

LA VARIABILITÀ DELLA TEMPERATURA E DELLA PRECIPITAZIONE COME FATTORE AGRICOLO

C.Pona¹, G.Fontana², G.Sourkova³

(1) ENEA, CR Casaccia, Via Anguillarese 301, 00060 S.Maria di Galeria, Roma

(2) Master in Ingegneria del Suolo e delle Acque, Politecnico di Milano

(3) Moscow State University. Fac. Of Geography, Dept. of Meteorology
pona@casaccia.enea.it

Riassunto

Viene presentata una applicazione del modello CERES wheat per la Simulazione dell'effetto dei cambiamenti climatici sulle produzioni di Triticum Durum in vari ambienti dell'area italiana.

Abstract

Ceres wheat model is here applied for the simulation of the effects of climatic change on crop yield of Triticum durum in some different Italian environments.

Introduzione

C'è una grande incertezza su come i raccolti agricoli possano rispondere ai cambiamenti climatici, sebbene sia ben noto, a livello qualitativo, che i cambiamenti nella variabilità climatica possono avere, ed hanno effettivamente conseguenze importanti sulle produzioni. Il passato è ricco di fluttuazioni climatiche e/o di eventi climatici estremi con importanti effetti sull'agricoltura, come ad esempio la grande siccità che colpì negli anni '30 le Great Planes negli Stati Uniti.

Tuttavi la vulnerabilità agricola alle fluttuazioni climatiche, nonostante i notevoli miglioramenti tecnologici degli ultimi decenni, non è diminuita apprezzabilmente in tempi più recenti. Ogni anno infatti si assiste, in presenza di eventi climatici estremi (grandi siccità, ondate di gelo o di caldo, alluvioni) a allarmi più o meno giustificati da parte degli agricoltori che denunciano perdite enormi di produzione agricola, se non di interi raccolti. Anche nello scorso inverno una concomitanza di gelo e siccità invernale ha causato una grave allarme per le produzioni ortofrutticole.

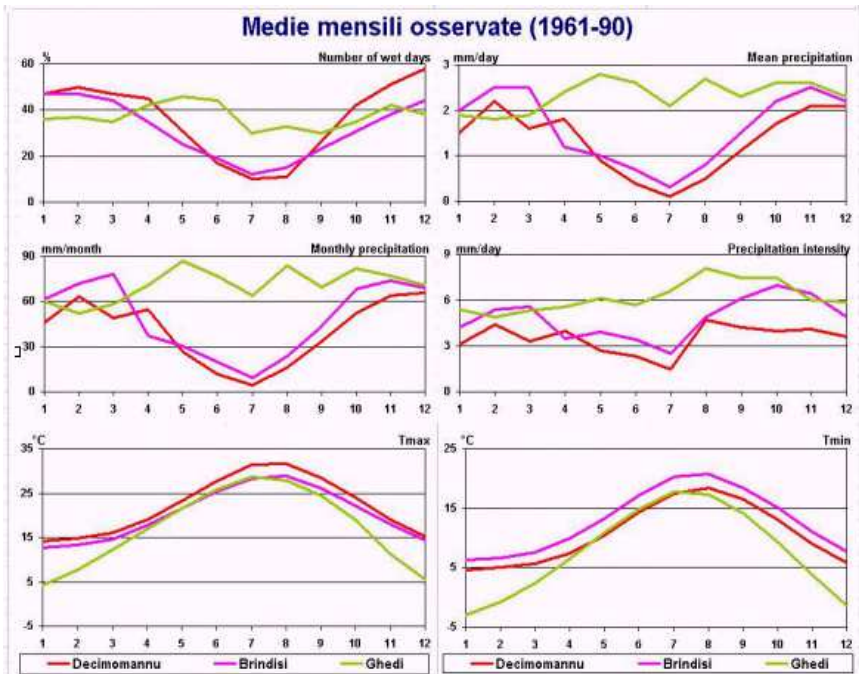
Inoltre, alla luce di possibili cambiamenti climatici dovuti, per esempio all'aumento della concentrazione di gas serra in atmosfera, c'è una sempre maggiore evidenza che si verranno a instaurare cambiamenti climatici non solo nelle medie climatiche, ma anche nei momenti di ordine superiore delle variabili più importanti. Questo fatto è particolarmente evidente per le precipitazioni (in molte regioni del pianeta, la tendenza è verso regimi con

un numero minore di eventi ma più intensi) e per la temperatura (maggiore frequenza di ondate di calore e gelate sempre più lunghe e fuori stagione). I raccolti agricoli sono particolarmente sensibili alla variabilità e in particolar modo agli eventi estremi. Si può dimostrare che i cambiamenti della variabilità climatica hanno un effetto maggiore per quanto riguarda la comparsa di fenomeni climatici estremi che non una variazione nelle medie di una particolare variabile climatica.

In questo lavoro presentiamo gli effetti dovuti a cambiamenti climatici ad alta frequenza (cioè su scala annuale fino a giornaliera) di temperatura e precipitazione sui raccolti agricoli, valutati con l'impiego del modello colturale CERES-Wheat (Ritchie and Otter, 1985).

Diversi lavori (Mearns et al., 1992) hanno indagato l'effetto dei cambiamenti nella variabilità primaria interannuale del clima sulle rese colturali, usando un approccio semplice basato sulla modifica della varianza delle principali variabili meteorologiche delle serie temporali osservate. Tale approccio, sebbene produca un gran numero di informazioni utili, appare irrealistico in quanto i cambiamenti nella variabilità interannuale sono considerati indipendenti dai cambiamenti nella variabilità giornaliera.

Figura 1 – caratteri termopluviometrici delle stazioni oggetto d'indagine



Nel lavoro di Mearns et al. la variabilità del raccolto aumenta con l'aumento della variabilità sia della temperatura che della precipitazione. Il valore medio delle rese invece diminuisce con l'aumentare della variabilità delle precipitazioni nelle località relativamente più umide, ma aumenta in località più secche. Gli effetti dovuti al cambiamento della variabilità della precipitazione sembrano più evidenti rispetto a quelli relativi alla temperatura. Questi risultati indicano quindi che si possono verificare impatti significativi sulle rese agricole simulate, anche per cambiamenti nella variabilità climatica, e che tali impatti sono del tutto paragonabili a quelli che si ottengono modificando le medie climatologiche.

In questo lavoro eseguiamo una serie di simulazioni applicando scenari meteorologici costruiti da un generatore stocastico con il quale possiamo modificare a piacimento la variabilità giornaliera di alcune variabili come la temperatura e la precipitazione. Una serie di scenari si riferiscono ad una situazione in cui le medie climatologiche sono identiche a quelle osservate in tre località italiane scelte per le differenti condizioni climatiche: due al Sud Italia (Decimomannu in Sardegna e Brindisi in Puglia) e una al Nord (Ghedi in Lombardia). Le caratteristiche climatologiche delle tre località sono mostrate in figura 1.

Come si vede dai diagrammi, Ghedi è caratterizzata da un regime pluviometrico abbastanza uniforme durante tutto l'anno e abbondante rispetto alle altre due località. Per quanto riguarda la temperatura, invece, si vede che la località sarda presenta per tutto l'anno sempre il valore più elevato di temperatura massima, mentre a Brindisi si trova che la temperatura minima è sempre la più alta delle tre località. Questo significa ovviamente che l'escursione termica a Decimomannu è sensibilmente superiore rispetto a quella di Brindisi. Un'elevata escursione termica di riscontra anche a Ghedi, dove, nei mesi invernali da dicembre a febbraio, la temperatura minima media è inferiore a 0°C mentre nel mese di marzo questa supera di poco tale soglia.

Una seconda serie di scenari, invece, si riferisce ad una situazione in cui si fanno variare i valori medi della temperatura e della precipitazione di una quantità calcolata con i modelli di circolazione generale, per ottenere quello che potrebbe essere il clima in condizione di raddoppio della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera.

Il modello CERES-Wheat: descrizione

CERES-Wheat è un modello numerico validato in molte località in tutto il mondo, che simula la crescita e le rese del frumento. È stato anche ampiamente usato per studi di valutazione di impatto del cambiamento climatico in tutto il mondo (Rosenzweig et al. 1995).

Il modello CERES-Wheat fa uso di funzioni matematiche semplificate per simulare la crescita e la resa di frumento in funzione di fattori relativi alla genetica della pianta, al tempo atmosferico, al suolo e alla gestione.

I dati meteorologici in input sono la radiazione solare giornaliera ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{day}$), la temperatura massima e minima giornaliera ($^{\circ}\text{C}$), e la precipitazione giornaliera (mm/day). Tra i processi simulati nel modello ci sono anche lo sviluppo fenologico, la ripartizione dei prodotti della fotosintesi, la crescita delle foglie e degli steli, la senescenza, l'accumulo di biomassa e la dinamica del sistema radicale. Una descrizione dettagliata si può trovare in Ritchie and Otter (1985) e Rosenzweig (1990).

Il bilancio idrico del suolo viene calcolato in CERES-Wheat per determinare una riduzione nei processi di crescita rispetto alla condizione ideale di assenza totale di stress dovuti a carenza idrica. Quando si simulano esperimenti su molti anni, questo consente di seguire l'andamento dell'umidità del suolo durante il periodo tra un raccolto e la semina successiva.

L'evapotraspirazione viene determinata dalla radiazione solare e dalla temperatura e si basa sul concetto di evaporazione all'equilibrio. Per tener conto di situazioni di aria insatura e per temperature massime elevate e minori di 0°C si applica un fattore correttivo moltiplicativo.

Dalla densità e dalla lunghezza delle radici si calcola l'assorbimento di acqua per traspirazione attraverso un meccanismo di "offerta e domanda".

Il contenuto di acqua di un suolo multistrato viene calcolato come bilancio tra evaporazione, assorbimento radicale, e flusso tra strati adiacenti. Viene calcolato anche il run-off attraverso il metodo delle curve USDA (Williams et Al. 1982).

Per valutare le rese effettive vengono calcolati quattro i fattori di deficit che dipendono dal contenuto di acqua, e che vengono utilizzati per penalizzare la crescita radicale, la fotosintesi, la traspirazione, la crescita di foglie e degli steli e la formazione di germogli. Il più importante tra questi è il fattore di deficit per l'acqua nel suolo (SWDF1) che influisce sulla fotosintesi e sulla traspirazione e che viene definito come il rapporto tra assorbimento radicale e l'evapotraspirazione potenziale della pianta. Il suo valore varia tra 0 (assenza di stress) e 1 (massimo stress). A sua volta questo fattore influisce su altri processi simulati da CERES-Wheat.

In CERES-Wheat sono previsti 3 tipi diversi di fallimento del raccolto: mancanza di germinazione, gelate invernali e un numero non sufficiente di culmi per metro quadrato.

La germinazione fallisce se si verifica una condizione di umidità insufficiente per 40 giorni dopo la semina. Questa condizione è definita come mancanza di acqua estraibile nello strato superficiale o nei due più superficiali contemporaneamente.

Nel modello CERES-Wheat, la routine che descrive il cosiddetto “winter-kill” è molto importante, dato che specialmente nelle Great Plains statunitensi e canadesi si tratta di un evento piuttosto frequente. Alle nostre latitudini, e negli esperimenti effettuati in Italia, questa situazione non si è mai verificata, per cui la citiamo solo per completezza.

L’ultimo caso di fallimento del raccolto si ha quando nello stadio 4 (dalla antesi all’inizio del riempimento della granella) il numero di cariossidi per metro quadrato scende sotto le 100. Questo avviene quando il peso dello stelo è basso, una variabile che dipende molto fortemente dal contenuto di acqua del suolo, attraverso il suo effetto sul LAI (Leaf Area Index, indice foliare). L’effettivo aumento della biomassa dipende da un fattore di deficit dell’acqua; in caso di deficit elevatissimi l’aumento della biomassa si riduce a valori molto bassi.

Il modello CERES-Wheat: validazione

Prima di utilizzare il modello per simulare le rese del frumento, si è proceduto alla sua calibrazione utilizzando i dati sperimentali delle stazioni di prova colturale della rete dell’Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura di Roma Inviolatella, Catania Libertinia, Fiorenzuola D’Arda e S. Angelo Lodigiano. La calibrazione consiste nel tarare i coefficienti genetici delle cultivar che si intendono utilizzare fino ad ottenere una riproducibilità accettabile dei dati sperimentali disponibili.

I dati meteorologici utilizzati per la calibrazione sono quelli della stazione sperimentale stessa, forniti dall’Istituto Sperimentale per la Cerealicoltura. Soltanto le serie di radiazione solare, sono state generate con il generatore di dati meteorologici WXGEN (Richardson e Nicks 1990) a partire dai dati di temperatura e precipitazione.

Dopo aver proceduto alla calibrazione, il modello è stato validato facendolo “girare” in annate diverse da quelle utilizzate per la calibrazione, in modo da verificarne l’attendibilità.

Sono state impiegate due cultivar tra quelle maggiormente in uso in Italia: la Duilio e la Creso, quest’ultima ottenuta all’ENEA (Bozzini et al., 1976) negli anni ’80 ed utilizzata prevalentemente come varietà test, con una serie storica di sperimentazione di quasi 20 anni.

La validazione del modello è stata condotta su due variabili fenologiche: la resa finale e la data di spigatura. In figura 2 è indicata la validazione per la resa. Per entrambe le cultivar la data di spigatura viene anticipata dal modello di 14 giorni per la Creso (test $t=1.61$, $t_{critico}= 2.03$, $p=0.10$) e di 12 giorni per la Duilio (test $t=1.37$, $t_{critico}= 2.03$, $p=0.18$). Per le rese, invece si ha una sovrastima per la Creso (test $t=-0.71$, $t_{critico}= 2.03$, $p=0.48$) e una

sottostima per la Duilio (test $t=0.99$, $t_{\text{critico}}= 2.03$, $p=0.33$). La variabilità interannuale è invece molto prossima a quella osservata.

Gli scenari meteorologici

Il modello, calibrato e validato, è stato quindi utilizzato per valutare gli effetti del cambiamento climatico sulle rese del frumento duro (*Triticum Durum*) e per analizzare la variabilità interannuale delle produzioni.

I dati meteo originali per le località prescelte per la simulazione sono stati forniti dal Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare. Tali serie coprono tutto il periodo di riferimento 1961-90, ma non dispongono dei dati di radiazione solare giornaliera. In un primo momento sono stati riempiti i "buchi" dovuti a dati di temperatura e precipitazione mancanti con il generatore WXGEN (Richardson e Nicks 1990), e in secondo momento si è passati alla ricostruzione dei dati di radiazione solare, sempre con WXGEN, a partire dai dati di temperatura massima / minima e precipitazione.

Il generatore stocastico di serie meteorologiche.

Il generatore di Richardson (1991) simula serie di dati meteo giornalieri di temperatura massima e minima, di radiazione solare incidente e di precipitazione. L'occorrenza di precipitazione viene rappresentata da una catena di Markov al primo ordine a due stati che tiene conto della dipendenza stocastica delle serie alternate di giorni secchi e umidi. I parametri stimati sono le due probabilità di transizione P_{11} e P_{01} , che indicano la probabilità che un giorno piovoso segua un giorno piovoso, e la probabilità che un giorno piovoso segua un giorno asciutto. La quantità di pioggia nei giorni piovosi, invece, è simulata con la funzione di distribuzione gamma:

$$f(x) = x^{\alpha-1} e^{-x\beta^{-1}} / (\beta^\alpha \Gamma(\alpha)), x \geq 0$$

dove

α = parametro di forma

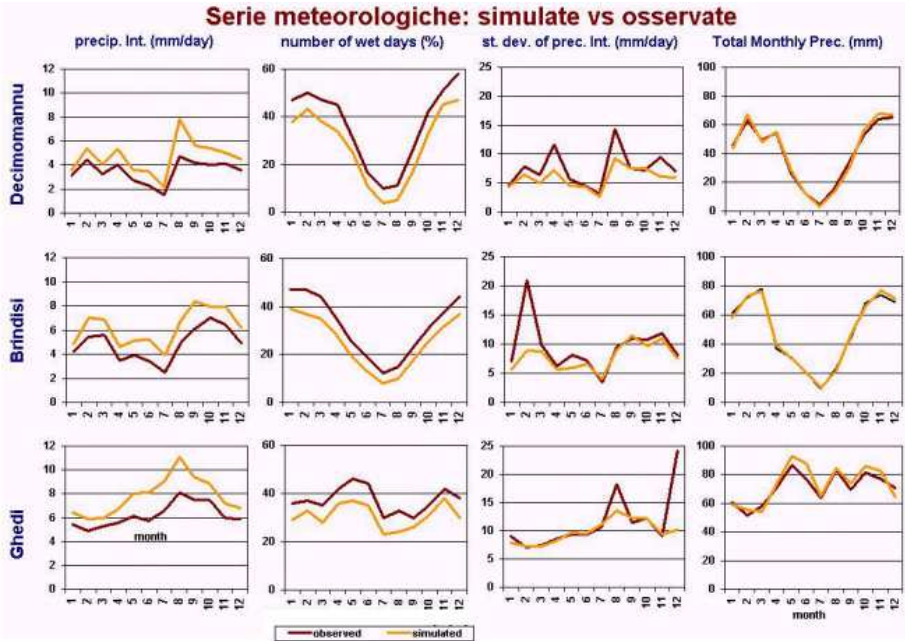
β = parametro di scala

$\Gamma(\alpha)$ = funzione gamma di α

La media μ della distribuzione è $\alpha\beta$ e la varianza σ^2 è $\alpha\beta^2$.

Le temperature massima e minima e la radiazione solare vengono simulate come un processo multivariato del primo ordine autoregressivo (per i dettagli si rimanda all'articolo di Richardson).

Figura 2 – confronti fra serie misurate e simulate



Il modello riproduce molto bene le serie relative alla temperatura, sia massima che minima. Per quanto riguarda le precipitazioni (vedasi figura 3), invece, il confronto fra le climatologie osservate (30 anni, 1961-90) e quelle generate con il modello di Richardson mostra che quest'ultimo sottostima in tutte le stagioni dell'anno il numero di eventi piovosi, sovrastimando, di conseguenza l'intensità del singolo evento. Per quanto riguarda invece la quantità mensile di precipitazione, questa è riprodotta molto bene per Decimomannu e Brindisi mentre è leggermente sovrastimata a Ghedi, specialmente in maggio e giugno.

Analisi di Sensibilità.

Per ognuna delle 3 località prescelte abbiamo fatto un'analisi di sensibilità, cambiando la varianza interannuale della temperatura e della precipitazione di un fattore 0.5 e 2. Per generare le nuove serie meteorologiche con varianze alterate, alle serie osservate si è di nuovo applicato il generatore stocastico per ottenere delle nuove serie di dati meteorologici di 100 anni,

con le stesse medie climatologiche dei dati osservati. Per ogni stazione si sono ottenute quindi 5 scenari meteorologici lunghi 100 anni con le caratteristiche riportate nella tabella seguente.

Tabella 1 – caratteristiche degli scenari meteorologici

Scenario	Varianza T	Varianza P	Medie T,P
BASE	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>
PV0.5	<i>osservata</i>	<i>osservata x 0.5</i>	<i>osservata</i>
PV2	<i>osservata</i>	<i>osservata x 2</i>	<i>osservata</i>
TV0.5	<i>osservata x 0.5</i>	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>
TV2	<i>osservata x 2</i>	<i>osservata</i>	<i>Osservata</i>

Il significato “fisico” degli scenari sta nella differente probabilità, rispetto ai dati osservati, del verificarsi di eventi termo-pluviometrici estremi e nella maggiore variabilità delle stesse grandezze su scala giornaliera. Riducendo la varianza, infatti, la probabilità di eventi estremi decresce sensibilmente e il clima così generato è più uniforme nel tempo. Nell’altro caso, raddoppiando la varianza osservata, invece, è più probabile ottenere sia valori estremi, più “lontani” dalle medie, che ondate di calore, gelate e grandi eventi piovosi. Tutti questi fattori come si vedrà influiscono nelle rese agricole.

Risultati

Il modello DSSAT non consente, se non con particolari metodiche, di variare anno per anno le pratiche di gestione. Per ragioni di semplicità e velocità, considerando che in questo studio si cerca di isolare l’effetto diretto del cambiamento della varianza delle variabili fisiche più importanti ai fini della coltivazione, abbiamo considerato, per ogni anni, una data di semina fissa, che rappresenta una media tra le date effettivamente utilizzate negli esperimenti in zone vicine. Il suolo utilizzato è un suolo medio della regione in cui si trova la località in studio.

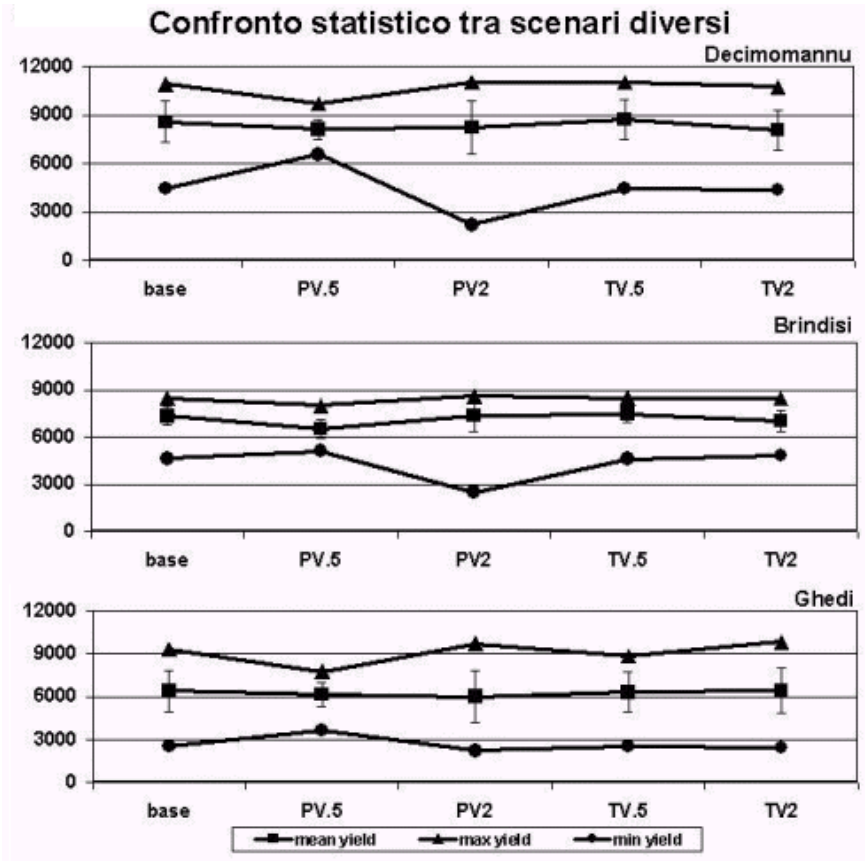
Per isolare l’effetto del cambiamento delle varianze rispetto ad altri fattori, si è fatto girare il modello trascurando gli stress da carenze di nutrienti, che in taluni casi influiscono sulle rese assai più degli eventi meteo estremi.

La tabella 2 mostra in maniera sintetica i risultati ottenuti simulando le rese per il frumento duro, cultivar Creso, nelle tre località prese in considerazione, applicando gli scenari meteorologici di tabella 1.

Tabella 2 – statistiche di resa per i cinque scenari.

DECIMONANNU						
	<i>base</i>	<i>PV.5</i>	<i>PV2</i>	<i>TV.5</i>	<i>TV2</i>	
<i>Mean yield, kg/ha</i>	8570	8131	8217	8721	8065	
<i>Max yield, kg/ha</i>	10922	9712	11043	11034	10745	
<i>maturity day</i>	169	173	173	168	168	
<i>Min yield, kg/ha</i>	4441	6549	2205	4433	4373	
<i>maturity day</i>	164	163	166	165	164	
<i>Standard deviation, kg/ha</i>	1276	607	1647	1259	1254	
<i>Harvest Index*, kg/kg</i>						
<i>max yield year</i>	0,565	0,576	0,543	0,562	0,579	
<i>min yield year</i>	0,349	0,509	0,232	0,345	0,369	
BRINDISI						
	<i>base</i>	<i>PV.5</i>	<i>PV2</i>	<i>TV.5</i>	<i>TV2</i>	
<i>Mean yield, kg/ha</i>	7346	6530	7348	7496	7019	
<i>Max yield, kg/ha</i>	8466	7999	8616	8508	8454	
<i>maturity day</i>	171	173	175	168	179	
<i>Min yield, kg/ha</i>	4625	5123	2495	4587	4829	
<i>maturity day</i>	169	154	169	170	169	
<i>Standard deviation, kg/ha</i>	579	598	985	529	692	
<i>Harvest Index, kg/kg+B55</i>						
<i>max yield year</i>	0,548	0,536	0,514	0,518	0,530	
<i>min yield year</i>	0,390	0,543	0,242	0,383	0,412	
GHEDI						
	<i>base</i>	<i>PV.5</i>	<i>PV2</i>	<i>TV.5</i>	<i>TV2</i>	
<i>Mean yield, kg/ha</i>	6387	6159	6001	6317	6426	
<i>Max yield, kg/ha</i>	9315	7778	9722	8843	9826	
<i>maturity day</i>	209	209	173	210	208	
<i>Min yield, kg/ha</i>	2514	3634	2205	2522	2411	
<i>maturity day</i>	210	207	166	211	209	
<i>Standard deviation, kg/ha</i>	1446	813	1822	1384	1544	
<i>Harvest Index, kg/kg</i>						
<i>max yield year</i>	0,501	0,494	0,506	0,487	0,521	
<i>min yield year</i>	0,239	0,287	0,204	0,242	0,231	

Figura 3 – rappresentazione grafica dei dati in tabella 2.



Per ogni scenario, abbiamo riportato, oltre alla resa media (sui 99 anni di raccolto), anche i valori di resa massima e minima con l'indicazione del giorno di maturazione a partire dal 1° gennaio (doy, day of the year), della deviazione standard, e dell'indice di raccolta per gli anni di massima e minima resa.

In figura 3 viene fornita una rappresentazione grafica dei risultati di tabella 2. Come si può notare risulta evidente l'assenza di notevoli differenze rispetto alla situazione di BASE; infatti solo in un caso, vale a dire lo scenario PV0.5 a Brindisi, si ha una differenza nella resa media superiore al 10%. Nonostante questo la variabilità interannuale, rappresentata sul grafico tramite i valori di massima e minima resa nei 99 anni di simulazione, presenta una notevole variabilità.

In particolare, in tutte le località, lo scenario PV0.5 presenta la deviazione standard più piccola, il che significa, in termini di produttività, l'assenza di annate particolarmente negative o particolarmente produttive. Viceversa, lo scenario PV2, in presenza cioè di una variabilità nella precipitazione doppia rispetto a quella dei dati meteorologici osservati, mette in evidenza il verificarsi di annate decisamente scarse, con valori minimi molto bassi rispetto al valor medio e allo stesso tempo anche i valori in assoluto più elevati, indice di annate particolarmente favorevoli dal punto di vista meteorologico.

In generale, la risposta delle rese a scenari meteorologici con variabilità modificata mostra delle differenze nei valori assoluti ma mette in evidenza alcune linee di tendenza.

Precipitazione

In condizioni BASE si vede che le rese più alte si riscontrano a Decimomannu, con un coefficiente di variabilità (CV) del 14.9%. Le rese più basse e la variabilità più alta invece si riscontrano a Ghedi (CV=22.6%), in Lombardia, dove evidentemente, a parità di condizioni, il regime climatico più continentale porta già di per se a eventi climatici di variabilità superiore rispetto alle altre due località, con eventi piovosi più concentrati e escursioni termiche più evidenti sia a bassa che ad alta frequenza. Ricordiamo che in questi esperimenti semplificati non si tiene conto di fattori come lo stress da nutrienti e come la composizione dei suoli, che invece hanno particolare importanza in campo.

Lo scenario PV2, in tutte le località, porta alla più evidente e grande (anche numericamente) variabilità nella resa interannuale, dovuta al fatto che in un regime di questo tipo, in cui le precipitazioni si concentrano su eventi piovosi numericamente inferiori ma più intensi, aumentano anche i periodi secchi. Quando i periodi secchi cadono in prossimità degli stadi fenologici della pianta che più soffrono per stress idrici, la resa ne viene ridotta considerevolmente. Il CV a Ghedi, per esempio, passa da 22.6% a 30.4%, a Decimomannu da 14.9% a 20.0% e a Brindisi da 7.9% a 13.4%.

Lo scenario PV0.5 mostra una riduzione nelle rese (-5.1% a Decimomannu, -11.1% a Brindisi, -3.6% a Ghedi), ma anche il coefficiente di variazione più basso (7.5% a Decimomannu, 9.2% a Brindisi, 13.2% a Ghedi) tra tutti gli scenari generati a partire da BASE.

E' interessante constatare che l'indice di raccolto (Harvest Index, HI), cioè la frazione di biomassa accumulata nella granella, presenta la minima variazione tra l'annata di massima e l'annata di minima resa. Mantenedosi sempre su valori elevati e confrontabili con lo scenario BASE (superiore a 50%) nelle due stazioni meridionali, mentre negli altri scenari il suo valore diminuisce sensibilmente in tutte le località.

Temperatura

Le variazioni della deviazione standard in temperatura sembrano essere meno influenti ai fini delle rese rispetto alla precipitazione.

Nello scenario TV0.5 i valori delle medie differiscono, rispetto allo scenario BASE al massimo per 1.7% a Decimomannu, e quindi non in modo statisticamente significativo, visto il CV di 14.4%. Anche il valore di CV non differisce significativamente da BASE.

Lo scenario TV2 presenta un leggero calo nelle rese (-5.8% a Decimomannu, -4.5% a Brindisi, inalterato a Ghedi), che anche in questo caso non arriva comunque a una significatività statistica apprezzabile. Il CV risulta leggermente superiore rispetto al caso BASE.

Sensibilità al Cambiamento Climatico

I modelli di circolazione generale (GCM), oltre a essere utilizzati per riprodurre il clima osservato, sono molto utili per fare previsioni sul clima futuro. Una applicazione è la previsione del clima per un aumento della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, e, più in generale, per aumenti della forzante radiativa dovuti alla presenza di gas ad effetto serra in atmosfera. In questo studio ci limiteremo a considerare l'effetto di un raddoppio della concentrazione atmosferica di CO₂ rispetto al valore pre-industriale di fine XVIII secolo, cioè 560 ppm.

Per generare le nuove serie meteorologiche da dare in input al DSSAT per valutare le rese, abbiamo ricavato, dal modello di circolazione generale regionalizzato MM4 sviluppato all'National Center for Atmospheric Research (NCAR) di Boulder (Colorado, USA), le medie mensili degli aumenti di temperatura (ΔT) e le medie dei rapporti tra le precipitazioni (rP) tra le run in condizioni di raddoppio di concentrazione di CO₂ (2CO₂) e le run in condizioni attuali (CNTL).

I valori di ΔT e rP ottenuti, sono stati sommati (ΔT) e moltiplicati (rP) al valore BASE. La serie meteorologica così ottenuta è stata quindi "data in pasto" al generatore di serie meteorologiche utilizzato in precedenza per ottenere, anche in questo caso, uno scenario base per raddoppio di CO₂, che chiameremo NN, con gli stessi valori di varianza di temperatura e precipitazione, e, in maniera del tutto simile al caso di clima osservato, i 4 scenari a variabilità modificata, già ottenuti nella situazione di clima attuale o osservato. Per distinguere gli scenari dal caso precedente li abbiamo chiamati come nella tabella che segue, dove la prima lettera indica la varianza della temperatura, e la seconda la varianza della precipitazione. Il valore N, indica che la varianza è la stessa (Normal) delle osservazioni, H (Halved) che è dimezzata e D (Doubled) che è raddoppiata. In questo caso

la lunghezza delle serie meteorologiche generate è stata limitata a 30 anni, ottenendo di conseguenza 29 dati di resa per ciascuna località.

scenario	Varianza T	Varianza P	Medie T,P
NN	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>
NH	<i>osservata</i>	<i>osservata x 0.5</i>	<i>osservata</i>
ND	<i>osservata</i>	<i>osservata x 2</i>	<i>osservata</i>
HN	<i>osservata x 0.5</i>	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>
DN	<i>osservata x 2</i>	<i>osservata</i>	<i>osservata</i>

In questo caso abbiamo fatto girare il modello CERES-Wheat per tutte le località di cui erano disponibili dati meteorologici sufficienti (cioè con meno del 10% di dati mancanti, per ridurre al minimo gli errori dovuti alle tecniche di ricostruzione dei dati mancanti). Abbiamo comunque escluso le stazioni sulle isole minori e le stazioni di montagna. Non essendo, infatti, interessati al valore effettivo delle rese, ma soltanto alle variazioni tra il caso BASE e i vari scenari di raddoppio di CO₂ in atmosfera, abbiamo potuto prendere in considerazione tutte le stazioni disponibili.

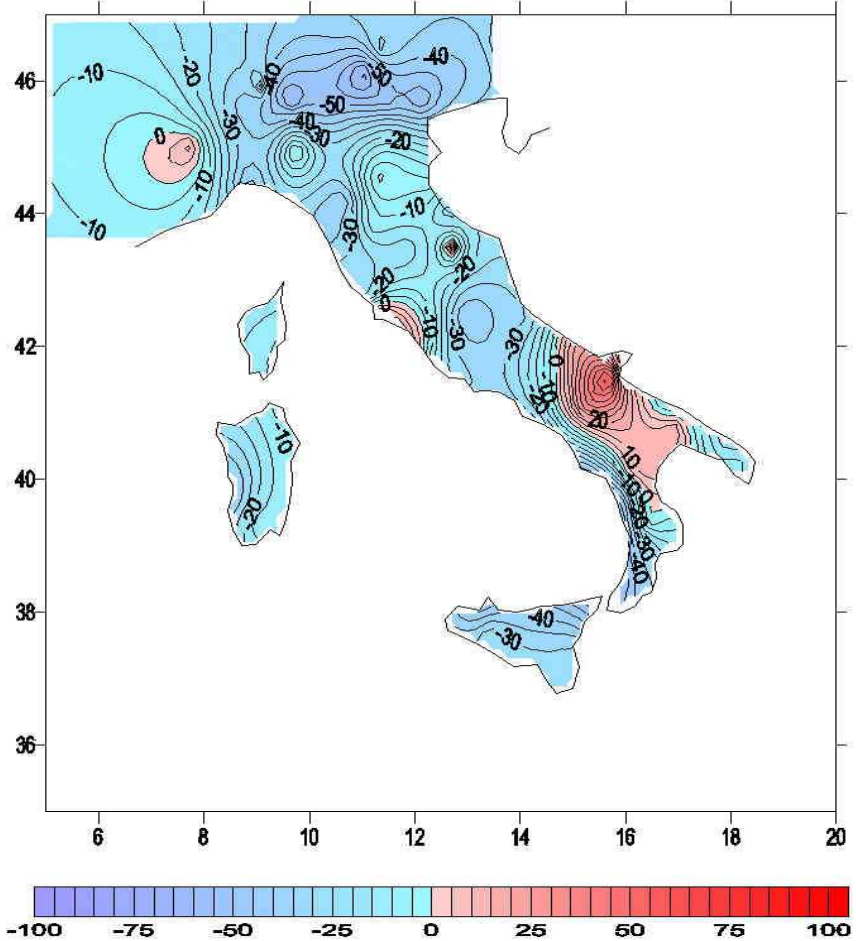
Le stazioni selezionate con questi criteri sono risultate 62, sparse in tutto il territorio italiano ed i risultati ottenuti confermano la tendenza riscontrata anche in letteratura, di una marcata riduzione delle rese in caso di cambiamento climatico. Ricordiamo che l'entità dell'aumento di temperatura previsto dal modello GCM-MM4 varia da 4 a 6 °C a seconda della località e della stagione e che per le precipitazioni si fornisce un aumento medio annuale, concentrato soprattutto nei mesi invernali, almeno come quantità di pioggia, e una marcata riduzione in altri periodi dell'anno, particolarmente in primavera e autunno. Nei mesi estivi al sud viene previsto un aumento notevole della precipitazione, in valori relativi anche di 10 volte, ma che in termini di mm di pioggia al suolo risulta comunque modesto.

I valori delle rese ottenuti sono plottati nelle figure 4-8 e si riferiscono al confronto delle rese tra gli scenari in caso di raddoppio di CO₂ e clima attuale, in caso di stessa varianza di temperatura e precipitazione.

Si vede abbastanza chiaramente una generalizzata riduzione delle rese su tutto il territorio italiano tranne che la Puglia, con riduzioni più marcate sulla pianura padana (fino al 50% in meno).

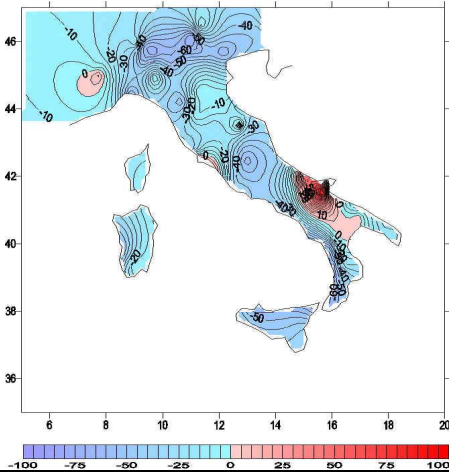
Figura 4 - Scenario NN – Confronto 2CO2vsCNTL

Difference NN_MM-CN, CRESO
Average yield (98 years), %



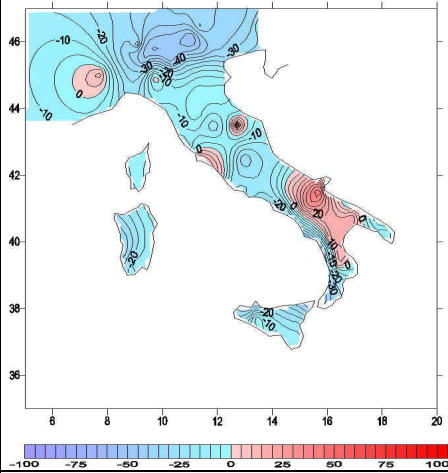
*Figura 5 - Scenario NH – Confronto
2CO2vsCNTL*

Difference NH_MM-CN, CRESO
Average yield (98 years), %



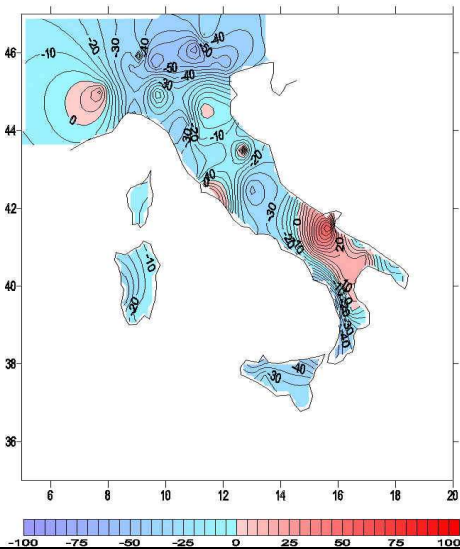
*Figura 6 - Scenario ND – Confronto
2CO2vsCNTL*

Difference ND_MM-CN, CRESO
Average yield (98 years), %



*Figura 7 - Scenario HN – Confronto
2CO2vsCNTL*

Difference HN_MM-CN, CRESO
Average yield (98 years), %



*Figura 8 - Scenario DN – Confronto
2CO2vsCNTL*

Difference DN_MM-CN, CRESO
Average yield (98 years), %

