964.
- Conway, T.J., et al., 1994. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the NOAA/CMDL sampling network. *J. Geophys. Res.*, 99(D11), 22831–22855.
- DaMatta F.M., Grandis A., Arenque B.C., Buckeridge M.S., 2010. Impacts of climate changes on crop physiology and food quality. *Food Research International*, 43: 1814-1823
- Denman, K.L., G. Brasseur, A. Chidthaisong, P. Ciais, P.M. Cox, R.E. Dickinson, D. Hauglustaine, C. Heinze, E. Holland, D. Jacob, U. Lohmann, S Ramachandran, P.L. da Silva Dias, S.C. Wofsy and X. Zhang, 2007: Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Dlugokencky, E.J., et al., 2003. Atmospheric methane levels off: Temporary pause or a new steady-state? *Geophys. Res. Lett.*, 30(19), doi:10.1029/2003GL018126.
- Downing TE, Harrison PA, Butterfield RE, Lonsdale KG (eds), 2000. *Climate change, climatic variability and agriculture in Europe: an integrated assessment*. Environmental Change Unit, University of Oxford, Oxford, 445 pp
- Drake BG, González-Meler MA, Long SP., 1997. More efficient plants: a consequence of rising atmospheric CO<sub>2</sub>? *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 48: 609–639.
- EEA, 2008. *Impacts of Europe's changing climate—2008 indicator-based assessment*. EEA report no. 4/2008, European Environment Agency, 246 pp
- Evans L.T., Wardlaw I.F., Fischer R.A., 1975. Wheat. In: Evans L.T. (ed.), *Crop physiology*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, pp. 101-149.
- Ewert F., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Metzger M.J., Leemans R., 2005. Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107:101–116.
- Ferrise R., Triossi A., Stratonovitch P., Bindi M., Martre P., 2010. Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study. *Field Crops Research*, 117:245-257
- Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, 2007: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*
- Roberto Ferrise, *Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro*, Tesi di dottorato in: *Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali*, Università degli studi di Sassari.

[Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

French B.K., Legg, B.J., 1979. Rothamsted irrigation 1964-1976. *J. Agric. Sci. Camb.* 92, 15-37.

Fronzek S., Carter T. R., Raisanen J., Ruokolainen L., Luoto M., 2010. Applying probabilistic projections of climate change with impact models: a case study for sub-arctic peatlands in Fennoscandia, *Climatic Change*, doi:10.1007/s10584-009-9679-y, available at: <http://www.springerlink.com/content/t2368305q468r872/fulltext.pdf>.

García del Moral L.F., Rharrabti Y., Villegas D., Royo, C., 2003. Evaluation of grain yield and its components in durum wheat under Mediterranean conditions: an ontogenetic approach, *Agron. J.*, 95:266–274.

Gate P., 2009. Les raisons du plafonnement des rendements. *Perspectives Agricoles* 365, 6–12.

Giannakopoulos C., Le Sager P., Bindi M., Moriondo M., Kostopoulou E., Goodess C. M., 2009. Climatic changes and associated impacts in the Mediterranean resulting from a 2 °C global warming, *Global and Planetary Change*, 68, 209-224.

Giorgi F., Lionello P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region, *Global and Planetary Change*, 63, 90-104.

Giorgi F., Bi X., Pal J., 2004. Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100)

Graham L., Hagemann S., Jaun S., Beniston M., 2007. On interpreting hydrological change from regional climate models. *Clim Change* 81(Supplement 1):97–122

Hammer G.L., Wright G.C., 1994. A theoretical analysis of nitrogen and radiation effects on radiation use efficiency in peanut. *Aust. J. Agric. Res.* 45, 575-589.

Hansen, J., Sato M., 2004. Greenhouse gas growth rates. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 101, 16109–16114.

Harris G.R., Collins M., Sexton D.M.H, Murphy J.M., Booth B.B.B., 2010. Probabilistic Projections for 21st Century European Climate. *Natural Hazards and Earth System Science* (accettato).

Harrison P.A., Butterfield R.E., Gawith M.J., 1995. Effects on winter wheat, sunflower and grassland in Europe, in: Harrison, P.A., Butterfield, R.E., Downing, T.E.: *Climate change and agriculture in Europe*. Research Report No. 9. Environmental Change Unit, University of Oxford, pp330–385

Haylock M. R., Hofstra N., Klein Tank A. M. G., Klok E. J., Jones P.D., New M., 2008. A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006, *J. Geophys. Res.*, 113, D20119, doi:10.1029/2008JD010201.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: *Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali*, Università degli studi di Sassari.

- Haywood M.A., Valdes J.P., 2004. Modelling Pliocene Warmth: Contribution of Atmosphere, Oceans and Cryosphere. *Earth and Planetary Science Letter*, 218(4), 363-377.
- Hegerl G.C., Zwiers F. W., Braconnot P., Gillett N.P., Luo Y., Marengo Orsini J.A., Nicholls N., Penner J.E., Stott P.A., 2007. Understanding and Attributing Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Hellstrom C., Chen D., 2003.. Statistical downscaling based on dynamically downscaled predictors: Application to monthly precipitation in Sweden. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22(6), 1-8.
- Henderson-Sellers A., 1993. An Antipodean Climate of Uncertainty. *Clim. Change* 25, 203–224.
- Hochman Z.V.I., 1982. Effect of water stress with phasic development on yield of wheat grown in a semi-arid environment. *Field Crops Res.*, 5: 55-67.
- Iglesias A., Garrote L., Quiroga S., Moneo M., 2009. Impacts of climate change in agriculture in Europe. PESETA-Agriculture study. Joint Research Centre Scientific and Technical Reports, European Commission.
- IPCC, 1994: IPCC Technical Guidelines for Assessing Climate Change Impacts and Adaptations. Part of the IPCC Special Report to the First Session of the Conference of the Parties to the UN Framework Convention on Climate Change, Working Group II, Intergovernmental Panel on Climate Change [Carter, T.R., M.L. Parry, H. Harasawa, and S. Nishioka (eds.)]. University College London, UK and Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Japan, 59 pp.
- Jamieson P.D., 1989. Modelling the interaction of wheat production and the weather. In: Johnson, R.W.M. (ed.), *Integrated System Analysis and Climate Impacts, Proceedings of a Workshop on System Analysis*, Wellington, 21-22 November 1989, Rural Policy Unit, MAF-Technology, Wellington, pp. 133-140.
- Jamieson P.D., Bernsten J., Ewert F., Kimball B.A., Olesen J.E., Pinter Jr. P.J., Porter J.R., Semenov M.A., 2000. Modelling CO2 effects on wheat with varying nitrogen supplies, *Agric. Ecosyst. Environ.*, 82, 27-37,
- Jamieson, P.D., Brooking, I.R., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1995: Prediction of leaf appearance in wheat: a question of temperature. *Field Crops Res.* 41, 35-44.
- Jamieson P.D., Semenov M.A., Brooking I.R., Francis G.S., 1998a. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *Eur. J. Agron.* 8, 161-179.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Jamieson P.D., Porter J.R., Goudriaan J., Ritchie J.T., van Keulen H., Stoll W., 1998b. A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought. *Field Crops Res.* 55, 23–44
- Janssen S., Andersen E., Athanasiadis I.N., Van Ittersum M.K., 2009. A database for integrated assessment of European agricultural systems. *Environmental Science & Policy* 12, 573–587.
- Joergensen S.E., Bendoricchio G., 2001. *Fundamentals of Ecological Modelling*, third ed. Elsevier, Oxford, UK, p. 530.
- Jones, R.N. 2000a: Managing uncertainty in climate change projections - Issues for impact assessment. *Climatic Change* 45, 403–419.
- Jones R.N., 2000b. Analysing the risk of climate change using an irrigation demand model. *Clim.Res.* 14:89-100.
- Jones R.N., 2001. An Environmental Risk Assessment/Management Framework for Climate Change Impact. *Natural Hazard*, 23: 197-230.
- Kartalopoulos S.V., 1996. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic*, IEEE Press, Piscataway.
- Katz R.W., 2002. Techniques for estimating uncertainty in climate change scenarios and impact studies *Clim. Res.* 20:167-185.
- Kaufman L., Rousseeuw P.J., 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Wiley, New York, 344 pp.
- Keeling C.D., Whorf T.P., Wahlen M., van der Plicht J., 1995. Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666–670.
- Kellomäki S, Leinonen S (eds), 2005. *Management of European forests under changing climatic conditions. final report of the project “silvicultural response strategies to climatic change in managed European forests” funded by the European Union under the contract EVK2-2000-00723 (SilviStrat)*. University of Joensuu, Faculty of Forestry. Research Notes 163, Joensuu, Finland
- Kimball B.A., Kobayashi K., Bindi M., 2002. Responses of Agricultural Crops to Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment. *Adv. Agron.* 77: 293-368.
- Kimball B. A., Bernacchi C. J., 2006. Evapotranspiration, canopy temperature, and plant water relations. In J. Nösberger, S. P. Long, R. J. Norby, M. Stitt, G. R. Hendrey, & H. Blum (Eds.), *Managed ecosystems and CO<sub>2</sub>* (pp. 311–324). Berlin: Springer-Verlag.
- Kirby E.J.M., 1990. Coordination of leaf emergence and leaf and spikelet primordium initiation in wheat. *Field Crops Res.* 25, 253-264.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Kosko B., 1992. Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence. Prentice-Hall, 1992
- Kundzewicz ZW, Parry ML, Cramer W, Holten J, Kaczmarek Z, Martens P, Nicholls RJ, Öquist M, Rounsevell MDA, Szolgay J (2001) Europe. Chapter 13. In: McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS (eds) Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 641–692
- Langenfelds R.L., et al., 2002: Interannual growth rate variations of atmospheric CO<sub>2</sub> and its delta C-13, H-2, CH<sub>4</sub>, and CO between 1992 and 1999 linked to biomass burning. *Global Biogeochem. Cycles*, 16, doi:10.1029/2001GB001466.
- Leenhardt D., Wallach D., Le Moigne P., Guérif M., Bruand A., Casterad M.A., 2006. Using crop models for multiple fields. In: Wallach, D., Makowski, D., Jones, J.W. (Eds.), *Working with Dynamic Crop Models. Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. Elsevier, Amsterdam, pp. 209–248.
- Linderson M., Achberger C., Chen. D., 2004. Statistical downscaling and scenario construction of precipitation in Scania, Southern Sweden. *Nordic Hydrology*, 35, 261-278.
- MacFarling Meure C., et al., 2006. The Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O ice core records extended to 2000 years BP. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14810, doi:10.1029/2006GL026152.
- MacKey J., 1988. A plant breeder's perspective on taxonomy of cultivated plants. *Biologisches Zentralblatt* 107:369-379
- Maracchi G., Sirotenko O., Bindi M., 2005. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Clim Change*, 70:117–35.
- Marland G., Boden T.A., Andres R.J., 2006. Global, regional, and national CO<sub>2</sub> emissions. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, TN*, [http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre\\_glob.htm](http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/emis/tre_glob.htm).
- Matthews H.D., et al., 2004. Natural and anthropogenic climate change: Incorporating historical land cover change, vegetation dynamics and the global carbon cycle. *Clim. Dyn.*, 22, 461–479.
- McCarthy J. J., Canziani F. O., Leary, Dokken. J. D., White. S. K (eds), 2001. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- McClelland J.L., Rumelhart D.E., the PDP Research Group, 1986a. *Parallel Distribution Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition*. Vol. I: Foundations. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- McClelland J.L., Rumelhart D.E., the PDP Research Group, 1986b. *Parallel Distribution Processing: Exploration in the Microstructure of Cognition*. Vol. II: Psychological and Biological Models. MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Mearns L.O., Easterling W., Hays C., Marx D., 2001. Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: part I, the uncertainty due to spatial scale *Climatic Change*, 51:131-172.
- Mearns LO, Hulme M, Carter TR, Leemans R, Lal M, Whetton P., 2001. Climate scenario development. In: McCarthy J, Canziani O, Leary N, Dokken D, White K (eds) *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, pp 739–768
- Meehl G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Midmore D.J., Cartwright P.M., Fischer R.A., 1984. Wheat in tropical environments. II. Crop growth and grain yield. *Field Crops Res.*, 8: 207-227.
- Mitchell B. F. J., Johns C.T., Eagles M., Ingram J. W., Davis, A.R., 1999. Towards the construction of climate change scenarios. *Climatic change*, 41(4), 547-581.
- Monteith, J.L., 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 281, 277-294.
- Morgan MG, Henrion M., 1990. *Uncertainty: a guide to dealing with uncertainty in quantitative risk and policy analysis*. Cambridge University Press, Cambridge
- Moriondo M., Bindi M., Kundzewicz Z. W., Szwed M., Chorynski A., Matczak P., Radziejewski M., McEvoy D., Wreford A., 2010. Impact and adaptation opportunities for European agriculture in response to climatic change and variability. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, in press.
- Mossedaq F., Smith D.H., 1994. Timing nitrogen application to enhance spring wheat yields in a Mediterranean climate. *Agron. J.*, 86: 221-226.
- Murphy J., 1999: An evaluation of statistical and dynamical techniques for downscaling local climate. *Journal of Climate*, 12(8), 2256-2283.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Murphy J.M., Booth B.B.B., Collins M., Harris G.R., Sexton D.M.H., Webb M. J., 2007. A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 365, 1993-2028.
- Murphy, J.M., Sexton, D.M.H., Jenkins, G.J., Boorman, P.M., Booth, B.B.B., Brown, C.C., Clark, R.T., Collins, M., Harris, G.R., Kendon, E.J., Betts, R.A., Brown, S.J., Howard T.P., Humphrey, K.A., McCarthy, M.P., McDonald, R.E., Stephens, A., Wallace, C., Warren, R., Wilby, R., Wood, R.A., 2009. UK Climate Projections Science Report: Climate change projections. Met Office Hadley Centre, Exeter, U.K. <http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/content/view/824/517/>
- Nakazawa T., Morimoto S., Aoki S., Tanaka M., 1997. Temporal and spatial variations of the carbon isotopic ratio of atmospheric carbon dioxide in the Western Pacific region. *J. Geophys. Res.*, 102, 1271–1285.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Fries B, Fenhann J, Gaffin S, Gregory K, Grüber A, Jung TY, Kram T, La Rovere EL, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Raihi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Shukla P, Smith S, Swart R, von Rooijen S, Victor N, Dadi Z (eds), 2000. Emissions scenarios. A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 599 pp
- New M., Hulme M., 2000. Representing uncertainty in climate change scenarios: a Monte-Carlo approach. *Integrated Assessment*, 1:203-213.
- New M., Lopez A., Dessai S., Wilby R., 2007. Challenges in using probabilistic change information for impact assessment: an example from the water sector. *Phil. Trans. R. Soc. A*. 365:2117-2131.
- Olesen J, Carter T, Díaz-Ambrona C, Fronzek S, Heidmann T, Hickler T, Holt T, Minguéz M, Morales P, Palutikof J, Quemada M, Ruiz-Ramos M, Rubæk G, Sau F, Smith B, Sykes M, 2007. Uncertainties in projected impacts of climate change on European agriculture and terrestrial ecosystems based on scenarios from regional climate models. *Clim Change* 81(Supplement 1):123–143
- Olesen J. E., Bindi M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy, *Europ. J. Agronomy*, 16, 239-262.
- Palmer T., 2005. Global warming in a nonlinear climate – can we be sure? *Europhys. News* 2:42-46
- Parry M., Arnell N., McMichael T., Nicholls R., Martens P., Kovats S., Livermore M., Rosenzweig C., Iglesias A., Fischer G., 2001. Millions at risk: defining critical climate change threats and targets. *Global Environmental Change*, 11: 181-183.
- Parry M. L., Rosenzweig C., Iglesias A., Livermore M., Fischer G., 2004. Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios, *Global Environmental Change* 14, 53–67.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Passioura J.B., 1977. Grain yield harvest index and water use of wheat. *J. Austr. Inst. Agric. Sci.*, 43: 117-120.
- Penman H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. A* 194, 120-145.
- Pittock A.B., Jones R.N., 1999. Adaptation to What and Why? *Environm. Monitor. Assess.*
- Polley H. W., 2002. Implications of atmospheric and climate change for crop yield. *Crop Science*, 42, 131–140.
- Pope V.D., Gallani M.L., Rowntree P.R., Stratton R.A., 2000. The impact of new physical parameterizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics* 16, 123–146.
- Porter J.R., Semenov M.A., 2005. Crop responses to climatic variation. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 2021–2035
- Porter J.R., 1993. AFRCWHEAT2: A model of the growth and development of wheat incorporating responses to water and nitrogen. *Eur. J. Agron.* 2, 69-82.
- Porter J.R., Jamieson P.D., Wilson D.R., 1993. Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Res.* 33, 131-157.
- Prentice I.C., et al., 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 184–238.
- Priestley C.H.B., Taylor R.J., 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Rev.* 100, 81-92.
- R Development Core Team, 2006. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- Ramaswamy V., et al., 2001. Radiative forcing of climate change. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 349–416.
- Reidsma P., Ewert F., 2008. Regional Farm Diversity Can Reduce Vulnerability of Food Production to Climate Change. *Ecology and Society*, 13 (1): 38. [online] <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss1/art38>.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: *Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali*, Università degli studi di Sassari.

- Reidsma P., Ewert F., Boogaard H., van Diepen K., 2009. Regional crop modelling in Europe: The impact of climatic conditions and farm characteristics on maize yields, *Agricultural System*, 100, 51-60.
- Richter G.M., Semenov M.A., 2005. Modelling impacts of climate change on wheat yields in England and Wales: assessing drought risks. *Agricultural Systems*, 84:77-97.
- Risbey J.S., Kandikar M., 2007. Expressions of likelihood and confidence in the IPCC uncertainty assessment process. *Climatic Change*. 85:19–31
- Robertson M.J., Brooking I.R., Ritchie J.T., 1996. The temperature response of vernalization in wheat: modelling the effect on the final number of mainstem leaves. *Ann. Bot.* 78, 371-381.
- Robertson M.J., Giunta F., 1994. Responses of spring wheat exposed to pre-anthesis water stress. *Aust. J. Agric. Res.* 5, 19-35.
- Rougier J.C., 2007. Probabilistic inference for future climate using an ensemble of climate model evaluations. *Climatic Change*, 81, 247–264.
- Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J. 1986. - Learning representations by back-propagating errors, *Nature* 323, 533-536
- Schar C., Vidale P. L., Luthi D., Frei C., Haberli C., Liniger M. A., Appenzeller C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* 427, 332–336.
- Schneider S., 2001. What is ‘dangerous’ climate change?, *Nature* 411,17-19.
- Schneider S. H., 1983. ‘CO<sub>2</sub>, Climate and Society: A Brief Overview’, in Chen, R. S., Boulding, E., and Schneider, S. H. (eds.), *Social Science Research and Climate Change: In Interdisciplinary Appraisal*, D. Reidel, Boston, pp. 9–15.
- Schröter D, Cramer W, Leemans R, Prentice IC, Araujo MB, Arnell NW, Bondeau A, Bugmann H, Carter TR, Gracia CA, de la Vega-Leinert AC, Erhard M, Ewert F, Glendinning M, House JI, Kankaanpää S, Klein RJT, Lavorel S, Lindner M, Metzger MJ, Meyer J, Mitchell TD, Reginster I, Rounsevell M, Sabate S, Sitch S, Smith B, Smith J, Smith P, Sykes MT, Thonicke K, Thuiller W, Tuck G, Zaehle S, Zierl B (2005) Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science* 310:1333–1337
- Semenov M.A., Stratonovitch P., 2010. Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim. Res.* 41:1-14.
- Semenov MA, 2007. Development of high-resolution UKCIP02-based climate change scenarios in the UK. *Agric For Meteorol* 144:127–138
- Shpiler L., Blum A., 1986. Differential reaction of wheat cultivars to hot environments. *Euphytica*, 35: 483-492.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Simpson, I.J., Blake D.R., Rowland F.S., Chen T.Y., 2002. Implications of the recent fluctuations in the growth rate of tropospheric methane. *Geophys. Res. Lett.*, 29(10), doi:10.1029/2001GL014521.
- Sinclair T.R., Siraiwa T., Hammer G.L., 1992. Variation in radiation-use-efficiency with increased diffuse radiation. *Crop Sci.* 32, 1281-1284.
- Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt, 2007: Technical Summary. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Soussana J., Graux A., Tubiello F.N., 2010. Improving the use of modelling for projections of climate change impacts on crops and pastures. *Journal of Experimental Botany*, 61:2217–2228.
- Sowers K.E., Pan W.L., Miller B.C., Smith J.L., 1994. Nitrogen use efficiency of split nitrogen applications in soft white winter wheat. *Agron. J.*, 86: 942-948.
- Spahni R., et al., 2005. Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science*, 310, 1317–1321.
- Spiertz J.H.J., Vos J., 1985. Grain growth of wheat and its limitation by carbohydrate and nitrogen supply. In: Day, W., Atkin, R.K., (Eds.), *Wheat Growth and Modelling*, Plenum Press, New York, pp. 129-141.
- Stott P.A., Forest C.E., 2007. Ensemble climate predictions using climate models and observational constraints *Phil. Trans. R. Soc. A.* 365:2029-2052.
- Supit I., van Diepen C.A., de Wit A.J.W., Kabat P., Baruth B., Ludwig F., 2010. Recent changes in the climate yield potential of various crops in Europe. *Agricultural Systems*, in stampa.. doi:10.1016/j.agsy.2010.08.009
- Tanner C.B., Ritchie J.T., 1974. Evapotranspiration empiricisms and modelling. *Am. Soc. Agron. Abst.*, p. 15.
- Tebaldi C., Knutti R., 2007. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 365:2053-2075.
- Therond O., Hengsdijk H., Casellas E., Wallach D., Adam M., Belhouchette H., Oomen R., Russell G., Ewert F., Bergez J., Janssen S., Wery J., Van Ittersum M.K., 2010. Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agric. Ecosyst. Environ.* doi 10.1016/j.agee.2010.05.007
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Thorne G.N., Pearman I., Day W., Todd A.D., 1988. Estimation of radiation interception by winter wheat from measurements of leaf area. *J. Agric. Sci. Camb.* 110, 101-108.
- Toderi G., D'Antuono L.F., 2000. Frumento (*Triticum* sp. pl.). In: Baldoni R. e Giardini L. (coordinatori), *Coltivazioni Erbacee, cereali e proteaginose*. Patron Ed., Bologna, pp. 33-108.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden e P. Zhai, 2007: Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Tubiello F.N., Ewert F., 2002. Simulating the effects of elevated CO<sub>2</sub> on crops: approaches and applications for climate change. *Europ. J. Agronomy*, 18:57-74.
- Tubiello F.N., Fischer G., 2007. Reducing climate change impacts on agriculture: Global and regional effects of mitigation, 2000-2080. *Technological Forecasting & Social Change*. 74,1030-1056
- Tubiello F.N., Donatelli M., Rosenzweig C., Stockle C.O. , 2000. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. *Europ. J. Agronomy*, 13, 179-189.
- van der Linden P., Mitchell J. F. B. (eds.), 2009. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*, Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 160pp.
- van der Voet P., van Diepen C.A., Oude Voshaar J., 1993. Spatial Interpolation of Daily Meteorological Data: A Knowledge Based Procedure for the Regions of the European Communities. Report 53/3. The Winand Staring Centre, Wageningen, and the Joint Research Centre, Ispra, Italy.
- Van Ittersum M.K., Donatelli M., 2003. Modelling cropping systems—highlights of the symposium and preface to the special issues. *European Journal of Agronomy* 18, 187–394.
- Van Slageren M.W., 1994. Wild wheats: a monograph of *Aegilops* L. and *Amblyopyrum* (Jaub e Spach). *Eig. Wageningen Agric. Univ. Pap.*, 1994 (7).
- Viner D., 2002. A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. In: Beniston M. (ed). *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*. Kluwer Academic Publisher. Netherlands pp139-149
- Wang Y.M., Lean J.L., Sheeley N.R., 2005. Modeling the sun's magnetic field and irradiance since 1713. *Astrophys. J.*, 625, 522–538.
- Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.

- Wetterhall F., 2002. Statistical downscaling in climate studies. An overview of used approaches, Uppsala University, Department of Earth Science, Hydrology, Report Series A No. 59, 27pp.
- Wilby R.L., Charles S.P., Zorita E., Timbal B., Whetton P., Mearns L.O., 2004. Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Wilby R.L., Harris I., 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resource Res* 42:W02419
- Wilhite D.A., 1993. Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Hingham, MA, 293 pp.
- Wuest S.B., Cassman K.G., 1992a. Fertiliser-nitrogen use efficiency of irrigated wheat. I. Uptake efficiency of pre-plant versus late-season application. *Agron. J.*, 84: 682-688.
- Wuest S.B., Cassman K.G., 1992b. Fertiliser-nitrogen use efficiency of irrigated wheat. II. Partitioning efficiency of pre-plant versus late-season application. *Agron. J.*, 84: 689-694.
- Zadoks J.C., Chang T.T., Konzak C.F., 1974. A decimal code for growth stages of cereals. *Weed Res.*, 14: 415-421.
- Zhang H., Oweis T. 1999. Water-yield relations and optimal irrigation scheduling of wheat in the Mediterranean region. *Agricultural Water Management*, 38, 195-211.
- Zhang Y.S., Li T., Wang B., 2004. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon. *J. Clim.*, 17(14), 2780–2793.

Roberto Ferrise, Valutazione del rischio climatico legato ai cambiamenti climatici per il frumento duro, Tesi di dottorato in: Agrometeorologia ed Ecofisiologia dei Sistemi Agrari e Forestali, Università degli studi di Sassari.