

PROGETTO CLIMAGRI



RELAZIONE TECNICO-SCIENTIFICA DEL 3° ANNO DI ATTIVITÀ

Ente: **Istituto di Biometeorologia, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Sassari**

Titolo del Progetto: **Cambiamenti Climatici e Agricoltura. Progetto finalizzato di ricerca sulle conseguenze delle variazioni climatiche sull'agricoltura in Italia**

Titolo del Sottoprogetto: **2 - Agricoltura italiana e cambiamenti climatici**

Titolo della Ricerca: **2.2 - Individuazione delle aree agricole e delle colture a forte rischio per variazioni climatiche**

Responsabile della Ricerca: **Dr. Pierpaolo Duce**

INTRODUZIONE

I più recenti studi sull'entità del riscaldamento globale hanno mostrato come tale fenomeno non sia uniforme, ma che, ad aree in cui la temperatura è aumentata, si alternano vaste aree in cui si è osservata una diminuzione della temperatura (IPCC, 1995, 2001). Per quanto riguarda il bacino del Mediterraneo, Rambal e Hoff (1998) hanno evidenziato come, nelle ultime decadi, si sia verificato un aumento superiore a quello medio globale della temperatura media annua e della frequenza delle onde di calore, mentre una recente analisi delle serie storiche termo-pluviometriche italiane ha mostrato un significativo aumento della temperatura media annua (0.4 °C al Nord, 0.7 °C al Sud) e una significativa diminuzione delle precipitazioni annue, in particolare nell'Italia meridionale (Brunetti et al., 2000).

Nelle regioni aride e semi-aride la variabilità dei fattori ambientali e meteorologici è un elemento chiave nel determinare la produzione agricola. In queste regioni la variabilità interannuale del clima e, in particolare, delle precipitazioni piovose rappresenta, infatti, una componente intrinseca del sistema e il principale fattore di rischio. Parry e Carter (1988) e Rosenzweig (1982) hanno evidenziato le difficoltà che si incontrano, alla scala locale, nella valutazione del rischio climatico per le colture e le aree agricole.

Il Responsabile della Ricerca

Dr. Pierpaolo Duce

Nell'ambito delle attività del progetto CLIMAGRI è stata sviluppata una metodologia per la stima, alla scala locale, del rischio climatico, attuale e futuro, in agricoltura basandosi sui principi della *Land Evaluation*. Tale tecnica fornisce informazioni qualitative su un territorio (il potenziale produttivo, le limitazioni, la vulnerabilità, ecc.) attraverso l'analisi di precise caratteristiche bio-fisiche e socio-economiche. Una seconda fase del lavoro ha riguardato l'analisi degli effetti, su alcune colture chiave, delle variazioni climatiche prospettate dagli scenari climatici futuri. Ciò ha comportato la calibrazione, validazione e implementazione di modelli colturali di simulazione della crescita e dello sviluppo delle colture, che hanno lo scopo di guidare le scelte di gestione e pianificazione dell'agricoltura a medio e lungo termine (Tsuji et al., 1998). L'utilizzo di modelli matematici di simulazione ha costituito uno strumento operativo per individuare la risposta biofisica delle colture a diverse *driving forces* (clima, elementi nutritivi, pratiche colturali, gestione delle risorse idriche, ecc.) (van Diepen et al., 1989; Goudriaan, 1996; Kropff et al., 2001; Stöckle et al., 2003).

OBIETTIVI GENERALI E SPECIFICI

Il principale obiettivo delle attività è stato quello di sviluppare una metodologia affidabile e facilmente trasferibile per l'individuazione delle aree agricole e delle colture a rischio climatico nella regione mediterranea e di fornire uno strumento operativo sia per la pianificazione territoriale nel lungo periodo sia per la gestione del territorio nel breve periodo. In sintesi, gli scopi del programma di ricerca sono riconducibili a due tipologie: (i) metodologici, attraverso la messa a punto di indici di rischio climatico e di metodologie di analisi per la valutazione della suscettibilità alle variazioni climatiche delle aree agricole e delle colture, e (ii) operativi, al fine di fornire mappe di rischio climatico attuale e futuro delle produzioni agricole e di rendere disponibili strumenti quantitativi e qualitativi per decisioni in materia di programmazione agricola del territorio. Le procedure di analisi messe a punto sono state applicate ai casi reali della Sardegna e dell'Emilia-Romagna facendo ricorso al sistema di classificazione della *Land Capability for Agriculture* (LCA, valutazione della capacità d'uso di un territorio ai fini agricoli). Inoltre, per effettuare una valutazione quantitativa degli effetti delle possibili variazioni climatiche sulla fenologia e sulla produttività di particolari "colture chiave" degli ambienti mediterranei, quali il frumento e il pomodoro, si è proceduto alla calibrazione e validazione di un appropriato modello di sviluppo delle colture e alla sua applicazione utilizzando scenari climatici futuri.

MATERIALI E METODI

I dati utilizzati ai fini dell'analisi sono stati:

- I. la Carta Ecopedologica della Sardegna, predisposta nell'ambito delle attività per la realizzazione della Carta dei Suoli di Europa alla scala 1:250.000;
- II. la Carta Pedologica dell'Emilia Romagna;
- III. la Carta di Uso del Suolo della Sardegna CASI 3, realizzata dall'INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria);
- IV. le serie storiche termopluviometriche della Sardegna (1961-2000) e dell'Emilia-Romagna (1951-2000);
- V. gli scenari climatici futuri previsti per la regione Sardegna, forniti dalla sede di Firenze del CNR-IBIMET, sulla base del modello climatico HADCM3 sviluppato dall'Hadley Centre for Climate Prediction and Research, UK Met. Office, che fornisce una dettagliata rappresentazione tridimensionale delle maggiori componenti del sistema climatico (Gordon et al., 2000);
- VI. le serie storiche di dati meteorologici (1973-2004) relativi alle stazioni ricadenti nelle aziende del Centro Regionale Agrario Sperimentale della Sardegna (CRAS);

VII. i dati agronomici di prove sperimentali nazionali (frumento, dal 1975 al 2004) e regionali (pomodoro, dal 1988 al 2004), forniti dalla banca dati del Centro Regionale Agrario Sperimentale della Sardegna (CRAS).

La gestione e l'elaborazione dei dati e l'analisi dei diversi tematismi (suolo, clima e uso del suolo) sono stati effettuati tramite un Sistema Informativo Geografico in ambiente ArcGIS.

L'applicazione delle tecniche di *Land Evaluation* richiede una particolare attenzione quando si analizzano le qualità di un territorio che derivano dalla misura di variabili dinamiche, come ad esempio le variabili meteorologiche (Rossiter, 1996). In questo caso, infatti, le variabili dinamiche sono convertite di solito in variabili statiche, perdendo così l'informazione legata alla naturale variabilità dei fenomeni. A questo proposito, in letteratura sono reperibili pochi esempi di studi in cui le normali fluttuazioni interannuali del clima sono incorporate in una metodologia di valutazione del territorio (van Lanen et al., 1992; Hudson e Birnie, 1999; Motroni et al., 2002; Duce et al., 2003).

La classificazione dei territori della Sardegna e dell'Emilia Romagna in termini di LCA climatica è stata effettuata analizzando le due principali variabili che rendono possibile lo svolgimento dell'attività agricola: la disponibilità idrica (espressa come massimo deficit idrico potenziale del suolo, $PSMD_{max}$) e la disponibilità di energia (espressa come sommatoria dei gradi giorno cumulati, CDD). Sono stati calcolati i valori climatici di $PSMD_{max}$ e CDD dei trentenni 1951-1980 (per l'Emilia-Romagna), e 1961-1990 e 1971-2000 (per entrambe le regioni). Attraverso un algoritmo di *cluster analysis* e alcune valutazioni empiriche si è giunti alla classificazione dei territori in termini di LCA climatica individuando sette classi climatiche e diverse sottoclassi (*Prime*, con nessuna limitazione e *Non Prime*, con crescenti limitazioni d'uso). Allo scopo di valutare la variabilità spazio-temporale del rischio climatico, è stata analizzata la variazione interannuale di $PSMD_{max}$ e CDD nelle diverse aree durante il periodo considerato. Da questa analisi è emerso che la variazione numericamente e agronomicamente più significativa è rappresentata dai valori assunti nei diversi anni da $PSMD_{max}$. La determinazione dell'indice di rischio climatico è stata infine effettuata analizzando, per ciascun area, le transizioni osservate nel periodo considerato tra le classi di deficit idrico. Nel caso della Sardegna, l'intera procedura è stata quindi applicata agli scenari climatici futuri con proiezioni sino all'anno 2099.

La procedura di valutazione del rischio climatico ha consentito di realizzare carte del rischio climatico per la Sardegna e l'Emilia-Romagna in cui sono rappresentate sinteticamente sia le condizioni "medie" del territorio sia la sua naturale variabilità climatica.

La valutazione quantitativa del possibile impatto dei cambiamenti climatici sulle colture agrarie è stata effettuata utilizzando il modello *CERES-Wheat* implementato nel pacchetto software DSSAT 4.0 (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (Ritchie e Otter, 1985; Jones et al., 2003). La calibrazione e la validazione del modello ha richiesto un set di dati minimi relativi al clima, al suolo e alle pratiche agricole di una varietà e di un sito specifico. Nel caso di studio, si sono utilizzati i dati delle sperimentazioni nazionali di frumento e delle prove sperimentali regionali di pomodoro del Centro Regionale Agrario Sperimentale (CRAS).

In questa relazione, per esigenze di sintesi, sono state riportate le metodologie e i risultati relativi al solo frumento. Le parcelle sperimentali di frumento sono localizzate in provincia di Cagliari (località Benatzu e Ussana). L'indagine è stata incentrata su tre cultivar di *Triticum durum* Desf. ("Creso", "Duilio", "Simeto"). I dati meteorologici giornalieri (relativi a temperatura massima e minima, precipitazione e radiazione globale) del periodo 1975-2004 sono stati acquisiti dalla stazione meteorologica del CRAS ubicata nel territorio di Ussana.

Il modello ha richiesto in input un set minimo di dati agronomici tra cui: la data di semina, l'epoca di spigatura, la resa, la data di raccolta, il numero di piante/m², la distanza tra le file, la profondità di semina, le concimazioni e le lavorazioni. Inoltre, è stato necessario specificare le caratteristiche fisico-chimiche del terreno.

Maggiori dettagli sulle attività, le metodologie sviluppate e i risultati ottenuti sono comunque

riportati negli articoli scientifici pubblicati durante il triennio di attività e allegati alla presente relazione.

RISULTATI E DISCUSSIONE

L'analisi delle serie storiche termopluviometriche dei periodi analizzati e il calcolo dei valori climatici di $PSMD_{max}$ e CDD per i diversi trentenni ha consentito di rilevare un significativo aumento in entrambe le regioni sia della disponibilità energetica (aumento della temperatura) sia delle condizioni di deficit idrico (riduzione delle precipitazioni e aumento del tasso evapotraspirativo) nel corso dell'ultimo decennio del secolo scorso, come mostrato nelle Figure 1 e 2.

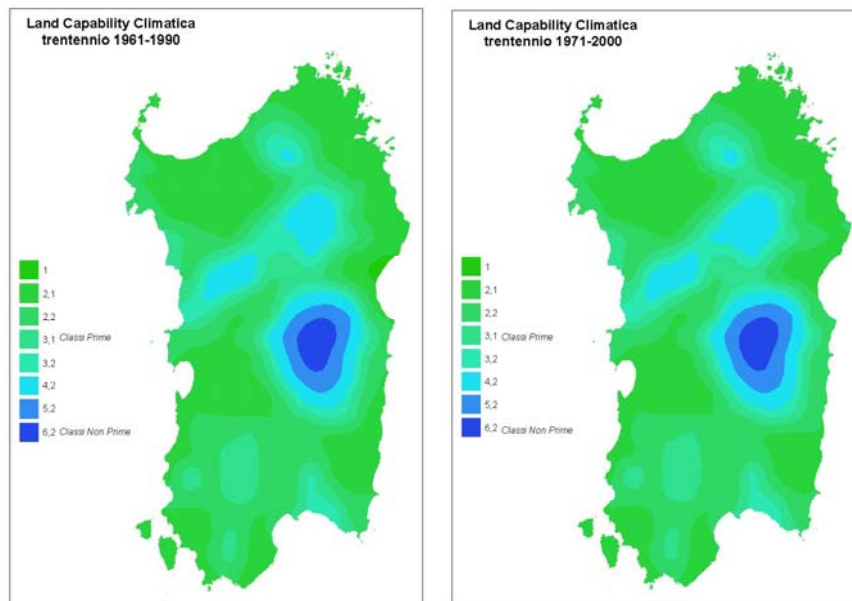


Figura 1 – Carte della Land Capability for Agriculture climatica della Sardegna relative ai periodi 1961-1990 e 1971-2000.

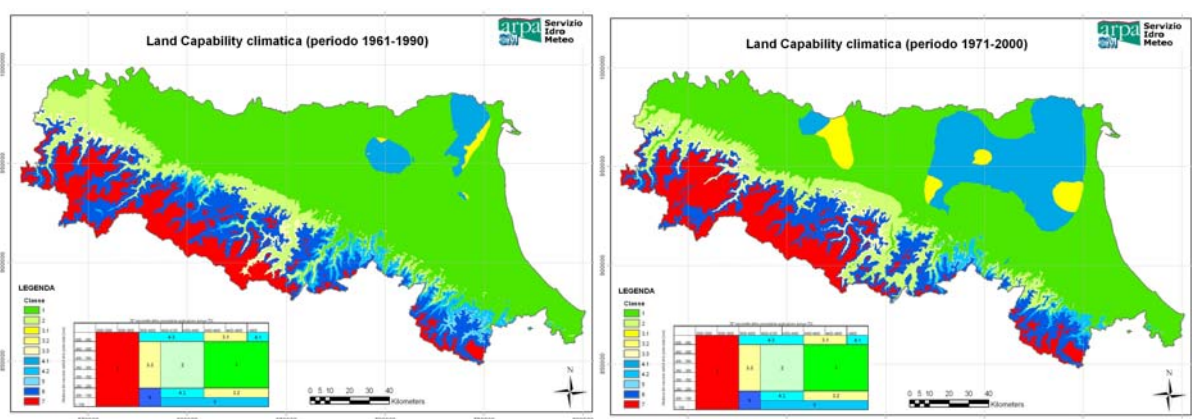


Figura 2 – Carte della Land Capability for Agriculture climatica dell'Emilia-Romagna relative ai periodi 1961-1990 e 1971-2000.

I risultati ottenuti attraverso l'applicazione della *Land Evaluation* per la Sardegna e l'Emilia Romagna sono stati in sintesi:

- la carta della LCA pedologica;

- la carta della LCA climatica;
- la carta della LCA pedo-climatica.

La carta della LCA climatica della Sardegna è stata costruita sui dati dei due trentenni di riferimento 1961-1990 e 1971-2000. In entrambi i casi vi è una netta prevalenza di classi *Prime* rispetto a quelle *Non Prime*. Queste ultime sono dislocate soprattutto nelle aree di montagna o in alcune zone con caratteristiche geomorfologiche e orografiche particolarmente sfavorevoli all'utilizzo agricolo. Le classi *Prime* di maggiore vocazionalità sono prevalenti nell'isola e presenti soprattutto nelle zone della Nurra, della Gallura e del Campidano. Quest'ultima regione, dove si concentra gran parte dell'agricoltura intensiva, è caratterizzata da valori al limite tra le classi *Prime* e quelle *Non Prime* a causa della frequenza delle condizioni di siccità.

Le variazioni climatiche osservate nell'ultimo decennio del secolo scorso (in particolare le variazioni della disponibilità idrica) hanno determinato nel trentennio 1971-2000 un chiaro peggioramento della vocazionalità agricola di alcune porzioni del territorio da un punto di vista climatico.

In Figura 3 sono mostrate le Carte della LCA pedo-climatica della regione Sardegna relative al clima attuale (trentennio 1961-90 e 1971-2000) ottenute dalla sovrapposizione delle caratteristiche pedologiche delle diverse aree del territorio secondo la classificazione della Land Capability pedologica e delle caratteristiche climatiche definite secondo la classificazione della Land Capability climatica.

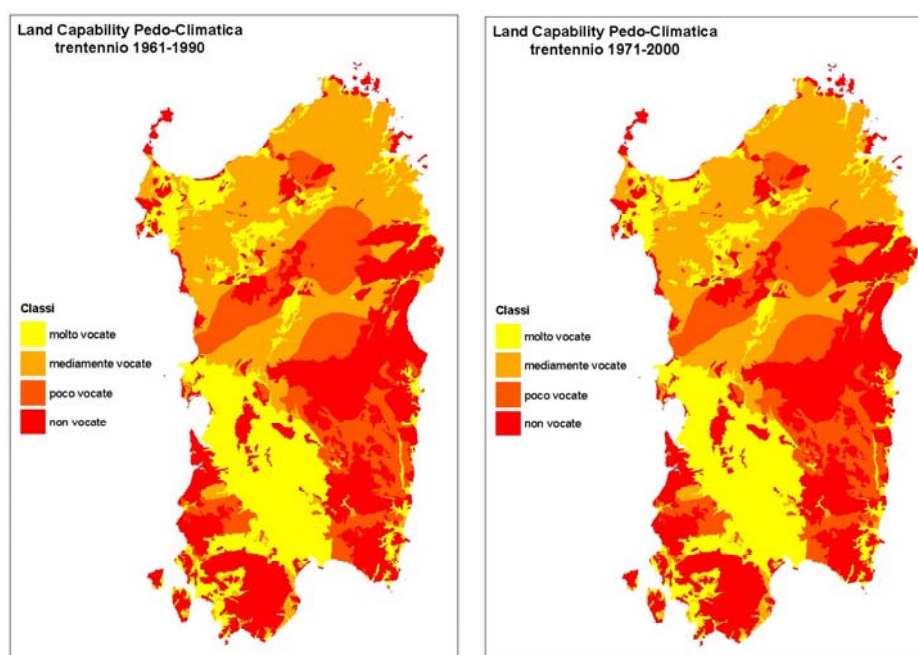


Figura 3 – Carte della LCA pedo-climatica della Sardegna relative ai periodi 1961-90 e 1971-2000.

Le differenze riscontrate nel confronto della LCA climatica dei due trentenni analizzati non ha determinato alcuna differenza nella classificazione in termini di vocazionalità del territorio dal punto di vista pedo-climatico. In sostanza, la variazione dei regimi termici e pluviometrici osservata nel corso degli anni '90 non è stata di entità tale da modificare la variabilità spaziale delle caratteristiche agro-climatiche del territorio della Sardegna.

L'integrazione dei dati pedologici con i dati climatici ha portato a classificare come aree molto vocate quelle comprese nelle classi pedologiche I e IV (terreni arabili) e nelle classi *Prime* da un punto di vista climatico. Le aree molto vocate si trovano principalmente in corrispondenza delle pianure maggiori, (la piana della Nurra a nord-ovest e la pianura del Campidano nel centro-sud

dell'isola), nella porzione centro-settentrionale della regione, in alcune aree della parte sud-occidentale. La superficie complessiva può essere stimata in 567.000 ettari, pari a circa al 24% del totale. Le aree mediamente e poco vocate, quelle in cui le caratteristiche pedologiche presentano delle limitazioni crescenti per la coltivazione, ricadono nelle aree montane, nella regione centrale dell'isola e in quella nord-orientale e rappresentano circa il 45% del totale. Tali aree sono utilizzate principalmente per il pascolo, per la produzione di foraggi e per attività turistico-ricreative. Le aree non vocate per l'agricoltura presentano limitazioni molto severe, che le rendono inadatte alla coltivazione e che restringono il loro uso al pascolo brado, alla forestazione o a fini ricreativi e rappresentano circa un terzo della superficie totale della regione.

L'analisi delle variazioni interannuali delle condizioni climatiche ha evidenziato significative fluttuazioni delle condizioni di deficit idrico del territorio. La determinazione dell'indice di rischio climatico per le aree agricole e le colture della Sardegna è stata quindi effettuata assegnando a ciascuna classe di deficit idrico un coefficiente di rischio climatico e calcolando il numero di anni in cui si sono verificate le diverse condizioni di siccità e la loro frequenza. I risultati di questa analisi sono riportati nella Figura 4.

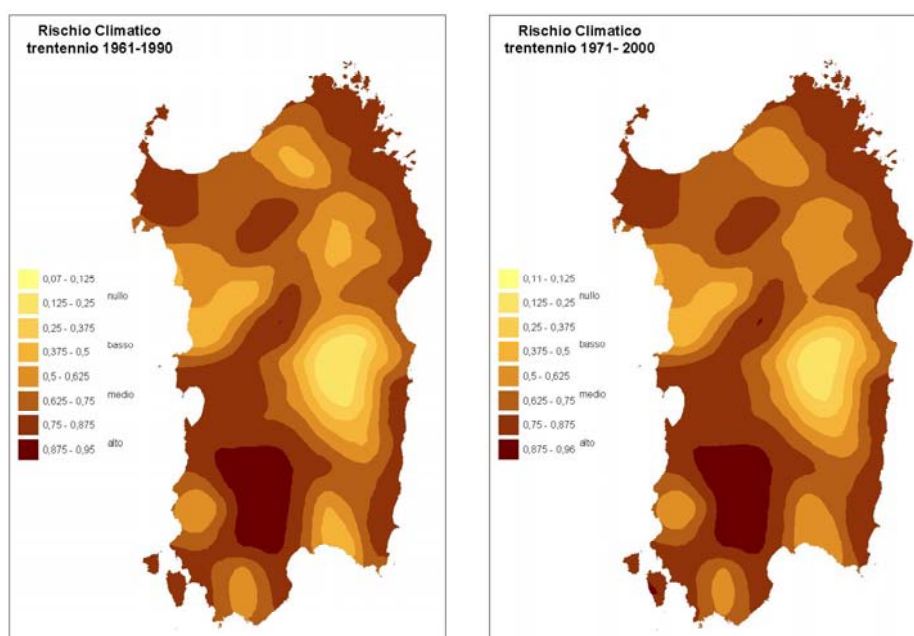


Figura 4 – Carte del Rischio Climatico in agricoltura per la Sardegna relative ai periodi 1961-1990 e 1971-2000.

Per quanto le variazioni del regime termico e pluviometrico osservate nel corso degli anni '90 non abbiano determinato in Sardegna variazioni nella classificazione del territorio in termini di vocazionalità pedo-climatica, è possibile identificare un effetto significativo in termini di rischio climatico. Si può infatti osservare un incremento generale della frequenza di eventi siccitosi nel trentennio 1971-2000 con una maggiore estensione delle aree classificate a medio e alto rischio climatico nella porzione meridionale dell'isola e in quelle nord-occidentali e nord-orientali.

L'analisi delle caratteristiche degli scenari climatici futuri A2 e B2 per la regione Sardegna, proiettati sino al 2099, ha consentito di determinare la probabile tendenza del regime termico e pluviometrico nel corso di questo secolo e di calcolare i futuri valori climatici di $PSMD_{max}$ e CDD . I risultati sono stati confrontati con il clima attuale (1961-2000).

Per quanto riguarda la tendenza della temperatura, mentre lo scenario climatico A2 prevede nel corso di questo secolo un incremento della temperatura media annua e della temperatura media del mese di agosto compreso tra 3-4°C e 4-5°C rispettivamente, lo scenario climatico B2 prospetta condizioni meno estreme, con un incremento della temperatura media su base annua e nel mese di agosto compreso tra 1-2°C e 2-3°C, rispettivamente. Entrambi gli scenari climatici prevedono nel corso di questo secolo una notevole diminuzione delle precipitazioni annue con un decremento dell'ordine di 200-300 mm (scenario A2) e di 100 mm (scenario B2). Tale riduzione degli apporti idrici naturali è imputabile per entrambi gli scenari alla forte riduzione delle precipitazioni autunnali e primaverili.

L'intera procedura utilizzata per la determinazione del rischio climatico attuale è stata riapplicata utilizzando le serie climatiche future fornite dagli scenari climatici A2 e B2 al posto delle serie climatiche osservate nel periodo 1961-2000. Assumendo la sostanziale invarianza nel corso di questo secolo della Land Capability pedologica, si è quindi proceduto a determinare (i) la Land Capability climatica futura e (ii) la Land Capability pedo-climatica futura. Di seguito si riportano i risultati relativi all'analisi della variabilità climatica interannuale del trentennio 2070-2099 per gli scenari climatici A2 e B2.

La carta della LCA pedo-climatica futura (Figura 5) mostra le aree della Sardegna in base alla loro attitudine o vocazionalità alla produzione agricola, considerando contemporaneamente le caratteristiche pedologiche e climatiche future.

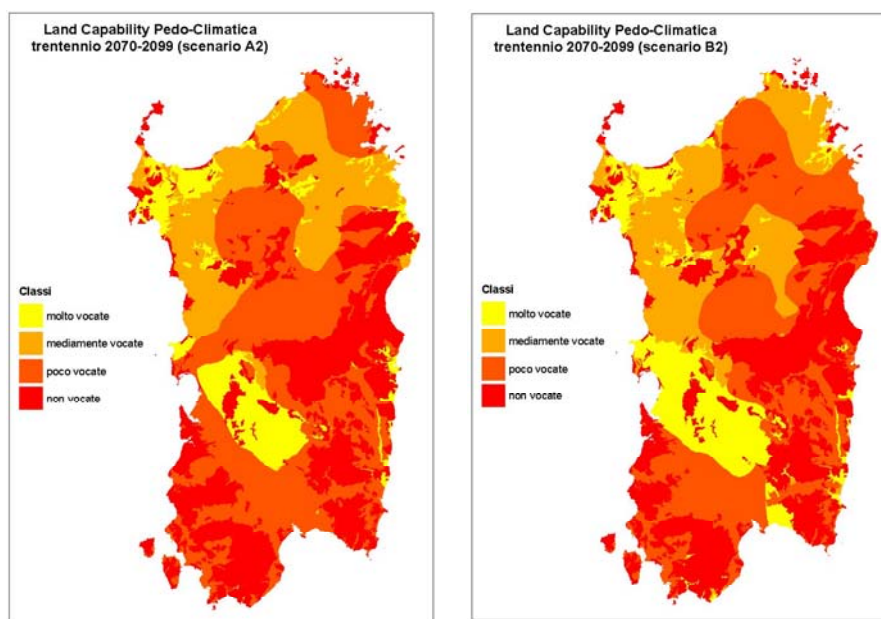


Figura 5 – Carte della Land Capability for Agriculture pedo-climatica della Sardegna nel trentennio 2071-2099 per gli scenari climatici A2 (a sinistra) e B2 (a destra).

L'integrazione dei dati pedologici con i dati climatici futuri determina una netta e generale riduzione delle aree a maggiore vocazione pedo-climatica per l'agricoltura. L'insieme delle aree classificate come molto vocate e mediamente vocate da un punto di vista pedo-climatico passerebbero, infatti, dall'attuale 51.4% (valore osservato nel periodo 1961-2000) al 29.8% (scenario A2) e al 33.7% (scenario B2) nel trentennio 2070-2099. Contemporaneamente si registrerebbe il raddoppio delle aree classificate come poco vocate: mentre, infatti, attualmente l'estensione di tale aree ammonta a circa il 17.4% del territorio regionale, la Carta della LCA pedo-climatica mostra che nel trentennio 2070-2099 le aree poco vocate inciderebbero per il 38.4% (scenario A2) e il 35.4% (scenario B2). Un aspetto importante è che questa sostanziale modifica

delle caratteristiche agro-climatiche del territorio regionale interessa una delle aree (la pianura del Campidano nel centro-sud dell'Isola) in cui è più rilevante l'impatto economico e sociale delle attività agricole.

È stato quindi determinato il potenziale effetto dei cambiamenti climatici prospettati dagli scenari climatici A2 e B2 sulle principali colture agrarie e sulle aree a maggiore vocazione agricola della Sardegna. Questa analisi è stata condotta determinando gli effetti dei cambiamenti climatici futuri sulla variazione della percentuale di superficie delle colture agrarie che ricadrebbe in aree molto vocate dal punto di vista pedo-climatico. In pratica, assumendo l'attuale distribuzione ed estensione delle colture agrarie è stata calcolata, per ciascuna tipologia di coltura, la quantità di superficie attualmente utilizzata che sarebbe classificata in futuro come molto vocata. In generale, si può osservare che gli scenari climatici futuri potrebbero determinare una notevole riduzione della frazione di superficie che ricade in aree molto vocate per tutte le più importanti colture agrarie, come riportato in sintesi nella Tabella 1.

	<i>Erbacee a ciclo prim.-estivo)</i>	<i>Frutteti</i>	<i>Orticole</i>	<i>Oliveti</i>	<i>Vigneti</i>	<i>Seminativi non irrigui</i>
A2 2070-2099	-65	-86	-39	-26	-55	-57
B2 2070-2099	-35	-73	-37	-9	-43	-42

Tabella 1 – Variazione percentuale, rispetto al periodo 1971-2000, della superficie delle colture agrarie che ricade in aree molto vocate della Sardegna per il trentennio 2070-2099 e gli scenari climatici A2 e B2.

L'ultima fase del lavoro ha riguardato l'analisi degli effetti delle possibili variazioni climatiche su alcune colture chiave. Qui saranno illustrati per brevità i risultati ottenuti sul frumento duro (cultivar Cresco). La calibrazione del modello ha richiesto l'individuazione dei valori di coefficienti genetici relativi alle varietà studiate (Tabella 2).

P1D	Coefficiente di sensibilità al fotoperiodo (riduzione %/ora prossima alla soglia)
P1V	Coefficiente di sensibilità alla vernalizzazione (%/giorni di vernalizzazione non completati)
P5	Gradi giorno dalla inizio della fase di riempimento della granella fino alla maturazione (°C * d)
G1	Numero di cariossidi per peso unitario di culmo + spiga all'antesi (#/g)
G2	Tasso potenziale di crescita della cariosside (mg/cariosside * d)
G3	Peso secco massimo standard di una spiga in condizioni ottimali a maturità (g)
PHINT	Intervallo del fillocrono (intervallo tra la comparsa di due apici fogliari successivi (°C d)

Tabella 2 Coefficienti genetici per il modello DSSAT CERES Wheat.

Nella Tabella 3 sono riportati i risultati della calibrazione del modello *CERES-wheat*. La procedura è stata applicata su un data-set (1996-2004) relativo ai campi sperimentali di Benatzu e Ussana (CA). La calibrazione del modello alle condizioni locali ha fornito risultati eccellenti per quanto riguarda la capacità di previsione dia della data di spigatura sia delle rese in granella. I valori del coefficiente di correlazione sono risultati altamente significativi sia per la data di antesi ($r = 0.90$) sia per la resa in granella ($r = 0.75$). Anche i valori piuttosto contenuti del RMSE, pari a 4 giorni e a circa 800 kg ha^{-1} , confermano l'accuratezza previsionale del modello per queste variabili. La fase di fioritura è stata osservata mediamente 137 e 136 giorni dopo la semina, rispettivamente per l'osservato e per il simulato, con una deviazione standard di 8 e 7 giorni. Il modello ha dato delle risposte più che buone in termini di previsione della data di antesi anche negli anni di maggiore variabilità rispetto alla media (minimi di 116 e 117 giorni e massimi di 151 e 145,

rispettivamente, per l'osservato e per il simulato). Maggiore variabilità è stata osservata per la previsione dei valori minimi di resa.

CALIBRAZIONE

			media	σ	min	max	r	RMSE
ANTESI	(gg. dopo semina)	Oss.	137	8	116	151	0.90	4
		Sim.	136	7	117	145	p < 0.01	
RESA	(kg ha ⁻¹)	Oss.	3593	1008	1522	4990	0.75	807
		Sim.	3941	1108	2317	6209	p < 0.01	

Tabella 3 – Statistiche di base dei principali parametri colturali del frumento duro ottenute dai dati osservati e simulati nella fase di calibrazione del modello. Sono riportati inoltre i valori del coefficiente di correlazione (r) e del Root Mean Square Error (RMSE) scaturiti dal confronto fra dati osservati e dati simulati.

La validazione del modello (Tabella 4) sul data-set relativo agli anni 1974-1994 ha mostrato valori di correlazione piuttosto elevati tra dati osservati e simulati della data di antesi e della resa in granella. Per quanto riguarda la resa, il valore del RMSE è stato di 978 kg ha⁻¹ mentre è stata confermata la tendenza del modello a sovrastimare i valori reali negli anni di scarsa produzione. L'errore previsionale per la fase di fioritura è stato leggermente inferiore (RMSE = 6) rispetto al medesimo dato della calibrazione, con valori comunque correlati significativamente. L'indice *Modelling Efficiency* (EF), che dà un'indicazione della capacità previsionale del modello rispetto alla media del campione, si attesta su valori prossimi all'unità per la data di antesi e su valori comunque positivi per la stima delle rese, dimostrando una migliore efficienza del modello nella simulazione dei processi rispetto all'utilizzo dei semplici valori medi osservati. Infine, il *Coefficient of Residual Mass* (CRM) indica che il modello sovrastima leggermente il valore delle rese (CRM=-0.05) e sottostima (anticipa) in modo trascurabile la data di fioritura prevista a partire dalla data di semina.

VALIDAZIONE

			media	σ	min	max	r	RMSE	EF	CRM
ANTESI	(gg. dopo semina)	Oss.	142	12	116	171	0.79	6	0.99	0.01
		Sim.	141	7	125	161	p < 0.01			
RESA	(kg ha ⁻¹)	Oss.	3745	1318	868	6129	0.72	978	0.43	-0.05
		Sim.	3940	1289	1965	7547	p < 0.01			

Tabella 4 – Statistiche di base dei principali parametri colturali del frumento duro ottenute dai dati osservati e simulati nella fase di validazione del modello. Sono riportati inoltre i valori del coefficiente di correlazione (r), del Root Mean Square Error (RMSE), del *Modelling Efficiency* (EF) e del *Coefficient of Residual Mass* (CRM) scaturiti dal confronto fra dati osservati e dati simulati.

Una sintesi dei risultati ottenuti nelle fasi di calibrazione e validazione del modello è mostrata nella Figura 6, in cui risulta evidente come le differenze tra valori simulati e valori osservati siano in larga misura entro un valore massimo del 30% nel caso della calibrazione, e leggermente superiori, con una leggera tendenza del modello a sovrastimare i valori reali delle rese, nel corso della fase di validazione.

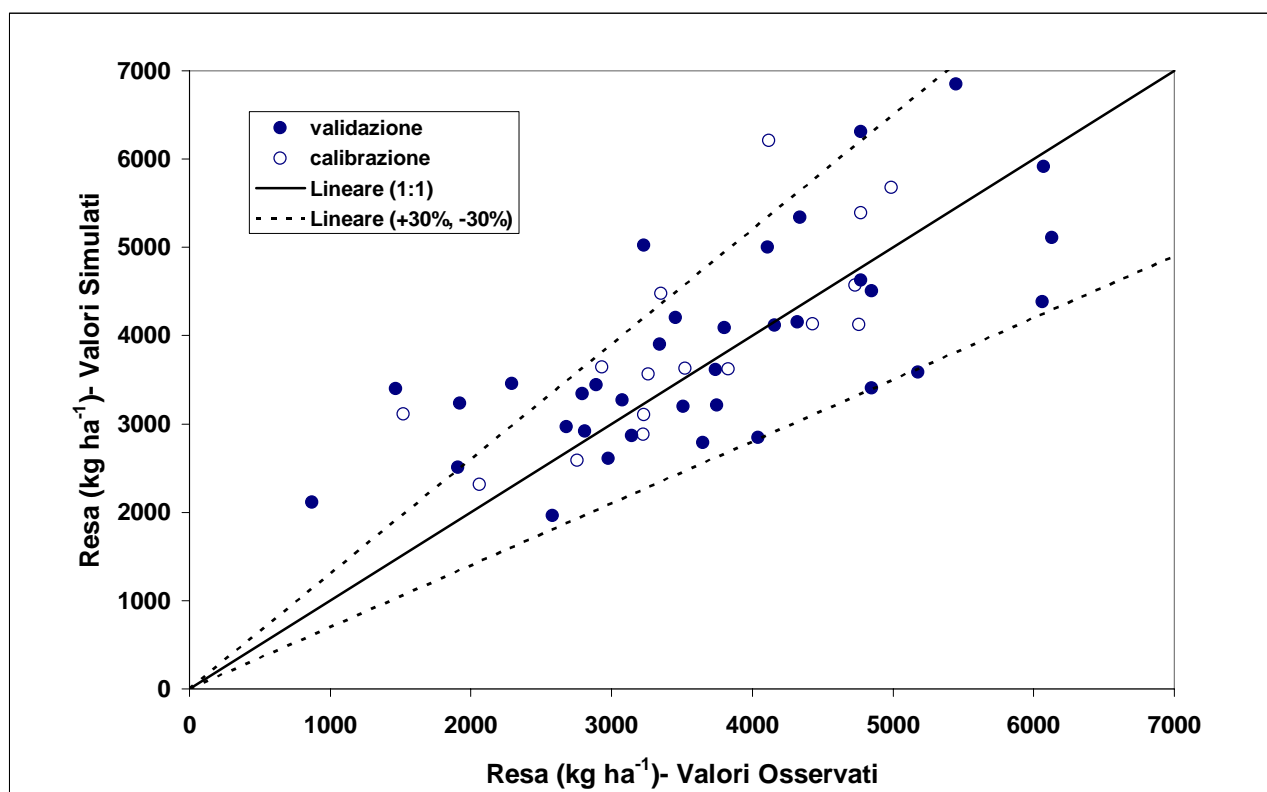


Figura 6 – Confronto fra i dati di resa del frumento duro osservati e simulati nel periodo 1974-2004.

Per la valutazione quantitativa degli effetti delle possibili variazioni climatiche sulla fenologia e la produttività del frumento sono stati utilizzati scenari climatici futuri, caratterizzati da diversi livelli di variazione della temperatura e delle precipitazioni. In particolare, per la temperatura sono stati ipotizzati aumenti medi da 1°C a 6°C, mentre per le precipitazioni decrementi medi variabili dal 5% al 30% delle precipitazioni annue, come riportato in Tabella 5. Oltre ai dodici scenari caratterizzati o da un aumento di temperatura o da una diminuzione delle precipitazioni, sono stati utilizzati altri scenari costruiti combinando i diversi livelli di variazione delle precipitazioni e delle temperature. Gli effetti di tali variazioni climatiche sulla fenologia e sulla produttività del frumento sono stati determinati simulando la crescita e lo sviluppo della coltura per un periodo di 30 anni.

		Variazioni Precipitazione						
		0	-5%	-10%	-15%	-20%	-25%	30%
Variazioni Temperatura	0	-	P ₅	P ₁₀	P ₁₅	P ₂₀	P ₂₅	P ₃₀
	+1°C	T ₁	C _{1_5}	C _{1_10}	C _{1_15}	C _{1_20}	C _{1_25}	C _{1_30}
	+2°C	T ₂	C _{2_5}	C _{2_10}	C _{2_15}	C _{2_20}	C _{2_25}	C _{2_30}
	+3°C	T ₃	C _{3_5}	C _{3_10}	C _{3_15}	C _{3_20}	C _{3_25}	C _{3_30}
	+4°C	T ₄	C _{4_5}	C _{4_10}	C _{4_15}	C _{4_20}	C _{4_25}	C _{4_30}
	+5°C	T ₅	C _{5_5}	C _{5_10}	C _{5_15}	C _{5_20}	C _{5_25}	C _{5_30}
	+6°C	T ₆	C _{6_5}	C _{6_10}	C _{6_15}	C _{6_20}	C _{6_25}	C _{6_30}

Tabella 5 – Caratteristiche degli scenari climatici utilizzati nell'analisi degli effetti delle variazioni climatiche sulla fenologia e sulla produttività del frumento duro.

Nella Figura 7 sono riportate le variazioni nella data di antesi della cultivar Crespo, espresse in

giorni rispetto alla data media osservata per il trentennio di riferimento, per le diverse ipotesi di cambiamento di temperatura e precipitazioni. È interessante notare come il solo aumento della temperatura porta ad un anticipo della fase di antesi rispettivamente da circa 2 a 7 giorni per un aumento compreso tra 1°C e 6°C.

Come ci si sarebbe potuti aspettare, la sola riduzione delle precipitazioni produce un leggero ritardo sulla data di fioritura del frumento (un giorno per scenari che prevedono un decremento delle precipitazioni del 30%). L'analisi delle variazioni combinate nei valori di temperatura e precipitazione mostra come prevale nettamente l'effetto delle temperature e dell'accumulo dei gradi giorno rispetto all'effetto dovuto al decremento delle precipitazioni.

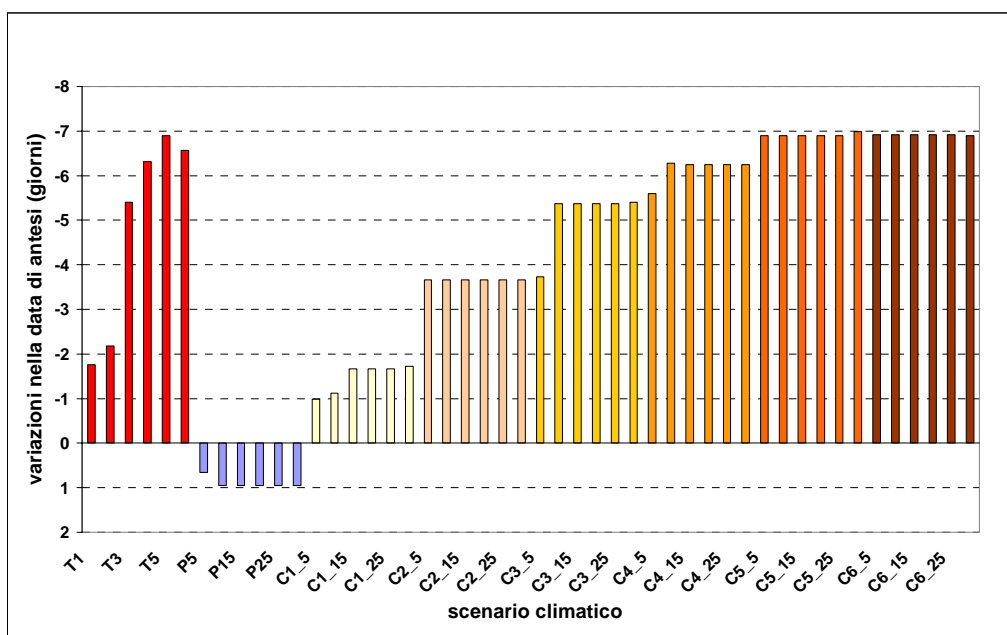


Figura 7 – Effetto delle variazioni climatiche sulla data di antesi del frumento duro, cultivar Creso.

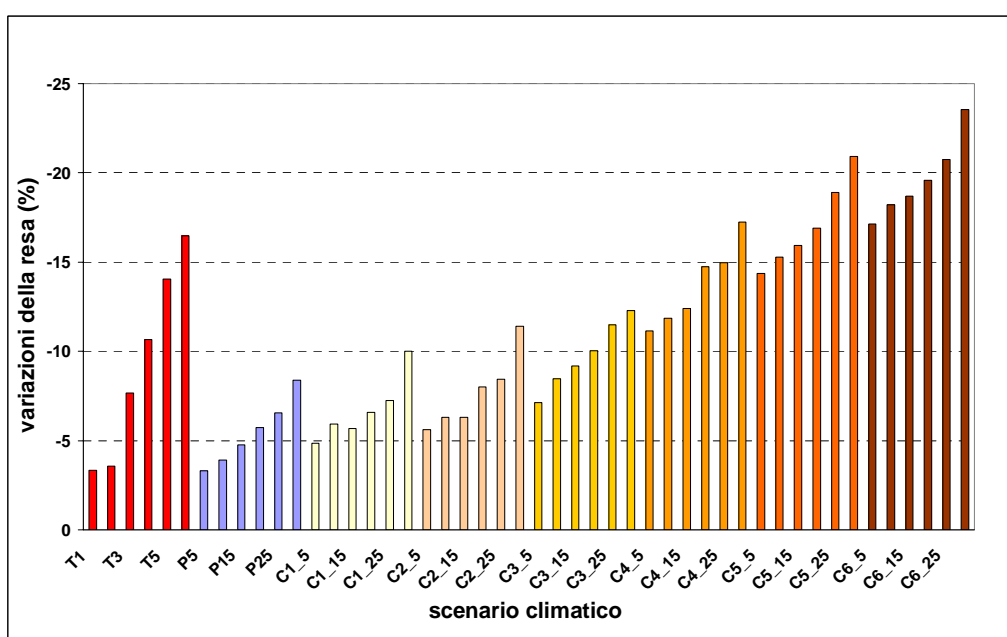


Figura 8 – Variazione percentuale della resa del frumento duro, varietà Creso, per diversi scenari climatici.

Nella Figura 8 è rappresentata la variazione percentuale della resa del frumento, varietà Creso, per i diversi scenari climatici futuri. L'aumento indipendente delle temperature e la riduzione delle precipitazioni (scenari T₁- T₆ e P₅-P₃₀) hanno un effetto simile sulla variazione delle rese. Per quanto riguarda le temperature si è registrato un decremento delle produzioni oscillante tra il 3% (scenario T₁) e il 17% (scenario T₆). La riduzione crescente delle precipitazioni rispetto ai valori medi climatici da un minimo del 5% ad un massimo del 30% provocherebbe un decremento delle produzioni che non supera il 9%. È evidente quindi un maggiore impatto sulle rese dell'aumento delle temperature rispetto ad una riduzione delle precipitazioni. Gli scenari caratterizzati da un contemporaneo decremento delle precipitazioni e un aumento della temperatura presentano un comportamento molto simile nella riduzione della resa, tanto più significativa quanto maggiore è l'aumento della temperatura, con una significativa amplificazione degli effetti riscontrabile se le variabili meteorologiche fossero considerate indipendentemente. I valori relativi del decremento di produzione variano da un minimo del 5% (scenario C_{1_5}, corrispondente a un aumento medio della temperatura di 1 °C e a una riduzione delle precipitazioni del 5%) sino ad un massimo di oltre il 24% (scenario C_{6_30}).

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel corso del triennio di attività del progetto CLIMAGRI è stata sviluppata una metodologia affidabile e facilmente trasferibile per l'individuazione delle aree agricole e delle colture a rischio climatico nella regione mediterranea. Le procedure di analisi messe a punto sono state applicate al caso reale della Sardegna e dell'Emilia-Romagna nelle condizioni climatiche attuali e secondo le proiezioni climatiche future prospettate da due diversi scenari climatici nel caso della Sardegna. Lo studio è stato condotto secondo i principi della *Land Capability* e si è basato su un insieme integrato di informazioni territoriali (geologia, morfologia, pedologia, clima e uso del suolo).

Il metodo sviluppato ha consentito di rappresentare graficamente il rischio climatico per l'agricoltura nelle diverse aree del territorio. Nelle aree climaticamente e pedologicamente più vocate per le attività agricole è stato possibile discriminare, per aree di analoga vocazionalità, livelli di rischio climatico significativamente differenti. La metodologia risulta direttamente applicabile ad altre aree con caratteristiche climatiche simili a quelle delle regioni considerate e, con i dovuti adattamenti, a regioni climaticamente diverse. In particolare, si deve sottolineare che i valori dell'indice di rischio climatico messo a punto non sono risultati correlati con le classi climatiche attribuite alle diverse porzioni di territorio sulla base dell'analisi delle serie storiche termopluviometriche. Questo risultato indica che le variabili meteorologiche sono state integrate nella procedura di valutazione tenendo effettivamente conto della loro natura dinamica. Pertanto, le mappe di rischio climatico realizzate riescono a includere l'informazione relativa alla variabilità climatica e a dare un'idea immediata e sintetica sia delle condizioni "medie" del territorio sia della sua naturale variabilità interannuale.

Infine, l'utilizzo di un modello di crescita e sviluppo delle colture ha consentito di valutare, attraverso una sua opportuna calibrazione e validazione che ha tenuto conto delle condizioni locali delle principali caratteristiche climatiche, pedologiche e di coltivazione del frumento, i potenziali effetti degli scenari climatici futuri sulla fenologia e sulla produttività del *Triticum durum* Desf. in Sardegna. Il trend positivo della temperatura e il decremento delle precipitazioni che gli scenari climatici futuri prospettano per il bacino del Mediterraneo potrebbero determinare un aumento del rischio climatico, riducendo in maniera significativa (sino al 24% per le condizioni più estreme imposte nel corso delle simulazioni) il potenziale produttivo di questa coltura, determinando una contrazione del ciclo produttivo, con un anticipo massimo delle date di fioritura di circa 9 giorni rispetto alla media dell'ultimo trentennio.

Al fine di fornire una descrizione di maggiore dettaglio delle attività svolte, si rimanda ai seguenti articoli scientifici pubblicati nell'ambito delle attività del progetto CLIMAGRI:

1. MOTRONI A., DUCE P., SPANO D., CANU S., 2002. *Estimation of climatic risk for agriculture in a Mediterranean region*. Proc. of the 16th International Congress on Biometeorology, Kansas City, Missouri, USA, 28 October – 1 November 2002, 308-309.
2. DUCE P., SPANO D., MOTRONI A., CANU S., 2002. *Analisi della variabilità climatica e del rischio agricolo in Sardegna*. I Conferenza Nazionale IGBP, Paestum, 14-16 novembre 2002.
3. MOTRONI A., DUCE P., SPANO D., DEPLANO G., CANU S., 2003. *Sviluppo di una metodologia di analisi per la valutazione del rischio climatico delle aree forestali in Sardegna*. Atti del IV Convegno Nazionale SISEF – Meridiani Foreste, Pignola (PZ) 7-10 ottobre 2003.
4. DUCE P., SPANO D., MOTRONI A., CANU S., 2003. *Rischio climatico per l'agricoltura in ambiente mediterraneo*. Atti Workshop 'CLIMAGRI', 19-17 gennaio 2003, Cagliari, pp. 39-46.
5. DUCE P., ARCA A., CANU S., SPANO D., MOTRONI A., 2004. *Individuazione delle aree agricole e delle colture a forte rischio per variazioni climatiche*. Atti del Workshop di presentazione delle attività del secondo anno del Progetto Finalizzato CLIMAGRI - Cambiamenti Climatici e Agricoltura, Roma, pp 41-46.
6. DUCE P., ARCA A., CANU S., SPANO D., MOTRONI A., 2004. *Effect of future climatic variability on agriculture in a Mediterranean region*. 26th Conference on Agricultural and Forest Meteorology, Vancouver, BC, Canada, 23-26 August 2004.
7. DUCE P., ARCA A., SPANO D., CANU S., MOTRONI A., ANTOLINI G., ZINONI F., 2005. *Climatic variability and climate risk in agriculture in the Mediterranean area*. WMO - FAO - COST, Workshop on Climatic Analysis and Mapping for Agriculture, 14-17 June 2005, Bologna, Italy.
8. DUCE P., CESARACCIO C., ARCA A., SPANO D., CANU S., MOTRONI A., ANTOLINI G., ZINONI F., 2005. *Un sistema di valutazione del rischio climatico in agricoltura*. Workshop CLIMAGRI: Agricoltura e cambiamenti climatici - Analisi, incertezze, controversie, interdipendenze, Ancona, 27 - 28 giugno 2005.

Si allega infine copia degli articoli più significativi.

BIBLIOGRAFIA

- Brunetti, M., Maugeri, M. e Nanni, T., 2000: Variations of temperature and precipitation in Italy from 1866 to 1955. *Theor. Appl. Climatol.*, 65, 165–174.
- Duce, P., Spano, D., Motroni, A. e Canu, S., 2003: Rischio climatico per l'agricoltura in ambiente mediterraneo. *Atti Workshop 'CLIMAGRI'*, 19-17 gennaio 2003, Cagliari, pp. 39–46.
- Gordon, C., Cooper, C.S.C., Banks, H., Gregory, J., Johns, T., Mitchell, J. e Wood, R., 2000: The simulation of SST, sea-ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, 16, 147–168.
- Goudriaan, J., 1996: Predicting crop yields under global change. In: Walker, B., Steffen, W. (eds.), *Global Change and Terrestrial Ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series*. Cambridge University Press, pp. 260–274.
- Hudson, G. e Birnie, R.V., 1999: A method of land evaluation including year to year weather variability. *Agric. For. Meteorol.*, 101, 203–216.
- IPCC, 1995. *Climate change 1995: the science of climate change. The second IPCC assessment report*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 572.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: the scientific basis. The third IPCC assessment report*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 944.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijssman, A.J. e Ritchie, J.T., 2003: The DSSAT cropping system model. *Europ. J. Agronomy*, 18, 235–265.
- Kropff, M.J., Bouma, J., e Jones, J.W., 2001: Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems*, 70, 369–393.
- Motroni, A., Duce, P., Spano, D. e Canu, S., 2002: Estimation of climatic risk for agriculture in a Mediterranean region. *Proc. 15th Conf. on Biometeorol. and Aerobiology*, pp. 308–309.
- Parry, M.L. e Carter, T.R., 1988: The assessment of effects of climatic variations on agriculture: aims, methods and summary of results. In: *The impact of climatic variations on agriculture*, Vol. 1, Reidel Publ. Co., Dordrecht, pp. 11–95.
- Rambal, S. e Hoff, C., 1998: Mediterranean ecosystems and fire: the threats of global change. In: *Large forest fires*, Backhuys Pub., Leiden, The Netherlands, pp. 187–213.
- Ritchie, J.T., Otter, S. 1985: Description and performance of CERES-Wheat: A user-oriented wheat yield model. In: *ARS wheat yield project. ARS 38. Natl. Tech. Inf. Serv.*, Springfield, VA, pp. 159-175.
- Rosenzweig, N.J., 1982: Potential CO₂-Induced climatic effects on the North American wheat producing regions. *Clim. Change*, 7, 367–389.
- Rossiter, D.G., 1996: A theoretical framework for land evaluation. *Geoderma*, 72, 165–190.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. e Nelson, R., 2003: CropSyst, a cropping systems simulation model. *Europ. J. Agronomy*, 18, 286–307.
- van Diepen, C.A., Wolf, J. e van Keulen, H., 1989: WOFOST: a simulation model of crop production. *Soil Use and Management*, 5, 16–24.
- van Lanen, H.A.J., Hackten Broeke, M.J.D., Bouma, J. e de Groot, W.J.M., 1992: A mixed qualitative-quantitative physical land evaluation methodology. *Geoderma*, 55, 37–54.
- Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G. e Thornton, P.K. (eds.), 1998: *Understanding options for agricultural production. Systems approaches for sustainable agricultural development*. Kluwer Academic Publishers, pp. 400.

Il Responsabile della Ricerca

Dr. Pierpaolo Duce