



Regione Toscana



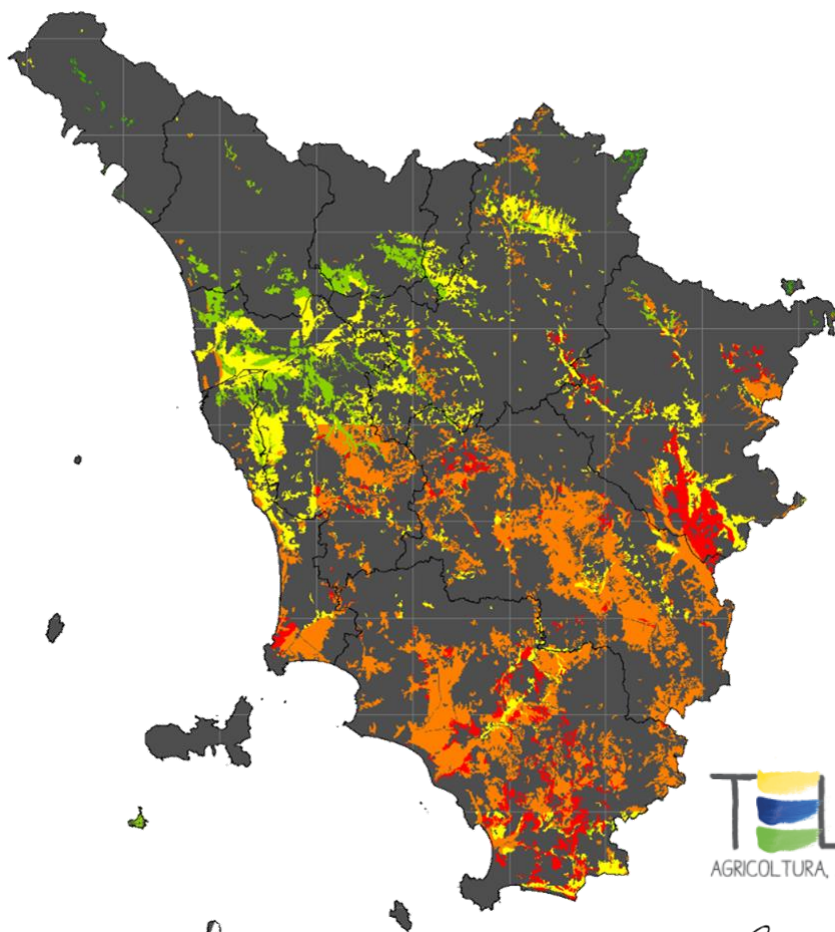
PSR Toscana 2014-2020 – Progetti Integrati di Filiera

"SOLEAT – SEMI OLEOSI ALLA TOSCANA"

Sottomisura 16.2 "Sostegno a progetti pilota e di cooperazione"

**Sistemi di Innovazione Culturale per le Oleaginose
Toscane - Progetto SIC OLEAT**

Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione di girasole e lino



TELLUS
AGRICOLTURA, AMBIENTE, TERRITORIO

Prof. Giorgio Ragolini
Giorgio Ragolini

Pisa 30/11/2021

Sommario

1	Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del girasole	3
1.1	Obiettivi	3
1.2	Materiali e metodi	4
1.2.1	Approccio generale.....	4
1.2.2	Parametrizzazione, calibrazione e validazione del modello di simulazione	5
1.2.3	Simulazioni a scala territoriale	11
1.2.4	Analisi dei risultati e rappresentazione cartografica	14
1.3	Risultati	16
1.3.1	Calibrazione e validazione del modello	16
1.3.2	Andamento meteorologico di lungo periodo	16
1.3.3	Effetto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulle rese della coltura in condizioni limitanti	20
1.3.4	Effetto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulla stabilità delle rese	24
1.3.5	Principali fattori limitanti la crescita della coltura e la produzione di granello	25
1.4	Conclusioni	26
1.5	Bibliografia.....	27
2	Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del lino (<i>Linum usitatissimum</i> L.): risultati preliminari sulle 5 cultivar del progetto SIC-OLEAT	28
2.1	Obiettivi	28
2.2	Materiali e metodi	29
2.2.1	Approccio generale.....	29
2.2.3	Sviluppo di un modello fenologico cultivar specifico a partire dalle osservazioni delle prove di campo	31
2.2.4	Stima delle date di semina più probabili per epoche autunnali e primaverili	34
2.2.5	Definizione e stima dei rischi di stress.....	35
2.3	Risultati	38
2.3.1	Fenologia della coltura	38
2.3.2	Rischio di stress da freddo	48
2.3.4	Rischio di stress da caldo	51
2.3.5	Rischio di stress idrico	56
2.4	Conclusioni	66
2.5	Bibliografia.....	67

1 Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del girasole

1.1 Obiettivi

Il girasole (*Helianthus annuus* L.) è una specie coltivata tradizionalmente adatta al territorio toscano ed in vasti areali è una coltura da rinnovo caratterizzante degli avvicendamenti coltrali e del paesaggio agricolo. Proprio per l'importanza che riveste la coltura, lo studio della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del girasole rappresenta un primo passo importante per migliorarne l'agrotecnica ed indirizzare gli agricoltori verso la scelta delle migliori varietà e delle epoche di semina più adatte alla luce dei cambiamenti climatici in atto.

Pertanto, l'applicazione di modelli di simulazione per l'analisi di scenari di vocazionali a scala territoriale, basati su lunghe serie storiche di dati meteo, consente di apprezzare meglio il comportamento della coltura a scale altrimenti difficili da analizzare con approcci empirici basati sull'osservazione di dati di campo. Le possibili indicazioni di tali studi vanno dall'identificazioni degli areali più vocati ai fini della pianificazione territoriale delle filiere produttive, a valutazioni riguardanti le possibili strategie di gestione della coltura, sia nella scelta delle cultivar più adatte che nella gestione agronomica.

Gli obiettivi della presente ricerca, basata su una serie storica di 42 anni di dati meteo spazializzati hanno riguardato:

1. La valutazione, tramite approccio quantitativo dell'effetto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulle rese della coltura in condizioni limitanti
2. La valutazione delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulla stabilità delle rese
3. L'individuazione dei principali fattori limitanti la crescita della coltura e la produzione di granella

1.2 Materiali e metodi

1.2.1 Approccio generale

Ai fini dello studio è stato adottato il modello di simulazione di sistemi dinamici APSIM (Agricultural Production System sIMulator, versione 7.10). Il modello permette di simulare a scala giornaliera lo sviluppo e la produzione di biomassa e granella delle colture a partire da dati meteo giornalieri, dalle caratteristiche del suolo e dai dati relativi all'applicazione (dose, epoca e metodo di distribuzione) degli input agronomici.

Lo studio, che ha riguardato la coltivazione in asciutta del girasole, è stato condotto in 3 fasi (Figura 1):

- Fase 1 – calibrazione e validazione del modello di simulazione, nella quale il modello è stato calibrato e validato rispetto a serie storiche di dati sperimentali di lungo di coltivazione del girasole nella parte costiera della pianura pisana.
- Fase 2 – una volta ritenuto attendibile il modello, attraverso l'analisi degli indicatori di performance, sono state condotte analisi di simulazioni a scala regionale a partire da dati di meteo e suolo di banche dati esistenti
- Fase 3 – i risultati delle simulazioni sono stati elaborati in indici di resa e stabilità delle rese, analizzati e rappresentati su mappa.

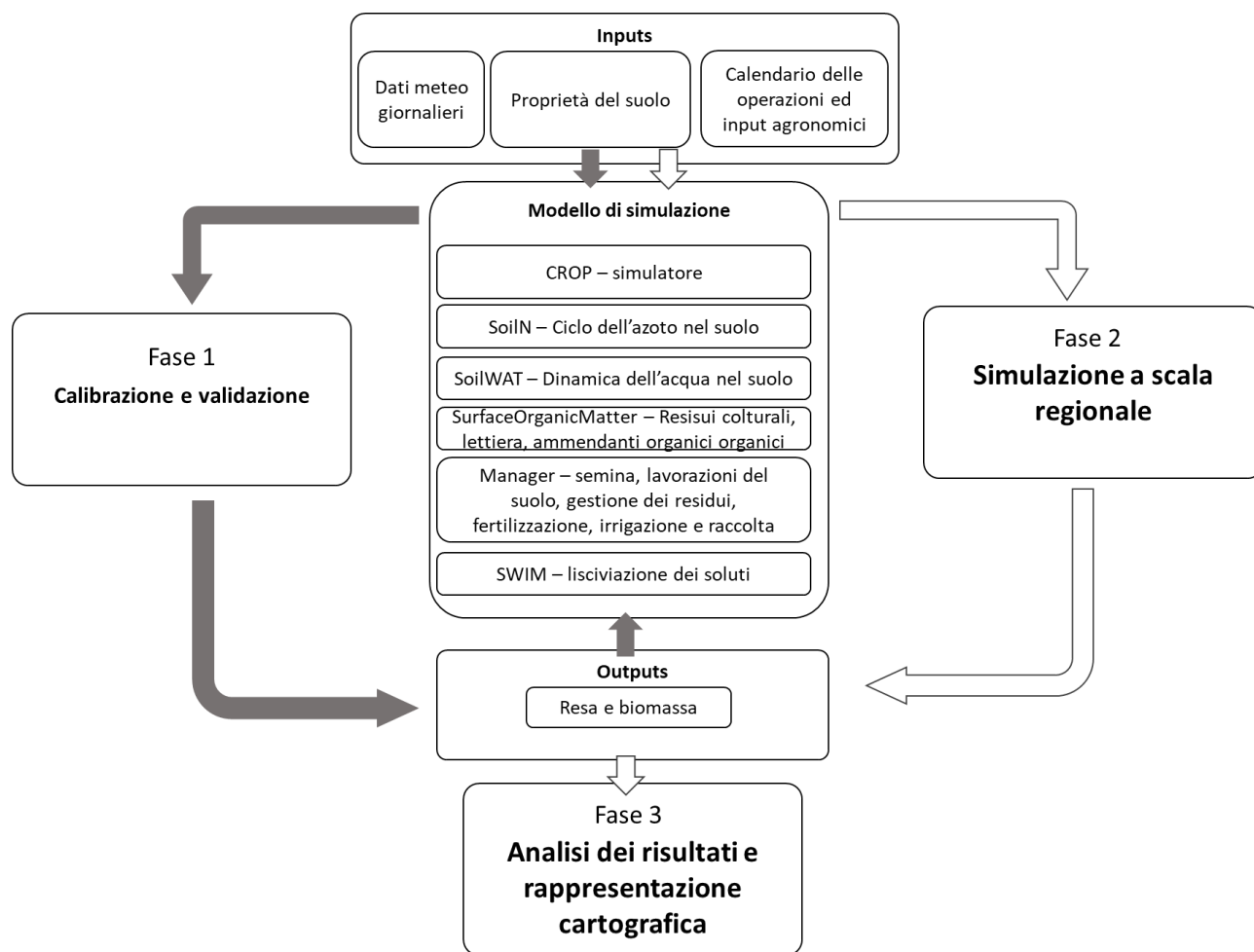


Figura 1: rappresentazione schematica dell’approccio metodologico adottato e dell’organizzazione in moduli del modello di simulazione di sistemi culturali adottato.

1.2.2 Parametrizzazione, calibrazione e validazione del modello di simulazione

APSIM è stato calibrato a partire dai dati di una prova sperimentale di lungo periodo, denominata CIMAS (, Conventional vs. Integrated Management Systems) condotta dal Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari ed Agro-ambientali dell’Università di Pisa presso il Centro di Ricerche Agro-Ambientali “Enrico Avanzi” a San Piero a Grado, Pisa, in un’area agricola pianeggiante a pochi chilometri dalla costa (43°40’ N lat; 10°19’ E long) della pianura pisana (Nassi o Di Nasso, 2011).

La prova condotta dal 1993 al 2015, è stata installata nel 1992 su suolo prevalentemente argilloso-franco derivato da sedimenti alluvionali e classificato come Typic Haplustert in base alla tassonomia del suolo dell’USDA (Nassi o Di Nasso, 2011).

Tale prove, condotta scala di pieno campo, prevedeva il confronto di due livelli di intensificazione colturale (convenzionale vs integrato) di un avvicendamento sessennale in cui il girasole era preceduto da sorgo da granella e precedeva frumento duro.

I dati utilizzati per la calibrazione e classificazione sono stati selezionati al fine di considerare un periodo omogeneo di gestione della prova, soprattutto in merito a: 1) cultivar seminata, Ketil, varietà tardiva (Monotti et al., 2002) prodotta da Pioneer Hi-Bred Italia; 2) al sito in cui sono stati effettuati i rilievi. La prova infatti era condotta in due blocchi molto vasti, dei quali un blocco presentava una forte variabilità della tessitura del suolo, che ha causato una forte variabilità tra le sub-repliche. Pertanto sono stati scelti solo i dati che mostravano una più bassa variabilità delle sub-repliche, sempre riferibili a blocco denominato Arnino 1. Infine

sono stati esclusi dati che presentavano valori outlier di Harvest Index, tramite test di Grubbs (R function, `grubbs.test()`).

Il set di dati ottenuto è stato quindi suddiviso casualmente in un dataset di calibrazione di 8 campioni e in uno di validazione di 7 campioni, contenenti valori di resa in granella e biomassa aerea totale, espressi in sostanza secca, riferiti sia al sistema di gestione convenzionale che al sistema di gestione integrato.

La calibrazione è stata effettuata tramite il package R 'apsimx' (Miguez, 2021) e i valori dei parametri della coltura calibrati sono riportati in Tabella 1 e *Tabella 2*.

Tabella 1: parametri generici della coltura utilizzati per la calibrazione del modello. Radiation Use Efficiency (RUE - g di biomassa accumulata per MJ di PAR intercettato) e Transpiration Efficiency (TE – kpa) per stadio di sviluppo

Parametri generici													
	STAGE.des	sow	Ger	eme	juv	Fi	flag	Fl	st_gf	end_gh	mat	hv_rpe	end_crop
RUE	g/MJ	0	0	1	1	1	1	2	2	2	2	0	0
TE	Kpa	0.0045	0.0045	0.0045	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.009	0.0045	0.0045	0.0045

Tabella 2: parametri cultivar specifici utilizzati per la calibrazione del modello. La calibrazione è stata effettuata dalla cultivar SC53 presente nella libreria di APSIM. Successivamente con l'ausilio della procedura di calibrazione automatica del Package R ApsimX, sono stati calibrati i seguenti parametri: *tt_endjuv_to_init* – gradi giorno (GDD) necessari per passare dalla fine della fase giovanile di sviluppo allo sviluppo dell'infiorescenza; *tt_fi_to_flag* – GDD necessari dall'inizio dello sviluppo dell'infiorescenza alla formazione dell'ultima foglia; *tt_flag_to_flower* – GDD necessari dallo sviluppo dell'ultima foglia alla fioritura; *tt_flower_to_start_grain* – GDD necessari dalla fioritura all'inizio della fase di formazione della granella; *tt_maturity_to_ripe* – GDD dalla maturità fisiologica al completo riempimento della granella; *tt_flower_to_maturity* – GDD dalla fioritura alla maturazione fisiologica. Inoltre sono stati calibrati i parametri relativi alla temperatura basale (*tt_base*) e alla formazione della granella (*hi_incr* – increment giornaliero dell'harvest index).

Parametri cultivar specifici (SC53)			
Fenologia	tt_endjuv_to_init	560	GDD (° C)
	tt_fi_to_flag	440	GDD (° C)
	tt_flag_to_flower	1	GDD (° C)
	tt_flower_to_start_grain	100	GDD (° C)
	tt_maturity_to_ripe	150	GDD (° C)
	tt_flower_to_maturity	800	GDD (° C)
Temperatura basale	tt_base	4	(° C)
Crescita della granella	hi_incr	0.0112	Day ⁻¹

Per quanto riguarda i parametri del suolo, i parametri di inizializzazione del modello sono stati ricavati a partire dalle caratteristiche del suolo misurate da campioni prelevati nei primi 30 cm di suolo (Tabella 3)

Tabella 3: caratteristiche del suolo misurate in campioni prelevati nello strato superficiale di 30 cm

Parametro	Valore	Unità di misura
Sabbia	34.15	%
Limo	39.69	%
Argilla	26.16	%
pH	8.3	
P2O5	17.5	mg kg ⁻¹
K2O	150.1	mg kg ⁻¹
N	1.2	g kg ⁻¹
SOM	20	g kg ⁻¹

Le proprietà idrologiche del suolo sono state stimate a partire dai dati di tessitura e contenuto in sostanza organica utilizzando le funzioni di pedotrasferimento del modello Soil Water Characteristics 6.02.74 (Saxton et al., 2021). Il profilo del suolo è stato ricreato seguendo il protocollo APSIM (Dalgliesh et al., 2016).

I parametri richiesti dal modello sono: densità apparente (BD); il contenuto di acqua di un campione di suolo all'equilibrio dopo essere stato esposto all'asciugatura in condizioni ambientali naturali (Air Dry); il punto di appassimento permanente (LL15); la capacità di campo (DUL); il punto di saturazione del suolo (SAT); l'acqua potenzialmente disponibile per la coltura (PAWC = (DUL – LL15)*depth); la frazione di acqua disponibile per le piante (PAW) in grado di essere estratta da un particolare strato di suolo (KL); il fattore di esplorazione della radice (XF), che determina l'abilità della radice di esplorare un determinato strato di suolo (0 = abilità nulla; 1= abilità massima). I valori utilizzati nella calibrazione del modello sono stati estrapolati dalle caratteristiche del suolo della prova di lungo periodo CIMAS e sono riportati in Tabella 4.

Tabella 4: valori utilizzati per inizializzare le proprietà idrologiche dei diversi strati di suolo. I valori degli input richiesti dal modello sono: densità apparente (BD); contenuto di acqua di un campione di suolo all'equilibrio dopo essere stato esposto all'asciugatura in condizioni ambientali naturali (Air Dry); punto di appassimento permanente (LL15); capacità di campo (DUL); punto di saturazione del suolo (SAT); l'acqua potenzialmente disponibile per la coltura (PAWC = (DUL - LL15)*depth); la frazione di acqua disponibile per le piante in grado di essere estratta da un particolare strato di suolo (KL); il fattore di esplorazione della radice (XF), che determina l'abilità della radice di esplorare un determinato strato di suolo (0 = abilità nulla; 1 = abilità massima).

Strato	Profondità (cm)	BD (g cm ⁻³)	AirDry (mm/mm)	LL15 (mm/mm)	DUL (mm/mm)	SAT (mm/mm)	PAWC	KL	XF
1	0-15	1.39	0.105	0.210	0.356	0.474	21.9	0.10	1.00
2	15-30	1.39	0.146	0.210	0.356	0.467	21.9	0.10	1.00
3	30-60	1.39	0.188	0.210	0.346	0.457	40.8	0.08	1.00
4	60-90	1.39	0.210	0.210	0.336	0.447	37.8	0.06	1.00
5	90-120	1.39	0.210	0.210	0.326	0.437	34.8	0.04	1.00
6	120-150	1.39	0.210	0.210	0.316	0.427	31.8	0.02	1.00
7	150-180	1.39	0.210	0.210	0.300	0.411	27.0	0.01	1.00

Il modello è stato inizializzato anche in merito al contenuto di carbonio organico, nitrati ed ammonio nel suolo (Tabella 5) e all'apporto sostanza organica superficiale derivante dai residui della coltura precedente, stimata dai dati della sperimentazione pari a circa 8 t di sostanza secca come media annua di residui di sorgo.

Tabella 5: valori del contenuto in carbonio organico (OC), nitrati (NO₃) e ammoniaca (NH₄) nei diversi strati di suolo utilizzati per l'inizializzazione del modello)

Strato	Profondità (cm)	OC (%)	NO ₃ (kg ha ⁻¹)	NH ₄ (kg ha ⁻¹)
1	0-15	1.16	12.375	10.126
2	15-30	1.16	13.332	9.167
3	30-60	0.58	15.000	7.500
4	60-90	0.58	15.000	7.500
5	90-120	0.58	15.000	7.500
6	120-150	0.58	7.758	3.879
7	150-180	0.58	7.758	3.879

I dati meteo utilizzati sono quelli relativi ai valori di radiazione solare, temperatura massima e minima e pioggia giornalieri della stazione UCEA di San Piero a grado, relativi al periodo 1993-2005.

Per impostare la gestione della coltura (Tabella 6) sono stati utilizzati i dati dei quaderni di campagna relativi agli anni considerati per la calibrazione e la validazione del modello.

La lavorazione principale è stata distinta in aratura a 50 cm nel sistema convenzionale e in lavorazione a 25 senza inversione degli strati nel sistema integrato. La lavorazione principale e l'interramento dei residui sono avvenuti a seconda degli anni, nel periodo immediatamente successivo alla raccolta del sorgo (ottobre-novembre) o dopo a fine inverno (febbraio-marzo). Per la semina è stato considerato, come da dati della prova, un investimento teorico di 8 piante m⁻². La semina è stata condotta nei mesi di marzo e aprile.

La concimazione azotata nel sistema convenzionale è stata impostata secondo i protocolli della sperimentazione considerando una dose di 150 kgN ha⁻¹, frazionata in due applicazioni (80 kgN ha⁻¹ alla semina e 70 kgN ha⁻¹ in copertura). Nel sistema integrato la concimazione è stata impostata con una dose di 100 kgN ha⁻¹ distribuiti alla semina.



ALLEGATO II. Progetto SIC OLEAT - Sistemi di Innovazione Culturale per le Oleaginose Toscane
Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione di girasole e lino

Tabella 6: calendario delle principali operazioni colturali considerate nel modello di simulazione nei sistemi convenzionale ed integrato della prova CIMAS di San Piero a Grado.

MESE	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Interramento residui sorgo (8 tss/ha)												
Convenzionale A50												
Integrato 25												
Semina (8 piante/m ²)												
Convenzionale N (kg ha ⁻¹)						80		70				
Integrato N (kg ha ⁻¹)						100						
Raccolta												

La calibrazione è stata effettuata sui valori di resa e produzione di biomassa misurati in campo espressi in kg di sostanza secca ad ettaro e puntando a massimizzare il coefficiente di determinazione r^2 , di minimizzare la radice quadrata dell'errore quadratico medio (RMSE), il valore dell'intercetta della retta di regressione tra valori predetti e valori osservati, e di ottenere un valore prossimo ad 1 della pendenza della retta di regressione tra valori predetti e valori osservati.

1.2.3 Simulazioni a scala territoriale

Per le simulazioni a scala territoriale sono stati utilizzati i dati meteo giornalieri delle serie storiche (1979-2020) spazializzate AGRI4CAST (JRC, European Commission EU, Science Hub).

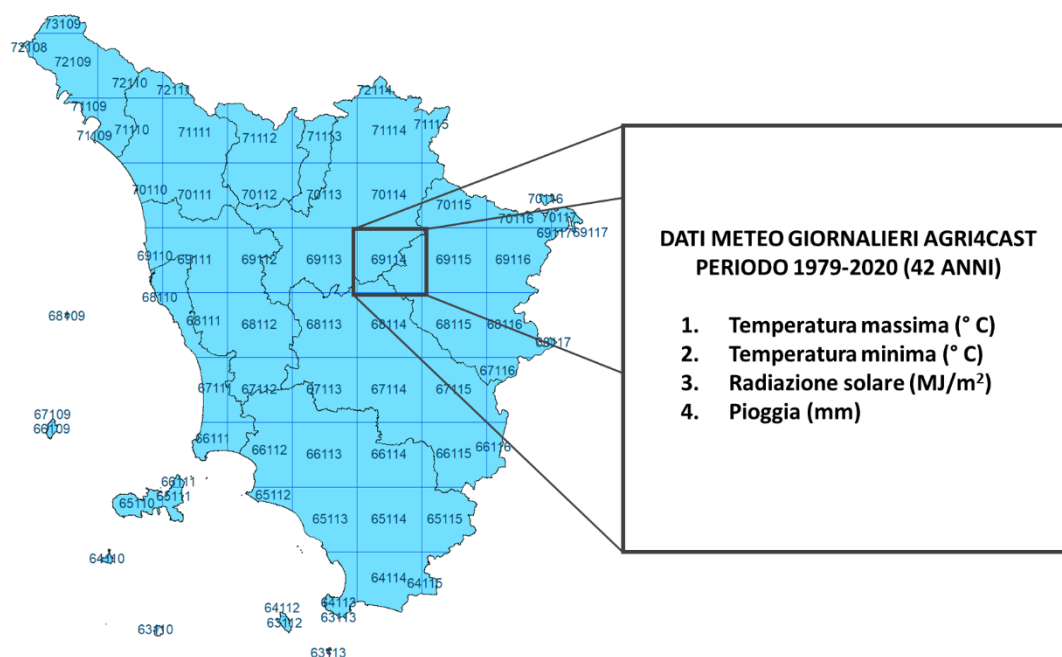


Figura 2: dati meteo giornalieri spazializzati (formato griglia) della serie storica 1979-2020 AGR14CAST. A ogni cella sono associati valori giornalieri di temperatura massima, minima, radiazione solare e pioggia.

Le celle della griglia AGRI4CAST (Figura 2) utilizzate per la simulazione sono state selezionate in base alla presenza di uso suole del seminati, attraverso intersezione con lo strato informativo soil use del Corine Land Cover. In base a tale selezione delle 65 celle che compongono la griglia ne sono state utilizzate solo 55.

Per la simulazione delle condizioni del suolo sono state utilizzate le classi pedologiche della mappa pedologica regionale LAMMA-CRES (Figura 3). A partire dai dati di tessitura e sostanza organica codificati nel geodatabase della pedologia dei suoli, sono stati calcolati i valori delle proprietà idrologiche mediante funzioni di pedotrasferimento del modello Soil Water Characteristics (USDA).

I valori utilizzati per inizializzare in profili di suolo in base alle proprietà idrologiche sono riportati in Tabella 7.

Per la gestione della coltura (Tabella 8) è stata impostata una lavorazione principale, aratura a 30 cm, nel mese di ottobre con interrimento di 1 t di sostanza secca di residui della coltura in precessione (frumento duro). Una distribuzione di 80 kgN ha⁻¹ alla semina e 70 kgN ha⁻¹ in copertura in formato urea. Per la densità di semina è stato considerato un investimento teorico di 8 piante m⁻².

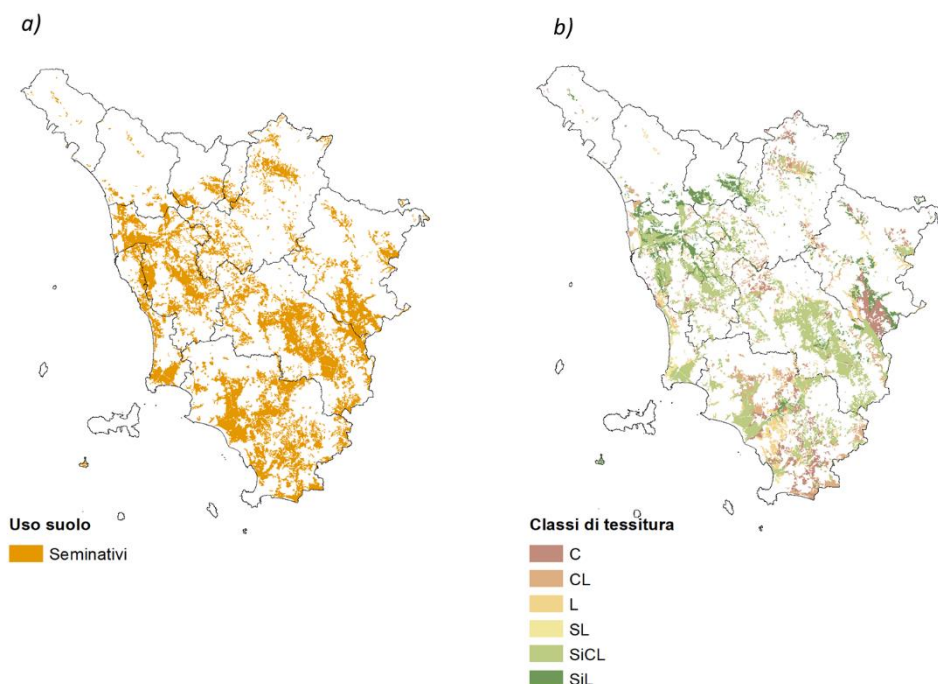


Figura 3: a) uso suolo seminativi del Corine Land Cover; b) classi di tessitura prevalenti (LAMMA-CRES) nei seminativi della regione toscana (C = argilloso; CL = franco argilloso; L = franco; SL = franco sabbioso; SiCL = franco limo argilloso; SiL = franco limoso).

Tabella 7: proprietà idrologiche dei profili delle sei classi di suolo prevalenti utilizzate per le simulazioni a scala territoriale

	Profondità (cm)	AirDry	LL15	DUL	SAT		Profondità (cm)	AirDry	LL15	DUL	SAT
C	0-15	0.17	0.33	0.45	0.52	SiCL	0-15	0.13	0.25	0.39	0.51
	15-30	0.23	0.33	0.45	0.51		15-30	0.17	0.25	0.39	0.50
	30-60	0.30	0.33	0.44	0.50		30-60	0.22	0.25	0.38	0.49
	60-90	0.33	0.33	0.41	0.49		60-90	0.25	0.25	0.36	0.48
	90-120	0.33	0.33	0.40	0.48		90-120	0.25	0.25	0.35	0.47
	120-150	0.33	0.33	0.39	0.47		120-150	0.25	0.25	0.34	0.46
	150-180	0.33	0.33	0.38	0.46		150-180	0.25	0.25	0.33	0.45
CL	0-15	0.10	0.19	0.34	0.47	SiL	0-15	0.07	0.14	0.31	0.45
	15-30	0.13	0.19	0.34	0.46		15-30	0.10	0.14	0.31	0.44
	30-60	0.17	0.19	0.33	0.45		30-60	0.13	0.14	0.30	0.43
	60-90	0.19	0.19	0.31	0.44		60-90	0.14	0.14	0.29	0.42
	90-120	0.19	0.19	0.30	0.43		90-120	0.14	0.14	0.28	0.41
	120-150	0.19	0.19	0.30	0.42		120-150	0.14	0.14	0.27	0.41
	150-180	0.19	0.19	0.29	0.41		150-180	0.14	0.14	0.26	0.40
L	0-15	0.07	0.14	0.29	0.44	SL	0-15	0.05	0.10	0.21	0.43
	15-30	0.10	0.14	0.29	0.43		15-30	0.07	0.10	0.21	0.42
	30-60	0.13	0.14	0.28	0.42		30-60	0.09	0.10	0.20	0.41
	60-90	0.14	0.14	0.27	0.41		60-90	0.10	0.10	0.19	0.40
	90-120	0.14	0.14	0.26	0.40		90-120	0.10	0.10	0.19	0.40
	120-150	0.14	0.14	0.25	0.40		120-150	0.10	0.10	0.18	0.39
	150-180	0.14	0.14	0.24	0.39		150-180	0.10	0.10	0.18	0.38

Tabella 8: calendario delle principali operazioni colturali considerate per le simulazioni a scala territoriale.

MESE	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Interramento residui frumento (1 tss/ha)												
Lavorazione principale Aratura 30 cm												
Semina (8 piante/m ²)												
Concimazione N (kg ha ⁻¹)						80	70	70				
Raccolta												

La data di semina ideale in ogni cella è stata calcolata a partire dai dati meteo e considerando i GDD della coltura per le fasi semina-emergenza ed emergenza-sviluppo della seconda foglia vera (V2) al fine di considerare la variabilità delle condizioni climatiche nel territorio utilizzando due criteri:

1. Completamento dell'emergenza in 15 giorni dalla data di semina
2. Possibilità di evitare l'occorrenza di gelate tardive nella fase di sviluppo compresa fra l'emergenza e lo sviluppo della seconda foglia vera.

Il criterio 1 consente di stimare la data di semina in un'epoca in cui le condizioni di temperatura media giornaliera sono tali da favorire un completamento dell'emergenza in un periodo di tempo contenuto, tale da ridurre i rischi di competizione eccessiva delle infestanti e di predazione dei semi da parte di insetti ed uccelli. Quindi il criterio 1 permette di calcolare la data di semina, a partire dal primo giorno dell'anno, nella prima data utile per soddisfare un accumulo di GDD (96.6 °C con Tbase = 4 °C) necessari a completare la fase di emergenza in 15 giorni.

La data di semina viene ulteriormente corretta applicando il criterio 2, che verifica che, una volta stimata la data di semina in base al criterio 1, non vi sia probabilità che si verifichino giorni di gelo (Tmin < 0 °C) nella fase successiva all'emergenza fino allo sviluppo della seconda foglia vera.

La procedura è stata sviluppata in linguaggio plpgsql ed implementata sul geodatabase del progetto progettato e gestito tramite PostgreSQL 9.5.

Per ogni cella della griglia AGRI4CAST sono state simulate tutte e 6 le condizioni di suolo prevalente. Quindi, in totale sono state eseguite 55 (celle) x 42 (anni) x 6 (classi di suolo) simulazioni (13,860).

1.2.4 Analisi dei risultati e rappresentazione cartografica

Gli output delle simulazioni, ovvero le rese di granella e la produzione di biomassa aerea alla raccolta, sono stati organizzati e gestiti nel geodatabase del progetto implementato su PostgreSQL 9.5, insieme a tutti i set di dati relativi al meteo, alle proprietà dei suoli e all'uso del suolo.

La visualizzazione cartografica dei risultati è stata effettuata attraverso QGIS 3.16 al fine rappresentare la variabilità spaziale di:

1. le temperature e le precipitazioni medie annuali;
2. la media delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione ET_0 cumulata relative al periodo di coltivazione del girasole (marzo-agosto);
3. la media delle precipitazioni e dell'indice globale di umidità Im del periodo maggio-giugno, stagione critica per lo sviluppo del girasole, che coincide con gli stadi di fioritura e sviluppo iniziale degli acheni;
4. la media delle date di semina più probabili calcolate in funzione del solo criterio 1 o della combinazione di entrambi i criteri;
5. la resa media della coltura per classe di suolo;
6. l'indice di stabilità delle rese s per classe di suolo;
7. la mappa di correlazione delle precipitazioni annuali del periodo maggio-giugno con le rese annuali per classe di suolo.

Il Im è stato calcolato secondo la formula proposta da Thornthwaite (1948), secondo la seguente formula:

$$Im = \frac{(\sum_t^{t+n} P - \sum_t^{t+n} ET_0)}{\sum_t^{t+n} ET_0}$$

che descrive quantitativamente le possibili condizioni di surplus o deficit idrico potenziale di un'area in base al rapporto della differenza tra le precipitazioni (P) cadute in un determinato periodo tra t e $t+n$ e l'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) complessiva avvenuta nello stesso periodo sull'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) complessiva. L' ET_0 è dato fornito nel data base AGRI4CAST ed è stimata secondo il modello di Penman-Monteith (Allen et al. 1998).

L'indice di stabilità delle rese s è stato invece determinato secondo l'approccio proposto basato sull'Environmental Index EI (Del Moral et al, 2003), per cui la resa media annuale del girasole in ogni cella e per ogni classe di suolo è stata confrontata con un EI che rappresenta la resa media annuale tra tutte le celle per classe di suolo attraverso regressione lineare. La pendenza della retta di regressione rappresenta l'indice s (Figura 4).

Per valori di s superiori a uno la stabilità delle rese può essere considerata bassa (elevata reattività al variare delle condizioni), mentre per valori inferiori ad uno la stabilità delle rese è elevata (bassa reattività al variare delle condizioni).

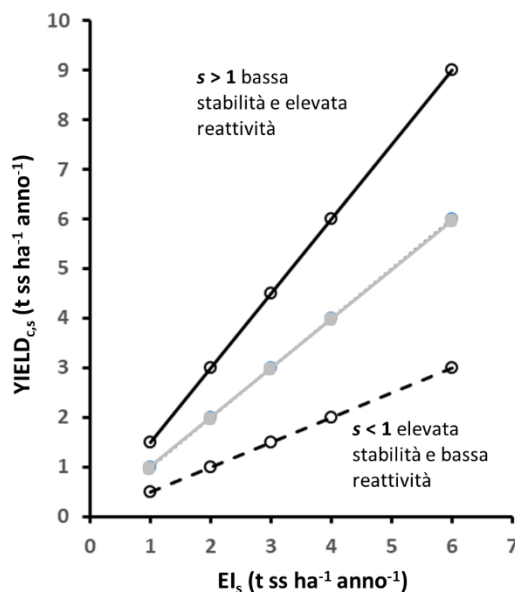


Figura 4: grafico esplicativo dell'indice di stabilità delle rese s , calcolato come pendenza della retta di regressione tra resa media annuale (YIELD) per cella (C) e classe suolo (S), e l'Environmental Index (EI) calcolato come resa media annuale regionale per classe di suolo (S).

Infine, l'indice di Pearson (r) è stato utilizzato per stimare in ogni cella la correlazione tra indici meteorologici e rese annuali per classe di suolo. In particolare sono stati valutati la cumulata delle precipitazioni, l'ET0 cumulata e l'indice globale di umidità per i periodi marzo-agosto, aprile-agosto, maggio-agosto, maggio-luglio, maggio-giugno, maggio e giugno. La somma delle precipitazioni relative al periodo maggio-giugno è risultato l'indice maggiormente correlato con le rese della coltura.

1.3 Risultati

1.3.1 Calibrazione e validazione del modello

In Figura 5 sono riportati i risultati del test di calibrazione e validazione del modello APSIM condotti tramite analisi della regressione lineare.

Nel caso della granella i coefficienti di determinazione r^2 mostrano una un'ottima corrispondenza tra valori predetti e valori osservati, confermati da valori prossimi ad 1 delle pendenze delle rette di regressione e da valori dell'intercetta sull'asse y delle stesse di poco superiori a 0 (Figura 5a).

L'RMSE è risultato pari a 219 e 175 kg ha⁻¹ per i dataset di calibrazione e validazione, corrispondenti a RRMSE pari al 6.2 e al 4.4% rispettivamente.

Meno soddisfacenti sono stati i risultati ottenuti sulla produzione di biomassa aerea totale nonostante valori di r^2 comunque elevati e comparabili a quelli ottenuti per la granella, soprattutto nella fase di calibrazione. Tuttavia i valori delle pendenze e delle intercetta delle rette di regressione evidenziano una tendenza del modello a sovrastimare produzioni di biomassa basse, comportando RMSE pari a 1744 e 2117 kg ha⁻¹ nei dataset di calibrazione e valutazione, con una percentuale di errore (RRMSE) pari al 19 e al 21.5% rispettivamente (Figura 5b).

Tale imprecisione nella capacità di simulare la produzione totale della biomassa, a fronte di una buona abilità riscontrata invece nella predizione della granella, può essere dipesa dal metodo di campionamento utilizzato in campo. Infatti ritardi nella fase di campionamento rispetto al raggiungimento della piena maturazione degli acheni, può aver comportato una riduzione della biomassa osservata, rispetto a quella effettivamente prodotta, dovuta all'abscissione delle foglie e dall'altezza di taglio delle piante. E' anche ipotizzabile l'inabilità del modello utilizzato a simulare correttamente lo sviluppo delle calatidi.

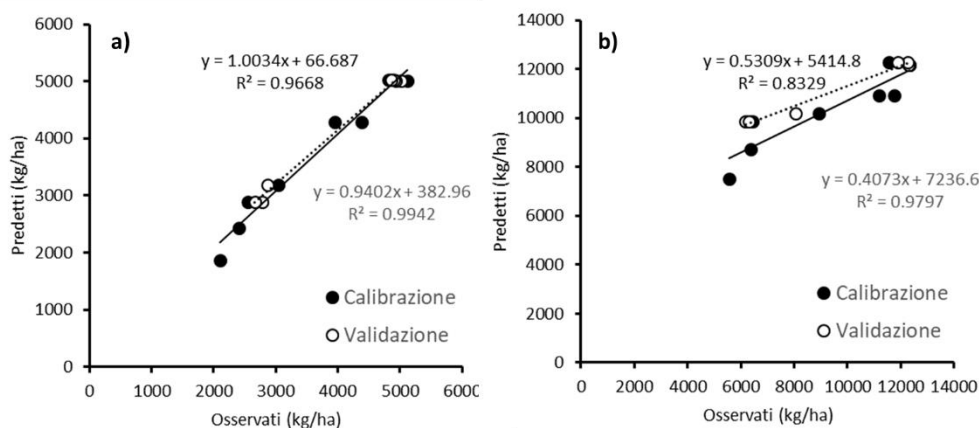


Figura 5: risultati dell'analisi di regressione lineare tra valori osservati e predetti tramite modelli APSIM della resa in granella (a) e della produzione di biomassa aerea totale (b) espressi in sostanza secca sui dataset di calibrazione e validazione.

1.3.2 Andamento meteorologico di lungo periodo

In base al dataset di dati meteorologici utilizzato, l'andamento delle temperature medie annuali a livello regionale (Figura 6) mostra una tendenza all'incremento nel tempo sia delle temperature massime (da 18.5 a 20 °C) che delle temperature minime (7 – 10.5°C).

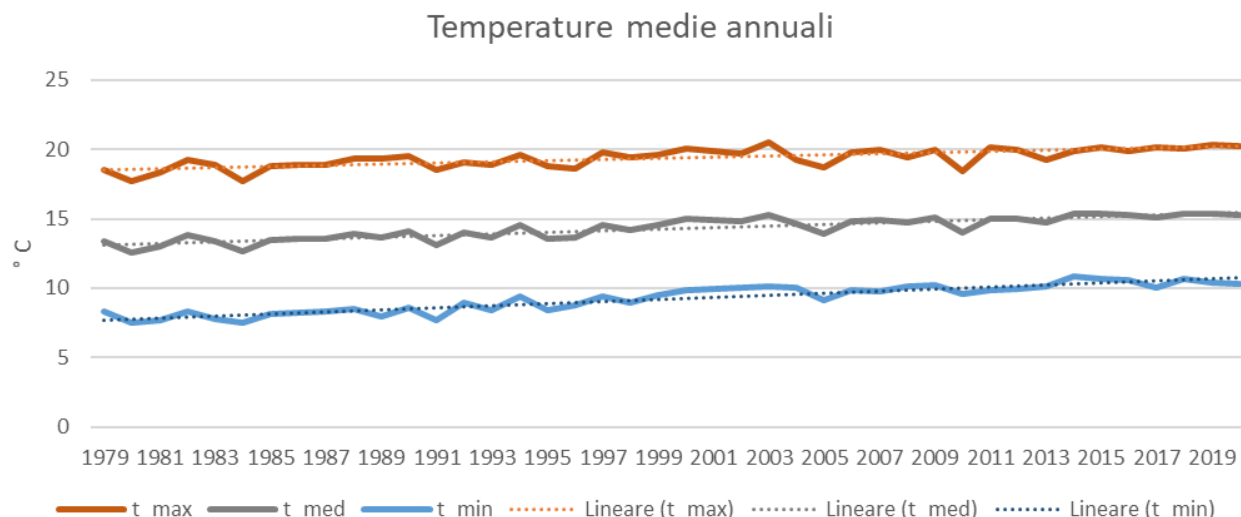


Figura 6: andamento delle medie delle temperature massime, medie e minime annuali dal 1979 al 2020 a livello regionale.

Come apprezzabile in Figura 7 è stata osservata anche una tendenza all'incremento della media delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione di riferimento annuali. Nel caso delle precipitazioni, la tendenza ha mostrato un incremento medio di circa 150 mm. E' interessante osservare che negli ultimi 15 il dato di precipitazione ha mostrato una più ampia variabilità rispetto al periodo precedente, infatti dal 2005 in poi sia sono state registrate sia le annate più piovose, con valori medi regionali fino a 1000 mm, che le annate meno piovose, con valori di poco superiori ai 400 mm.

L'evapotraspirazione pur rispondendo anch'essa ad un trend incrementale, ha comunque mostrato una minore variabilità tra un anno e l'altro, con valori che oscillano intorno ai 1000 mm, ad eccezione del 2003, anno ricordato per le alte temperature estive, in cui l'evapotraspirazione annuale media della regione ha raggiunto 1200 mm.

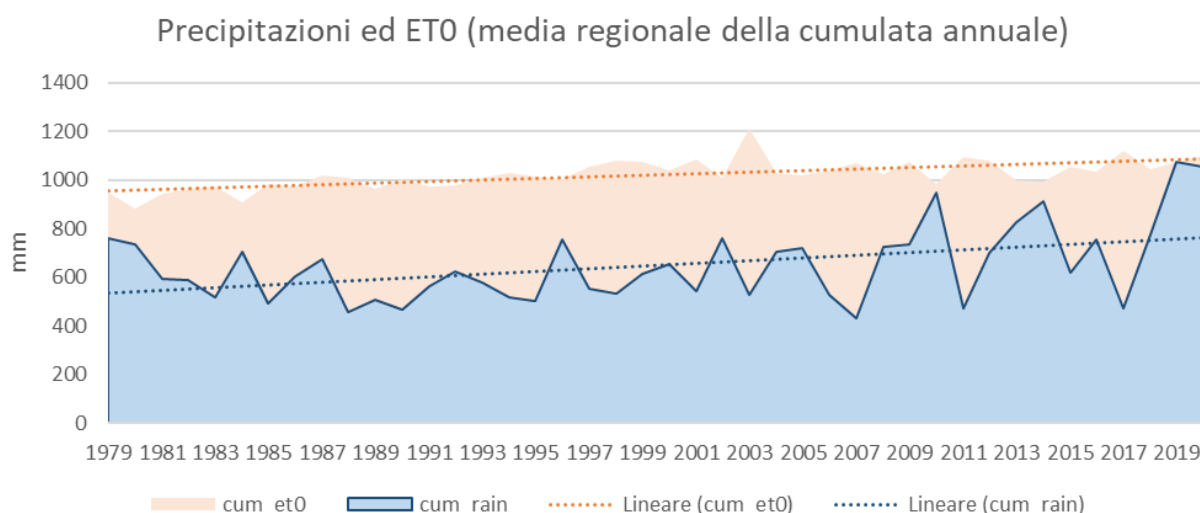


Figura 7: andamento delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione (ET₀) medie annuali a livello regionale nel periodo 1979-2020.

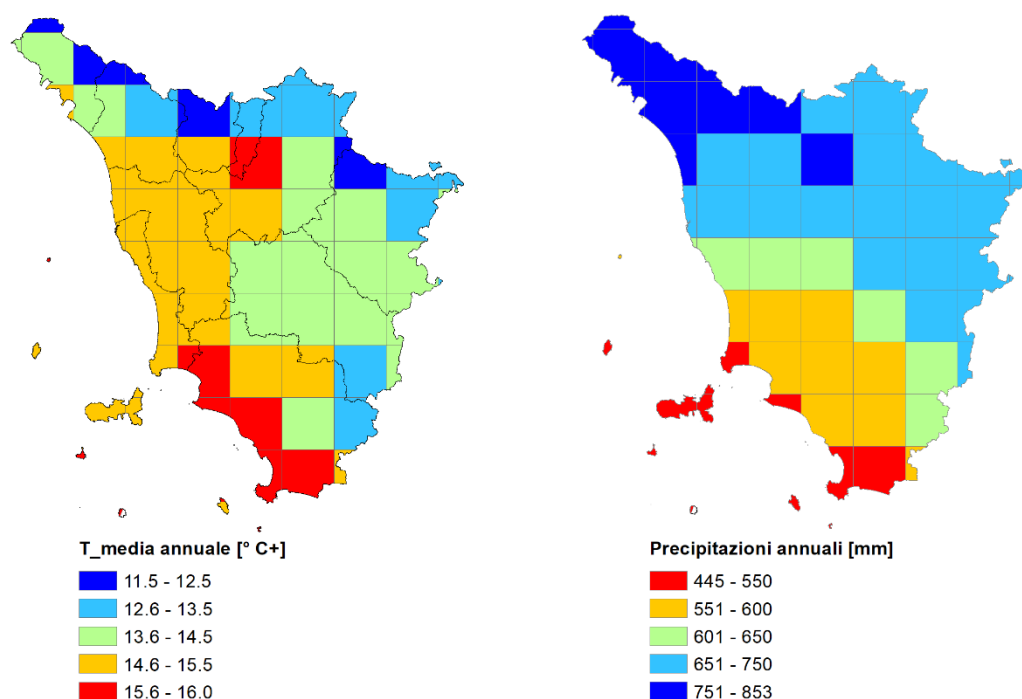


Figura 8: rappresentazione per celle delle temperature medie annuali e delle precipitazioni medi annuali del periodo 1979 – 2020 nella rione Toscana.

Considerando le temperature medie annuali del periodo 1979-2020 (Figura 8) le aree più calde a livello regionale sono quelle costiere della provincia di Grosseto, che corrispondono anche alle meno piovose (450-550 mm anno⁻¹), e l'area circostante la città di Firenze. Le aree più fredde sono in corrispondenza delle zone montane delle Alpi Apuane e dell'appennino Tosco-Emiliano. I livelli di precipitazione annuale più elevati sono stati rilevati nelle aree della Lunigiana e dalla Garfagnana fino all'area metropolitana di Firenze, con valori compresi tra 750 e 850 mm di media annuale di lungo periodo.

Nella stagione di coltivazione del girasole (marzo-agosto), in base alle medie di lungo periodo le precipitazioni più basse sono state osservate in corrispondenza delle isole (127-150 mm) e delle province di Livorno e Grosseto, 150-220 mm. In corrispondenza di queste aree i livelli medi di evapotraspirazione di riferimento sono stati variati tra 750 e 820 mm, risultando quasi 4 volte superiori agli apporti di acqua da pioggia (Figura 9).

Focalizzando l'osservazione dei principali parametri agrometeorologici al periodo di probabile fioritura della coltura (Figura 10), corrispondente ai mesi di maggio e giugno, il livello delle precipitazioni medi di lungo periodo nelle aree costiere del sud della regione è di appena 38-55 mm, contro i 100-118 millimetri delle aree montane e dell'interno. Il deficit idrico potenziale dello stesso periodo, derivato dal calcolo dell'indice di umidità globale, evidenzia nelle stesse aree valori che rappresentano, per quella finestra temporale, condizioni di aridità (<-0.67), ed in generale una bassa compensazione, estesa a livello regionale, dei livelli potenziali di evapotraspirazione da parte degli apporti meteorologici. Tuttavia ricordiamo che l'indice è calcolato solo per il periodo maggio-giugno e rappresenta una situazione molto più critica rispetto invece al bilancio annuale.

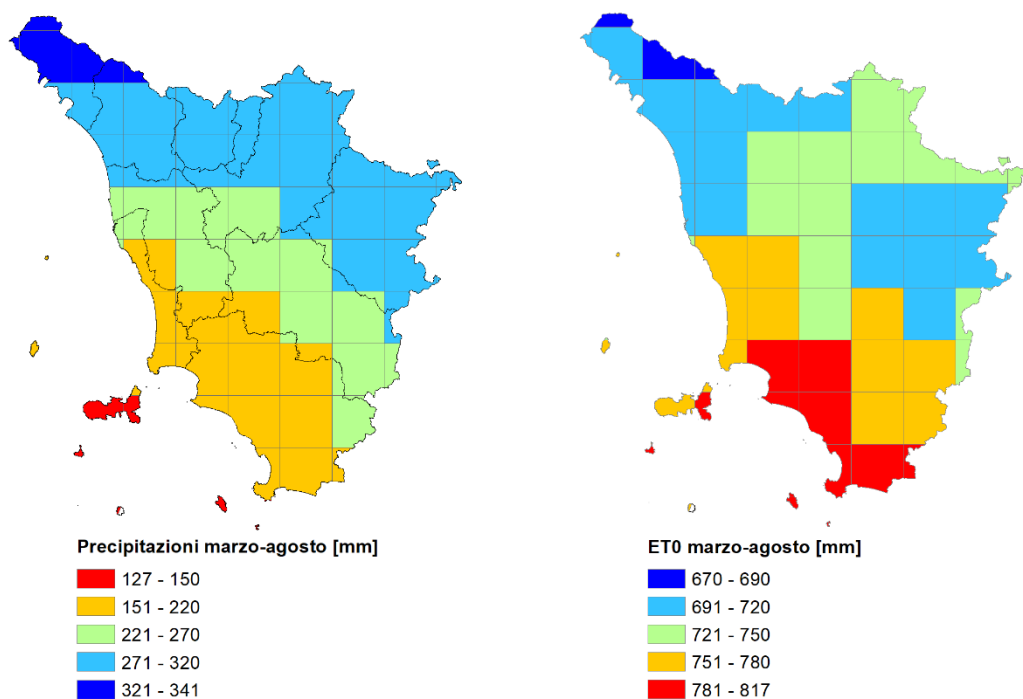


Figura 9: media di lungo periodo delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione di riferimento della stagione di coltivazione del girasole (marzo-agosto).

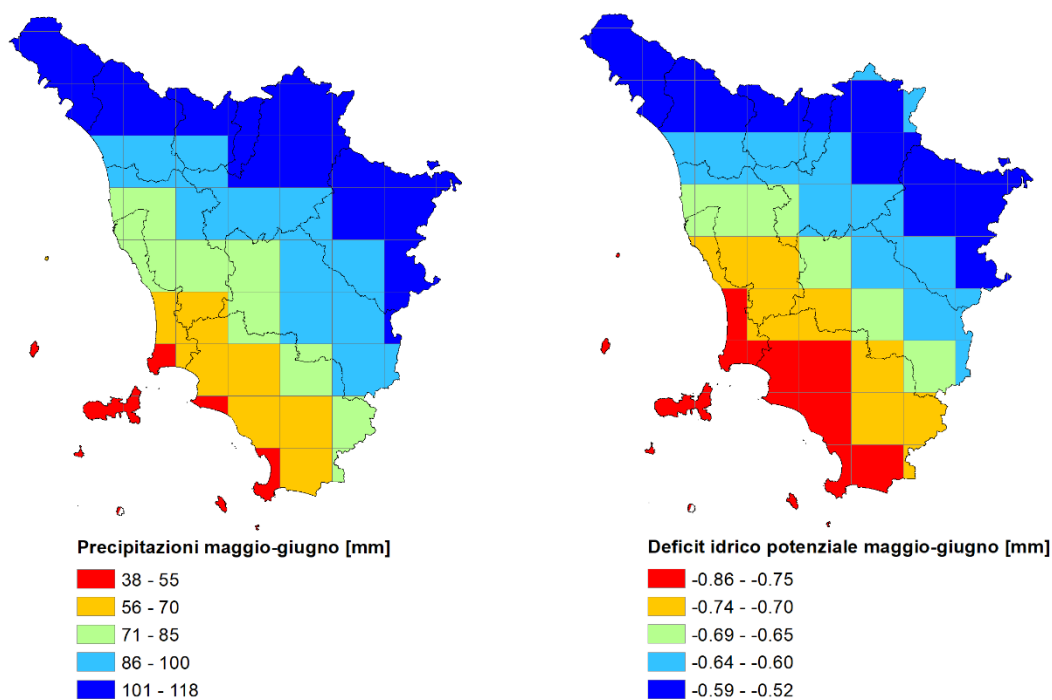


Figura 10: media di lungo periodo delle precipitazioni del deficit idrico potenziale (indice di umidità globale di Thornthwaite) nei mesi di maggio e giugno.

1.3.3 Effetto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulle rese della coltura in condizioni limitanti

Il risultato delle simulazioni a scala territoriale delle produzioni di girasole nel periodo 1979-2020, è dipeso anche dalla definizione delle date di semina per anno e per cella. Tali date sono state definite in base a variabili meteorologiche ed in funzione della fenologia della coltura nei primissimi stadi di sviluppo. In particolare è stato utilizzato il metodo basato su due criteri (emergenza entro 15 giorni dalla semina ed esclusione del rischio di gelate tardive durante tra la fase di emergenza e la fase di sviluppo della seconda foglia vera). Considerando solo il primo criterio (vedi dettagli capitolo materiali e metodi) si osserva, analizzando la media di lungo periodo, una maggiore variabilità a livello territoriale delle date si semina più probabili, che in Figura 11 sono riportate nella mappa di sinistra in giorni dall'inizio dell'anno. Si può osservare che le semina possono avvenire già tra il 38 e il 50 giorno (seconda e terza decade di febbraio) nelle area costiere a sud, fino ai giorni 85-106 (dall'ultima decade di marzo alla terza di aprile) nelle aree montuose dell'appennino e della Val d'Orcia.

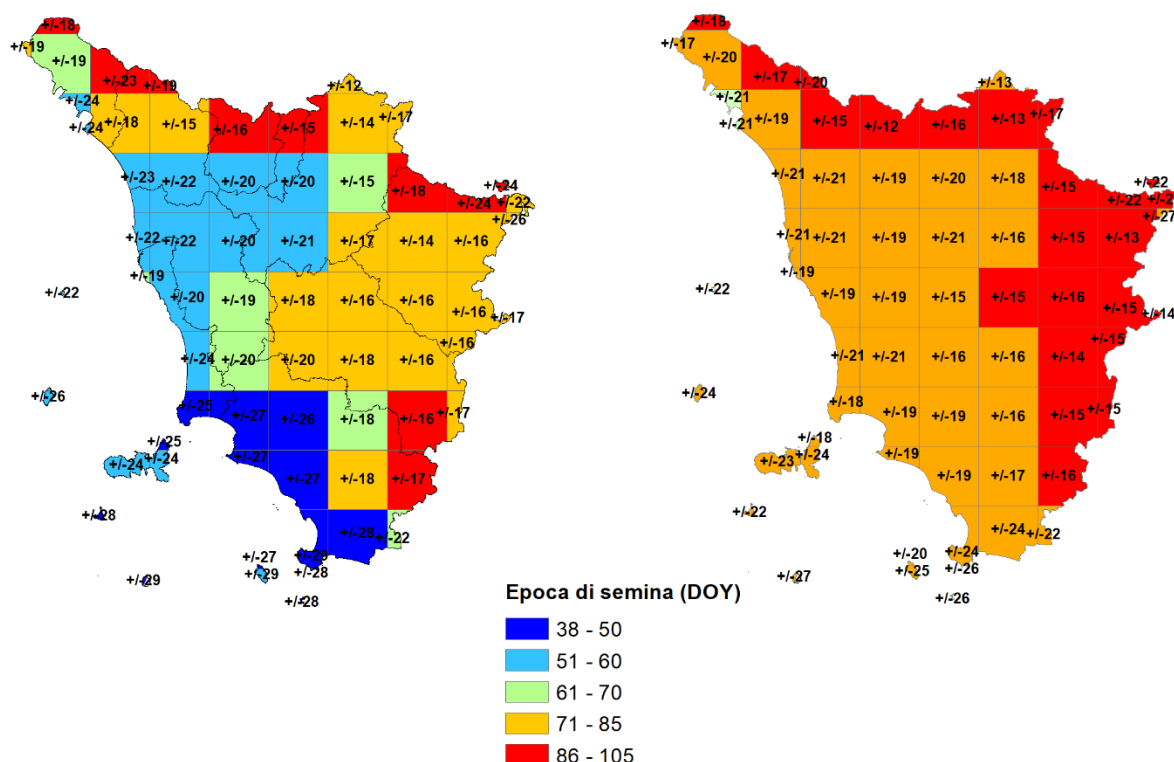


Figura 11: media delle date di semina (esprese in giorni dall'inizio dell'anno, DOY) stimate in base all'utilizzo del solo Criteri 1 (sx) e dei Criteri 1 e 2 (dx).

Considerando anche l'occorrenza di gelate tardive (mappa destra di Figura 11), la variabilità a livello territoriale si riduce ad un intervallo compreso tra i giorni 86-105 (ultima decade di marzo – terza decade di aprile) nelle aree montuose ed più interne, e tra i giorni 71 e 85 (seconda e terza decade di marzo) nel resto della regione.

Dai risultati delle simulazioni ottenute, le media del periodo 1979-2020 delle rese medie regionali del girasole ammonta a circa 3150 kg ha⁻¹, con un trend crescente paria a circa 10 kg ha⁻¹anno⁻¹. La media delle rese

massime e minime simulate è pari invece a 6320 e 1090 kg ha⁻¹ (Figura 12). Tale trend è in linea con quello osservato per temperature e precipitazioni.

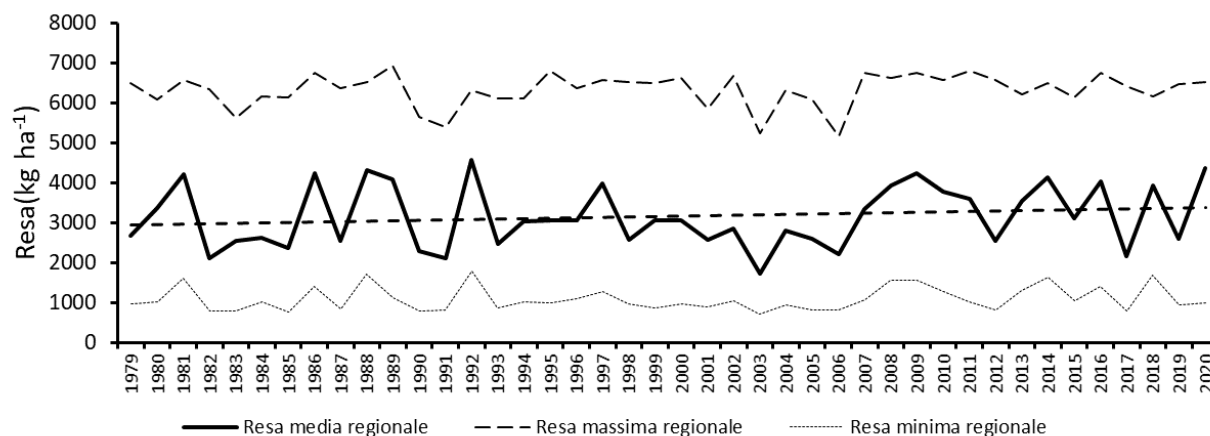


Figura 12: andamento medio regionale delle rese medie, massime e minime simulate nel periodo 1979-2020.

Anche la varianza annuale delle rese calcolata a livello regionale mostra un trend crescente dal 1979 al 2020 (Figura 13).

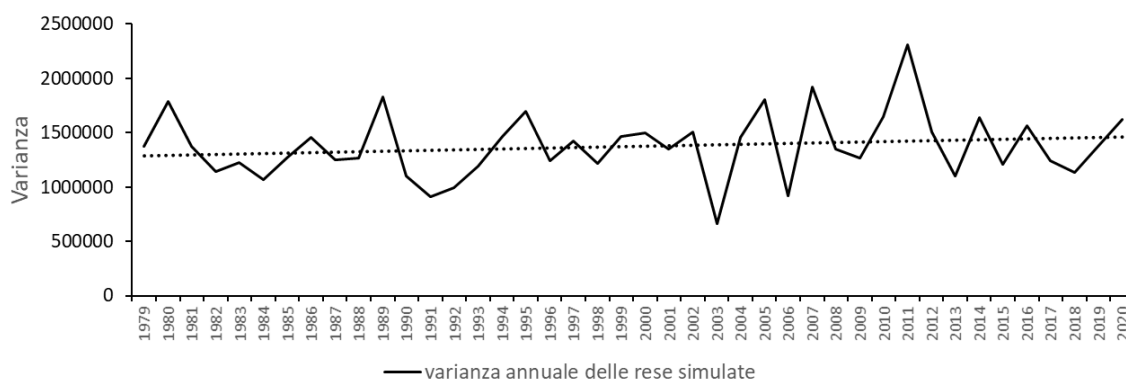


Figura 13: andamento della varianza annuale delle rese a livello regionale dal 1979 al 2020.

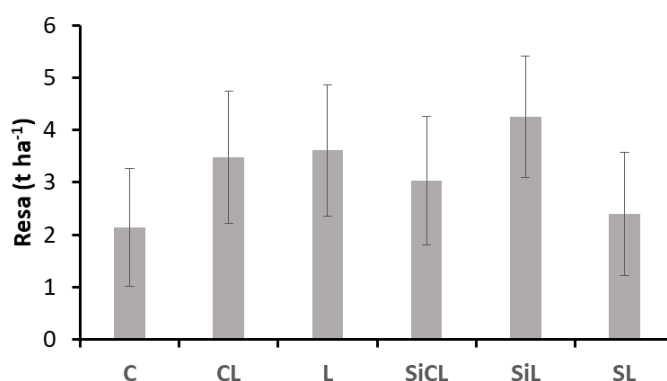


Figura 14: Media e deviazione standard regionale delle rese simulate del girasole nel periodo 1979-2020 per classi di tessitura del suolo. C= argilloso; CL= franco argilloso; L=franco; SiCL= franco limo argilloso; SiL= franco limoso; SL = Franco sabbioso.

Il grafico di Figura 14 mostra la variazione delle rese simulate, riportate come media regionale di lungo periodo, per classi di suolo. Le rese più basse sono state stimate nei suoli caratterizzati da tessitura argillosa e franco sabbiosa (2.1 e 2.4 t ha⁻¹), mentre le rese più alte sono quelle dei terreni franco limosi (4.2 t ha⁻¹). Rese intermedie sono state stimate nei terreni franchi, franco argillosi, e franco limo argillosi pari a 3.6, 3.5 e 3 t ha⁻¹ di sostanza secca rispettivamente.

Gli elevati valori di deviazione standard osservabili nel grafico di Figura 14 dipendono dal fatto che le medie sono calcolate come media regionale, e quindi dalla variabilità spaziale. Tale variabilità delle rese per classe di suolo può essere apprezzata nelle mappe di Figura 15.

In tutte e sei le mappe è possibile apprezzare valori decrescenti delle rese stimate da nord-ovest a sud-est, determinato da latitudine e distanza dalla costa. In terreni argillosi le rese medie stimate, variano da livelli inferiori a 2 t ha^{-1} fino ad un massimo di 3, osservato tra l'altro in aree poco rappresentative dal punto di vista della coltivazione delle colture erbacee di pieno campo. Nei terreni franco-sabbiosi, pure rimanendo bassa la media regionale, la forbice dei valori di resa aumenta poiché si registrano livelli inferiori a 1 t ha^{-1} nelle aree costiere e compresi tra 3 e 4 t ha^{-1} in corrispondenza della provincia di Massa-Carrara. Per i suoli franco argillosi e franchi le rese stimate variano tra le classi 2-3 e $5-6 \text{ t ha}^{-1}$. Nelle condizioni di suolo limo argilloso si osservano le medie regionali più elevate e la variabilità spaziale più bassa, essendo il territorio rappresentato quasi esclusivamente dalle classi di resa 3-4 e $4-5 \text{ t ha}^{-1}$.

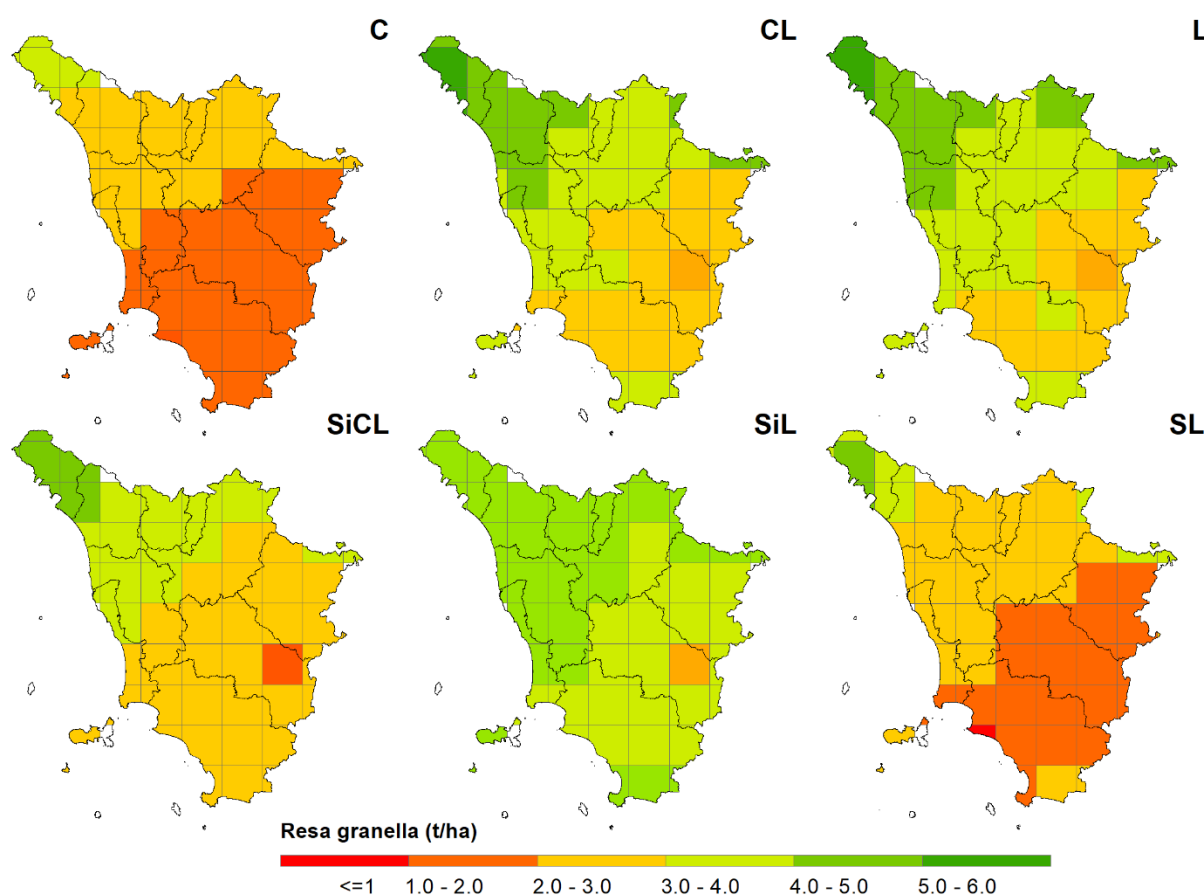


Figura 15: le mappe rappresentano le medie di lungo periodo delle rese simulate per cella della griglia climatica AGRI4CAST e per classe di suolo. C= argilloso; CL= franco argilloso; L=franco; SiCL= franco limo argilloso; SiL= franco limoso; SL = Franco sabbioso.

La mappa di Figura 16, che rappresenta una sintesi unica delle sei mappe dell'immagine precedente, con i valori di resa assegnati alle corrispondenti classi di tessitura presenti nei seminativi delle diverse celle della griglia climatica, mostra che:

1. le aree più vocate dal punto di vista delle produzione sono corrispondenti alla media e bassa Val d'Arno, con valori attesi medi tra 3 e 5 t ha^{-1} ;
2. le rese più elevate ($5-6 \text{ t ha}^{-1}$) sono state stimate in corrispondenza di aree poco rappresentative dal punto di vista delle coltivazioni erbacee di pieno campo;

3. rese comprese tra 3 e 4 t ha⁻¹ sono state stimate anche in corrispondenza i alcuni tratti della val di Chiana, della val d'Elsa, del Mugello, dell'Ombrore e dell'Albegna;
4. nella maggior parte dei territori agricoli delle province di Livorno, Siena, Grosseto e del sud della provincia di Pisa, le rese stimate non superano le 3 t ha⁻¹.

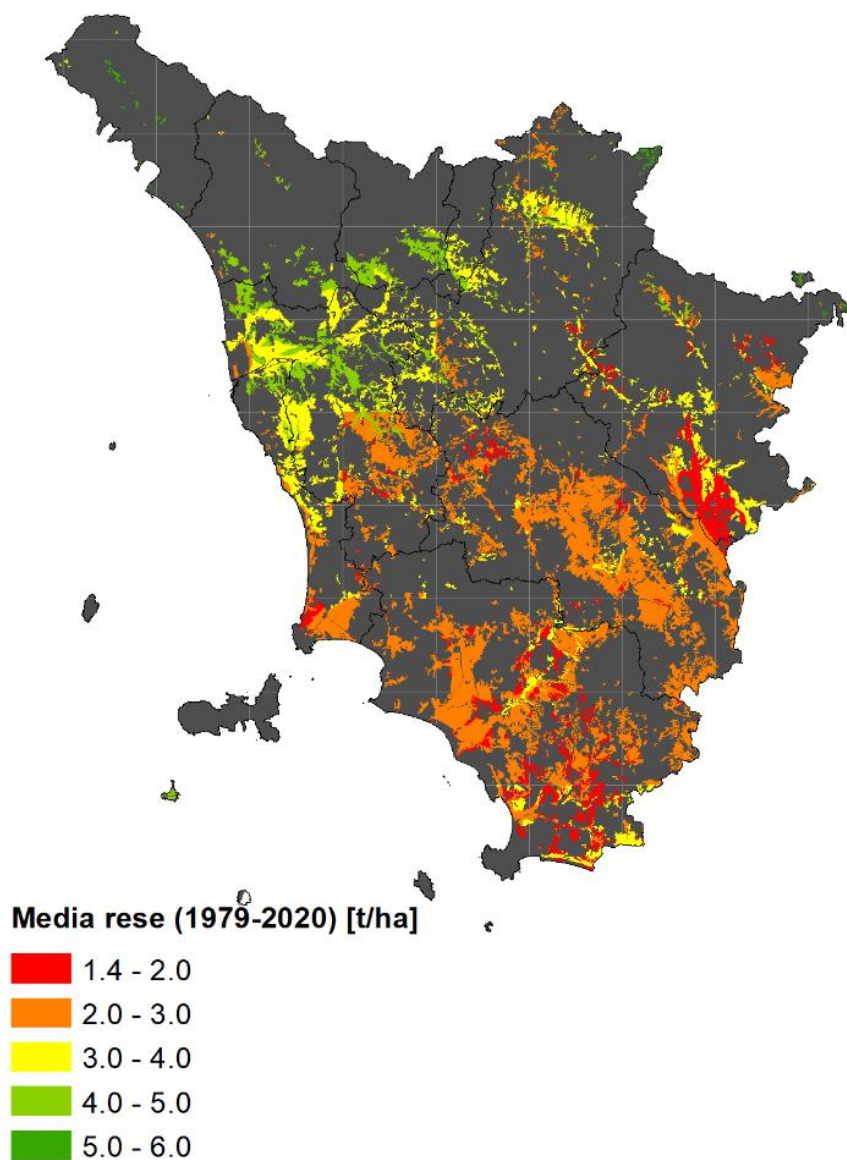


Figura 16: la mappa rappresenta le rese medie di lungo (1979-2020) stimate per i seminativi toscani in funzione della variabilità delle condizioni climatiche e della mappa delle tipologie di suolo.

1.3.4 Effetto delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di suolo sulla stabilità delle rese

Dalle mappe di Figura 17 è possibile osservare come vi sia un'inversione della stabilità delle rese nel tempo tra suoli caratterizzati da bassa capacità idrica, cioè suoli argillosi o suoli franco sabbiosi, rispetto a suolo franco limosi caratterizzati da più elevata capacità idrica. Infatti nei suoli C ed SL si osservano livelli di instabilità delle rese più alti al nord, a significare una che in condizioni di suolo poco favorevole un gli apporti di pioggia sono determinati ai fini delle risposta della coltura, il contrario si osserva in condizioni di suolo più favorevoli (SiL), dove livelli di pioggia delle aree a nord sono quasi sempre sufficienti a sostenere rese elevate. In SiL si osserva invece una forte instabilità in arre interne, caratterizzate da climi più continentali, dove probabilmente l'alternanza delle rese nel tempo è determinata dalle forti escursioni termiche tra primavera ed estate, che possono portare a stress termici da freddo (in caso di gelate tardive) o da caldo nel periodo di fioritura della coltura, e ciò in SiL, e in misura minor in CL e L, è probabilmente reso più evidente dal fatto che il suolo non rappresenta un limite ai fine della disponibilità d'acqua.

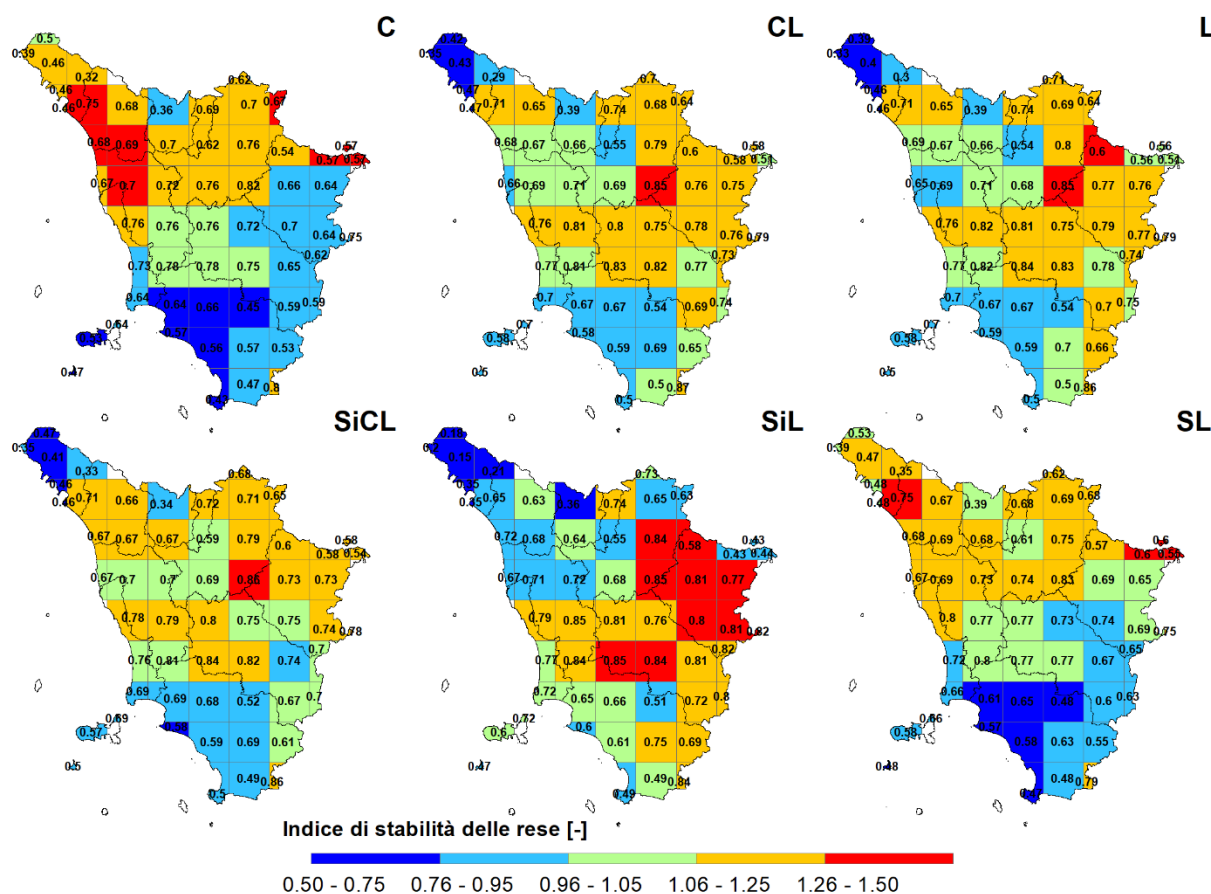


Figura 17: variazione a livello regionale dell'indice di stabilità delle rese per classe di suolo. L'etichetta riportata in ogni cella rappresenta il coefficiente di determinazione delle regressioni in base alle quali è stato calcolato l'indice.

1.3.5 Principali fattori limitanti la crescita della coltura e la produzione di granella

Analizzando i dati meteo di lungo periodo, abbiamo osservato come il bilancio idrico stagionale di alcune aree della regione sia prevalentemente influenzato dalla precipitazioni, essendo esse più variabili da anno ad anno rispetto all'ET₀. Pertanto abbiamo analizzato come varia nella regione il grado di influenza delle precipitazioni sulle rese del girasole, attraverso analisi della correlazione con l'indice r di Pearson. Si è osservato che l'influenza delle piogge è maggiore proprio in corrispondenza delle aree costiere e nei mesi di maggio e giugno, quando i livelli evapotraspirativi della coltura sono massimi, essendo massima la superficie fogliare sviluppata dalla coltura ed il fabbisogno idrico, in una fase, quella di fioritura, particolarmente determinante ai fini produttivi (García-López et al., 2014; Hussain et al., 2018). Come presumibile, l'influenza degli apporti di acqua da pioggia appare ancora più forte in suoli dotati di scarsa capacità idrica, come quelli caratterizzati tessiture tendenti all'argilloso o al sabbioso (Figura 18).

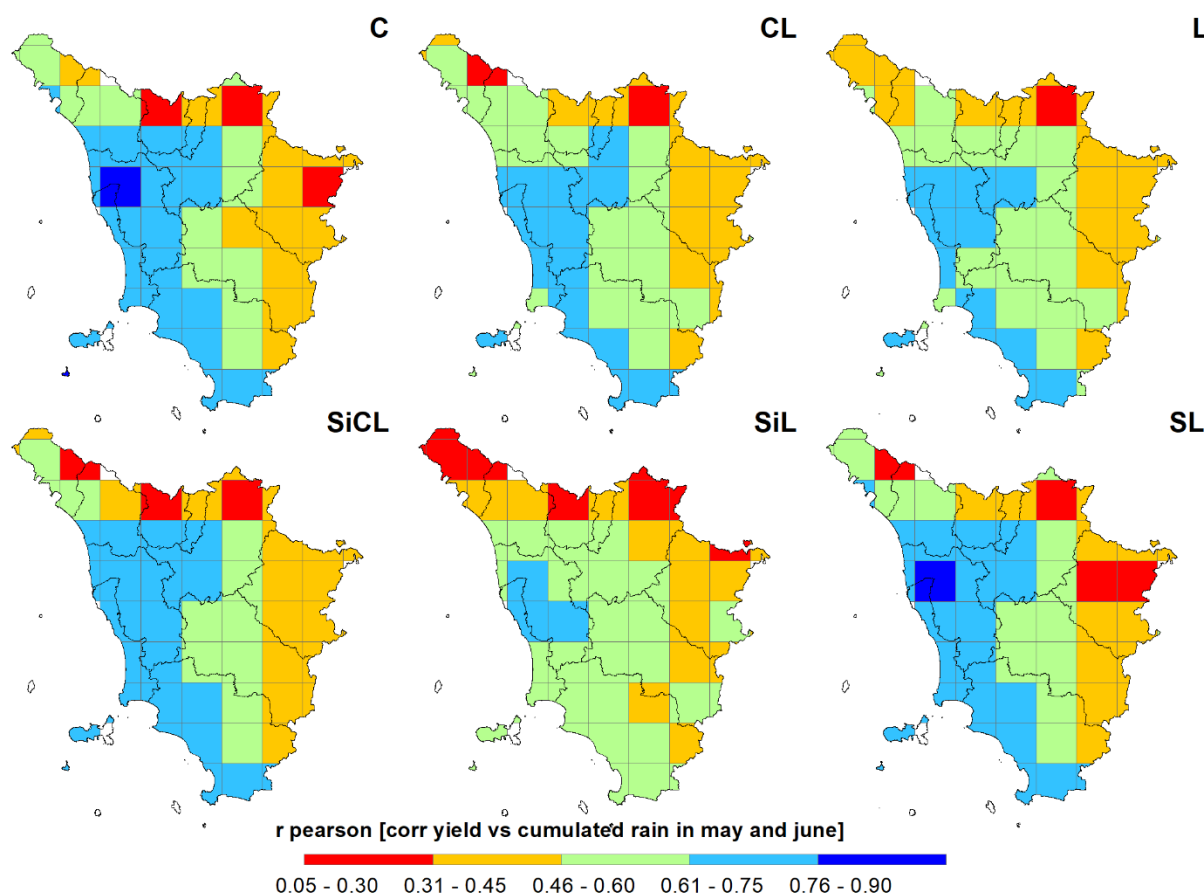


Figura 18: le gradazioni di colore delle mappe rappresentano il livello di correlazione (r di Pearson) tra le rese di girasole e le precipitazioni del periodo maggio-giugno in ogni cella della griglia climatica.

1.4 Conclusioni

In merito alle rese potenziali della coltura lo studio ci permette di concludere che:

1. è evidente un effetto geografico dal quale dipendono rese più basse nelle aree a sud della regione nelle province di Siena, Arezzo e Grosseto;
2. è evidente anche un effetto della tessitura dei suoli, per cui rese potenziali più elevate sono ottenibili in classi di suolo con capacità idrica più elevata $SiL > L > CL > SiCL > SL > C$;
3. su terreni franco-limosi le rese attese sono mediamente elevate in tutta la regione;
4. le aree agricole più vocate del punto di vista delle rese attese sono quelle che si sviluppano nelle bassa e media val d'Arno, dove i medi valori stimati sono compresi tra 3 e 5 t di granella secca ad ettaro;
5. la disponibilità di pioggia nel periodo maggio-giugno è il principale fattore limitante in quelle aree dove le rese risultano più basse;
6. in contesti poco piovosi le produzioni su terreni con scarsa capacità idrica sono ancora più penalizzati;
7. la stabilità nel tempo delle rese è fortemente influenzata dall'interazione tra fattore geografico (clima) e fattore suolo, infatti su terreni con scarsa capacità idrica la variazione dei regimi pluviometrici di maggio-giugno condiziona fortemente la variabilità tempore delle rese, mentre in condizioni di suolo con elevata capacità idrica sembra prevalere un effetto legato a l'andamento delle temperature sulla produzione della coltura.

1.5 Bibliografia

Allen R.G., Pereira L.S., Res D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56

Agricultural Production Systems sIMulator (APSIM). www.apsim.info

Dalglish N., Hochman Z., Huth N. and Holzworth D. 2016. A PROTOCOL FOR THE DEVELOPMENT OF APSOIL PARAMETER VALUES FOR USE IN APSIM. CSIRO Agriculture and Food, Version 4 2016.

<https://www.apsim.info/wp-content/uploads/2019/10/Parameters-for-soil-water-Ver24.pdf>

Miguez F., 2021 - Inspect, Read, Edit and Run 'APSIM' ``Next Generation" and 'APSIM' Classic – ‘apsimx’ R package. <https://cran.r-project.org/web/packages/apsimx/apsimx.pdf>

Nassi o Di Nasso N., Bosco S., Di Bene C., Coli A., Mazzoncini M., Bonari E. 2011. Energy efficiency in a long-term Mediterranean cropping system with different management intensities. Energy 36 (2011) 1924-1930

Saxton K.E., Rawls W. Soil Water Characteristics – Hydraulic Properties Calculator.

<https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>

Thornthwaite C. W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94

2 Analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del lino (*Linum usitatissimum* L.): risultati preliminari sulle 5 cultivar del progetto SIC-OLEAT

2.1 Obiettivi

Il presente studio ha avuto come obiettivo generale l'analisi della vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione di 5 cultivar di lino da olio (*Linum usitatissimum* L.) coltivate nelle prove sperimentali condotte a San Piero a Grado (Pisa) e ad Alberese (Grosseto) durante il corso del progetto SIC-OLEAT. Pertanto ai fini del presente studio sono stati utilizzati i risultati delle prove sperimentali condotte tra il 2019 e il 2020 nei due siti sperimentali e relativi allo sviluppo fenologico delle 5 varietà in relazione ad epoche di semina variabili.

La coltura, che rappresenta una possibile alternativa negli avvicendamenti toscani come rinnovo invernale, presenta, da bibliografia, una discreta adattabilità ad epoche di semina differenti che possono variare dall'autunno alla primavera, data la sua capacità di resistere ai rigori invernali fino a tollerare temperatura di alcuni gradi inferiori allo 0, anche in stadi giovanili dello sviluppo vegetativo.

Tuttavia, la sua risposta produttiva può essere negativamente influenzata da ritorni di freddo durante le fasi di fioritura, come anche da temperature alte e condizioni siccitose dalla fase di inizio fioritura alle successive fasi di piena fioritura e sviluppo dei semi. In particolare, alte temperature e siccità possono incidere negativamente sia sulla fertilità dei fiori sia sullo sviluppo delle capsule e sul riempimento dei semi, con effetti deprimenti della produzione, anche da un punto di vista quantitativo (Cross et al., 2003).

La regione Toscana, caratterizzata da un clima tipicamente mediterraneo, è soggetta ad una accentuata variabilità inter annuale delle condizioni meteorologiche. Per tanto i ritorni di gelo nella stagione primaverile sono altrettanto frequenti quanto il verificarsi di picchi di temperature molto elevate e periodi di siccità prolungati nel corso della tarda primavera, che condizionano in maniera significativa le produzioni di altre colture di pieno campo a ciclo invernale-estivo o primaverile-estivo.

La geografia della regione inoltre è responsabile anche di una evidente variabilità spaziale delle condizioni meteorologiche. Da nord a sud, dalla costa all'interno, la distribuzione delle precipitazioni e l'evapotraspirazione delle colture sono fortemente influenzate dall'orografia del territorio, così come temperature minime e massime sono influenzate, non solo dalla latitudine, ma anche dalla quota e dalla distanza dal mare. Non solo, i seminativi del territorio toscano presentano gradienti di tessitura anch'essi molto variabili che determinano, a parità delle condizioni meteorologiche, risposte delle colture molto variabili per via dell'effetto che diverse proprietà idrologiche esprimono sul sistema suolo-acqua-coltura.

Il diverso andamento delle temperature inoltre influenza in lo sviluppo delle colture in modo diverso da anno ad anno e da territorio a territorio. Pertanto, a parità delle tecniche di coltivazioni e delle epoche di intervento, una stessa cultivar presenta ritmi di crescita differenti che la possono esporre maggiormente o le consente di sfuggire a condizioni agrometeorologiche avverse.

In base a quanto premesso, la vocazionalità del territorio è stata valutata considerando il diverso rischio di esposizione delle 5 cultivar di lino in funzione della variabilità spazio-temporale delle condizioni meteorologiche di lungo periodo, del tipo di suolo e dell'epoca di semina a:

- 1 Stress termico da freddo durante le fasi di inizio e piena fioritura
- 2 Stress termico da caldo durante le fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione
- 3 Stress da deficit idrico durante le fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione

2.2 Materiali e metodi

2.2.1 Approccio generale

Per valutare la vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del lino, non disponendo di un modello di simulazione della coltura sufficientemente valido né di dati adeguati per un suo sviluppo ed la sua validazione, è stato adottato un approccio modellistico semplificato, volto a stimare quantitativamente i livelli di rischio da stress associati alla coltura e non gli effetti degli stessi sulla produzione.

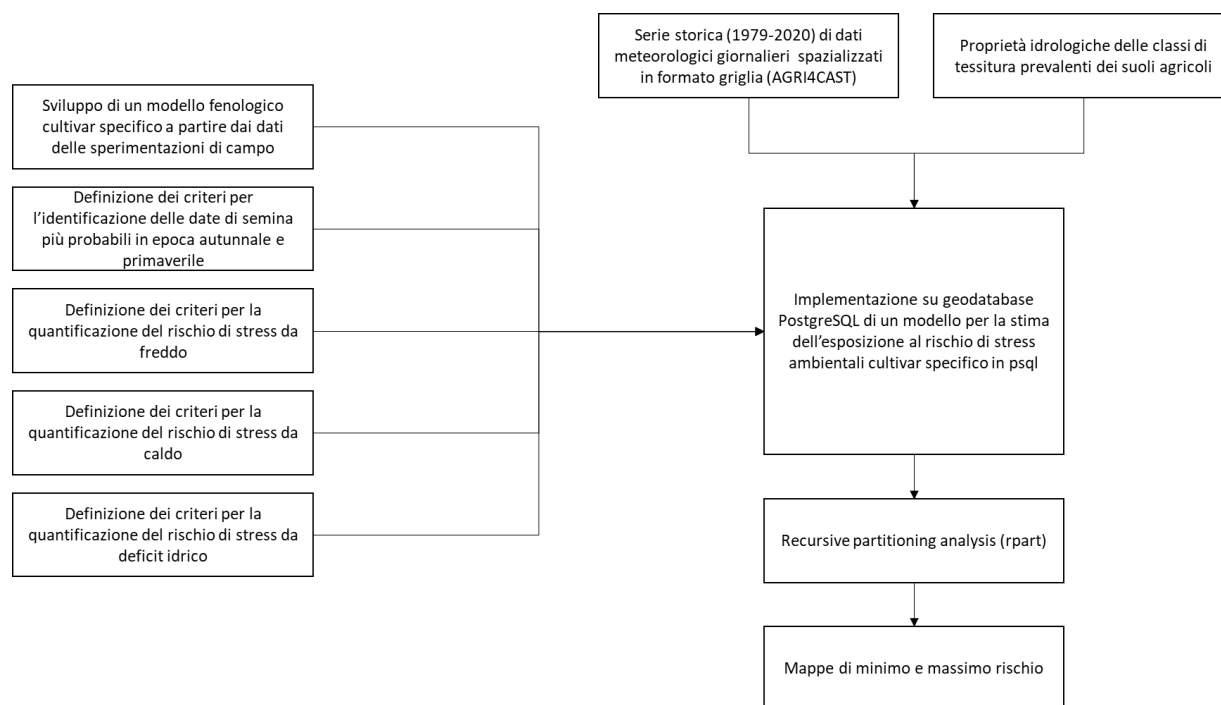


Figura 19: rappresentazione schematica per fasi della metodologia di lavoro applicata.

A tal fine è stato sviluppato in linguaggio *plpgsql* un modello per la stima dell'esposizione ai rischi associati alle condizioni ambientali in grado di effettuare simulazioni simultanee su più ambiti geografici e su più cultivar. Il modello implementato si basa un modulo cultivar specifico della fenologia e su altri dedicati al computo dei livelli di rischio da stress associati al freddo, al caldo e alla carenza idrica nelle fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione (Figura 19).

Gli input del modello sono:

- 1 dati meteorologici giornalieri di temperatura minima e massima, di pioggia ed evapotraspirazione di riferimento di una serie climatica di 42 anni (dal 1979 al 2020) fornita dal servizio AGRI4CAST del Joint Research Center di Ispra dell'Unione Europea, in formato spazializzato a griglia, con celle di 25 km di lato.
- 2 dati delle costanti idrologiche di sei classi di suolo prevalenti stimati tramite il modello di pedotrasperimento Soil Water Characteristics (Saxthon and Rawls) dai valori di tessitura e di sostanza organica della mappa pedologica LAMMA-CRES
- 3 dati di accumulo dei gradi giorno e di fenologia misurati nelle prove di campo condotte nell'ambito del progetto su 5 cultivar di lino coltivate in due areali toscani

Tramite il modello oltre l'effetto del clima e del suolo sull'esposizione al rischio da stress sulle 5 cultivar è stato valutato anche l'effetto dell'epoca di semina, autunnale o primaverile.

Quindi considerate le 2 epoche di semina, le 5 cultivar, le 6 classi di suolo prevalente, individuate come descritto nel capitolo relativo al girasole, le 66 celle che compongono la griglia climatica e i 42 anni di dati disponibili, sono state prodotte 166.320 simulazioni a scala giornaliera. I risultati ottenuti sono stati analizzati attraverso Recursive Partitioning Analysis (package 'rpart' di R) per discriminare l'effetto legato ai fattori suolo, cultivar ed epoca di semina sull'esposizione al rischio di stress della coltura nelle due fasi di sviluppo indicate.

L'effetto geografico è stato rappresentato attraverso mappe del livello di rischio realizzate attraverso QGIS 3.16.

2.2.3 Sviluppo di un modello fenologico cultivar specifico a partire dalle osservazioni delle prove di campo

Le prove di campo condotte nel 2019 e 2020 a San Piero a Grado ed Alberese hanno permesso di misurare i Gradi Giorni (GDD, Growing Degree Days) accumulati da 5 cultivar di lino al raggiungimento dei diversi stadi di sviluppo.

Le varietà valutate sono: Galaad, Libra, Sideral, Szafir e Kaolin. Gli stadi di sviluppo considerati sono: semina, emergenza, inizio levata, inizio fioritura, piena fioritura e maturazione del seme. I GDD, cioè i gradi di temperatura giornalieri utili allo sviluppo (HU, Heat Units), accumulati tra una fase e l'altra sono stati calcolati a partire dalla temperatura media giornaliera (Tmed) e considerando una temperatura base (Tbase) di 5 °C.

$$GDD = \sum_{Stage\ start}^{Stage\ end} HU$$

Dove

if $T_{med} > 5\text{ °C}$

then $HU = T_{med} - T_{base}$

else $HU = 0\text{ °C}$

Dato che il momento in cui viene condotta l'osservazione in campo difficilmente coincide con il reale giorno di raggiungimento di un determinato stadio fenologico e per via di un probabile effetto di fotoperiodo che non è stato valutato nella ricerca, al fine di ridurre l'errore sperimentale, nello sviluppo del modello fenologico, per ogni stadio sono stati determinati i valori soglia di GDD_{std} in base ad una procedura di standardizzazione basata sulla regressione tra GDD e giorni delle osservazioni in campo (Figura 20).

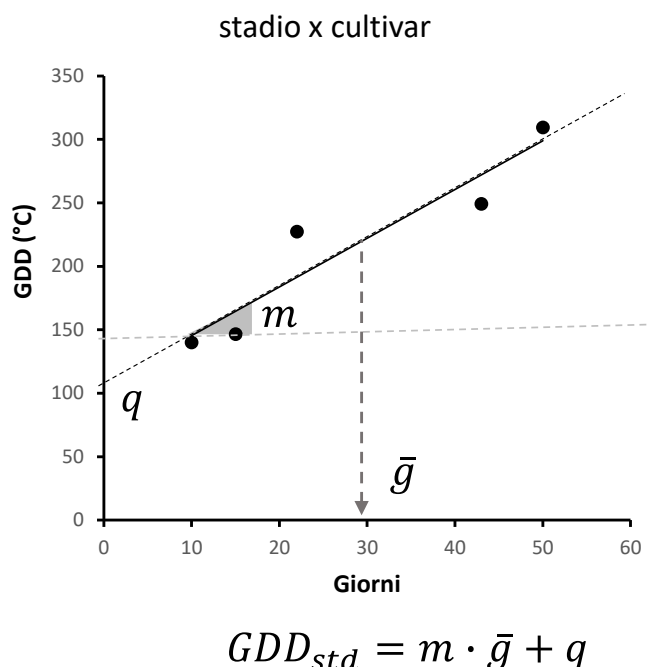


Figura 20: rappresentazione grafica della procedura per il calcolo dei Gradi Giorno Standard (GDD_{std}).

Per ogni stadio e per ogni cultivar è stata parametrizzata la retta di regressioni tra GDD calcolati e giorno dell'osservazione dello stadio ed infine il calcolo dei GDD standard per fase è stato effettuato moltiplicando la media, tra le diverse prove condotte nei due anni, dei giorni in cui è stato osservato il raggiungimento dello stadio per la pendenza della retta di regressione e sommando poi il prodotto al valore dell'intercetta sull'asse delle y.

I valori dei GDD_{std} implementati nel modello fenologico sono riportati in Tabella 9.

Tabella 9: per ogni varietà e per ogni stadio fenologico sono riportate: 1) le rette di regressione parametrizzate in funzione dei GDD e dei giorni osservati nell'ambito delle prove sperimentali del progetto SIC-OLEAT; 2) il coefficiente di determinazione delle regressioni (r^2); 3) la durata standard dello stadio fenologico calcolata come media dei giorni in cui è stata effettuata l'osservazione tra le diverse prove; 4) i Gradi Giorno Standard (GDD_{std}) calcolati tramite i parametri delle rette di regressione e con x =Durata standard.

Cultivar	Stadio	N	Retta di regressione	r^2	Durata standard	GDD _{std} (°C)
Galaad	Semina-Emergenza	1	$y = 3.13x + 78.4$	0.89	15	125
	Emergenza-Inizio levata	2	$y = 2.6x + 88.8$	0.98	45	205
	Inizio levata - Inizio fioritura	3	$y = 3.72x + 97.5$	0.88	35	226
	Inizio fioritura - Piena fioritura	4	$y = 8.86x + 35.7$	0.81	7	98
	Piena fioritura – maturità	5	$y = 6.6x + 411$	0.93	45	708
	Totale					1362
Libra	Semina-Emergenza	1	$y = 2.8x + 96$	0.79	15	138
	Emergenza-Inizio levata	2	$y = 3.3x + 70.7$	0.99	45	219
	Inizio levata - Inizio fioritura	3	$y = 3.33x + 106$	0.71	35	220
	Inizio fioritura - Piena fioritura	4	$y = 11.8x + 12.3$	0.97	7	95
	Piena fioritura – maturità	5	$y = 6.5x + 387$	0.92	45	680
	Totale					1352
Sideral	Semina-Emergenza	1	$y = 3.02x + 81.5$	0.92	15	127
	Emergenza-Inizio levata	2	$y = 3.6x + 72.3$	0.99	45	234
	Inizio levata - Inizio fioritura	3	$y = 3.84x + 107$	0.89	35	241
	Inizio fioritura - Piena fioritura	4	$y = 14.2x + 10.5$	0.92	7	110
	Piena fioritura – maturità	5	$y = 4x + 482$	0.69	45	662
	Totale					1374
Szafir	Semina-Emergenza	1	$y = 3.02x + 81.5$	0.92	15	127
	Emergenza-Inizio levata	2	$y = 3.14x + 76.3$	0.98	45	217
	Inizio levata - Inizio fioritura	3	$y = 3.57x + 115$	0.9	35	240
	Inizio fioritura - Piena fioritura	4	$y = 13.8x + 3$	0.95	7	100
	Piena fioritura – maturità	5	$y = 6.4x + 429$	0.96	45	716
	Totale					1400
Kaolin	Semina-Emergenza	1	$y = 2.8x + 93.4$	0.96	15	135
	Emergenza-Inizio levata	2	$y = 3.44x + 64$	0.99	45	219
	Inizio levata - Inizio fioritura	3	$y = 3.36x + 95.6$	0.99	35	213
	Inizio fioritura - Piena fioritura	4	$y = 8x + 33$	0.99	7	90
	Piena fioritura – maturità	5	$y = 6.65x + 412$	0.87	45	709
	Totale					1366

Il modello fenologico implementato in plpgsql nel geodatabase, per il calcolo dei GDD ha utilizzato anche una temperatura media giornaliera di cut-off considerando una soglia critica pari a 30 °C (Tcrit).

if $5 < T_{med} \leq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
then $HU = T_{med} - T_{base}$
else if $T_{base} > 30^{\circ}\text{C}$
then $HU = T_{crit} - T_{base}$
else $HU = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Infine, in base alla bibliografia scientifica, che, seppur non numerosa, riporta comunque effetti di fotosensibilità della specie, variabili da cultivar a cultivar (Brutch et al., 2020) è stato incluso nel modello anche un fattore di controllo (P_f) che tiene conto del fotoperiodo.

Quindi negli stadi compresi tra il completamento dell'emergenza e la piena fioritura (2-4) il calcolo dei GDD è stato effettuato secondo la seguente formula:

$$GDD = \sum_{Stage\ start}^{Stage\ end} HU \cdot P_f$$

con

$$P_f = \begin{cases} \frac{P_i - P_b}{P_{opt} - P_b}, & \text{for } P_b \leq P_i \leq P_{opt} \\ 1, & \text{for } P_i > P_{opt} \\ 0, & \text{for } P_i < P_b \end{cases}$$

Dove P_i è il fotoperiodo giornaliero, P_b è il fotoperiodo base, ovvero le ore di luce giornaliere al di sotto delle quali specie a giorno lungo come il lino non sviluppano e P_{opt} è il fotoperiodo ottimale, ovvero le ore di luce al di sopra delle quali il fotoperiodo non causa ritardi nello sviluppo della coltura (Ceglar et al., 2019). In questo studio sono stati considerati $P_b = 8 \text{ ore giorno}^{-1}$ e $P_{opt} = 12 \text{ ore giorno}^{-1}$ (Brutch et al., 2020).

2.2.4 Stima delle date di semina più probabili per epoche autunnali e primaverili

Tra gli obiettivi dello studio vi era anche quello di valutare il rischio di stress sulle diverse varietà in funzione dell'epoca di semina. Per tanto sono state considerate due epoche di semina: autunnale e primaverile.

Al fine di non definire in maniera arbitraria la data di semina da cui far partire il computo delle sommatorie termiche per il calcolo dei GDD, sono state implementate nel modello alcune regole per la determinazione della data di semina in base criteri che tenessero conto delle condizioni meteorologiche proprie di ogni anno in ogni ambiente.

La data di semina ideale in ogni cella della griglia climatica AGRI4CAST è stata calcolata a partire dai dati meteo e considerando i GDD della coltura per le fasi semina-emergenza al fine di considerare la variabilità delle condizioni climatiche nel territorio utilizzando due criteri:

- 1) Completamento dell'emergenza in 15 giorni dalla data di semina
- 2)
 - a) Possibilità di evitare l'occorrenza di gelate tardive nella fase di sviluppo compresa fra la semina e l'emergenza nel caso di semine primaverili
 - b) Possibilità di evitare l'occorrenza delle prime gelate invernali nella fase di sviluppo compresa fra la semina e l'emergenza nel caso di semine autunnali

Il criterio 1 consente di stimare la data di semina in condizioni di temperatura media giornaliera tali da favorire un completamento dell'emergenza in un periodo di tempo contenuto, tale da ridurre i rischi di competizione eccessiva delle infestanti e di predazione dei semi da parte di insetti ed uccelli. Quindi il criterio 1 permette di calcolare la data di semina, a partire dal primo giorno dell'anno o dal primo giorno dalla fine dell'estate (21 settembre), nella prima data utile per raggiungere una soglia di GDD (con $T_{base} = 5\text{ °C}$) necessari a completare la fase di emergenza in 15 giorni per ogni cultivar.

La data di semina viene ulteriormente corretta applicando il criterio 2, che verifica che, una volta stimata la data di semina in base al criterio 1, non vi sia probabilità che si verifichino giorni di gelo ($T_{min} < 0\text{ °C}$) nella fase successiva alla semina fino al completamento dell'emergenza.

La procedura è stata sviluppata in linguaggio plpgsql ed implementata sul geodatabase del progetto gestito tramite PostgreSQL 9.5.

2.2.5 Definizione e stima dei rischi di stress

Come premesso, l'analisi di vocazionalità di base sia sullo sviluppo fenologico che sul rischio di esposizione a stress che il diverso ritmo di crescita determina sulle 5 cultivar di lino.

In questo studio sono stati considerati tre possibili tipi di stress:

- 1 da freddo durante le fasi di inizio e piena fioritura
- 2 da caldo durante le fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione
- 3 da deficit idrico durante le fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione

2.2.5.1 Stress da freddo

Il lino è una specie microterma, e nel corso dello sviluppo vegetativo può sopportare anche temperature fino a -6/7 °C. Tuttavia in alcuni stadi del suo sviluppo le basse temperature possono incidere negativamente sulla sua produttività. Condizioni di gelo, con temperature minime inferiori a 0 °C, nella fase di emergenza possono incidere negativamente sulla densità di popolazione o ritardarne lo sviluppo, mentre nei primissimi stadi di sviluppo vegetativo possono indurre un'eccessiva ramificazione, carattere poco desiderato solo nelle varietà da fibra (Bacci et al., 2007), ma non in quelle da seme. Nella fase di fioritura il freddo può causare aborti florali, riduzione della fertilità e conseguente riduzione della produzione.

In questo studio il rischio di stress da freddo è stato quantificato come numero di giorni con $T_{min} < 0$ nelle fasi di inizio fioritura e nelle fasi di piena fioritura.

2.2.5.2 Stress da caldo

Cross et al. (2003), come altri autori, hanno osservato che lo stress da caldo nelle fasi di inizio fioritura e piena fioritura può indurre risposte da parte della pianta che si ripercuotono negativamente sulla produzione della coltura. Eccessi di caldo possono determinare il rallentamento del processo di fioritura e una più difficile conversione dei fiori in capsule, dovuta alla produzione di aborti embrionali.

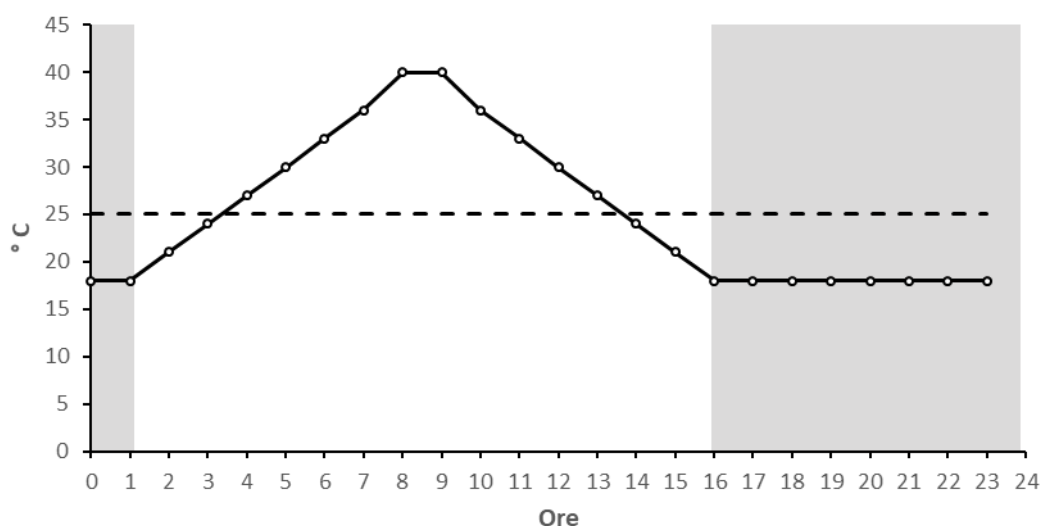


Figura 21: riproduzione grafica dell'esperimento di Cross et al. (2003) per la quantificazione degli effetti di stress da caldo su lino nelle fasi di fioritura. La linea continua rappresenta la variazione indotta di temperatura; la linea tratteggiata indica la temperatura media delle 24 ore (25.08 °C); l'area grigia evidenzia le ore di buio.

Tali effetti sono stati dimostrati tramite esperimenti in ambiente controllato, tali per cui le condizioni di stress termico erano indotte con il seguente trattamento: 16 ore di luce con la temperatura in aumento da 18 °C a 40 °C, con un tasso di incremento pari 3 °C ora⁻¹ per un periodo di 7 ore; dopo 2 ore di mantenimento della temperatura a 40 °C, essa, nelle successive 7 ore, veniva riportata a 18 °C, sempre in maniera graduale. Nelle ore di buio era mantenuta invece una temperatura di 18 °C. Non disponendo di un dataset di temperature orarie, ma solo di temperature massime, minime e medie giornaliere, al fine di riprodurre una condizione di rischio di stress da caldo a scala giornaliera, è stata considerata una soglia critica una temperatura media giornaliera di 25.08 °C, corrispondente alla media giornaliera dell'esperimento di Cross et al. (Figura 21). Per cui il rischio da stress da caldo nel nostro studio è stato calcolato come il numero di giorni con $T_{med} > 25$ °C nelle fasi di fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione.

2.2.5.3 Stress idrico

Il rischio di stress idrico nelle fasi di inizio fioritura e dalla piena fioritura alla maturazione è stato determinato come la media dell'indici di umidità specifico I_{ms} , calcolato a partire dall'indice di umidità globale I_m proposto da Thornthwaite (1948) e quindi rielaborato secondo la seguente formula:

$$I_{ms} = awc_s \cdot 0.5 + \frac{\left[\sum_{j=1}^{j=n} Pu_s - \sum_{j=1}^{j=n} (ET_0 \cdot K_c) \right]}{\sum_{j=1}^{j=n} (ET_0 \cdot K_c)}$$

L'indice così calcolato permette di calcolare il bilancio apparente tra evapotraspirazione e pioggia a partire dalla data di semina, $j=1$, fino al termine dello stadio di sviluppo di interesse, $j=n$, considerando condizioni specifiche relative alla coltura ed al tipo di suolo.

Infatti per tenere conto delle condizioni coltura specifiche, invece dell'evapotraspirazione potenziale di riferimento ET_0 è stata utilizzata l'evapotraspirazione potenziale della coltura calcolata tramite i K_c (coefficienti culturali) proprio del lino, riportati dalla FAO (Tabella 10).

Tabella 10: K_c FAO del lino per stadio di sviluppo

Stadio	K_c
<i>Semina-Emrgenza</i>	<i>0.7</i>
<i>Emergenza-Inizio levata</i>	<i>0.8</i>
<i>Inizio levata - Inizio fioritura</i>	<i>1.1</i>
<i>Inizio fioritura - Piena fioritura</i>	<i>0.7</i>
<i>Piena fioritura – maturità</i>	<i>0.2</i>

Al fine di considerare invece le condizioni specifiche di suolo è stata inclusa nell'equazione originale di Thornthwaite, la capacità di ritenzione dei suoli, definita come *available water capacity* (awc , mm/mm), in un orizzonte profondo 500 mm a partire dalla superficie, dove si sviluppa oltre l'80% della massa radicale della coltura, in modo da considerare il volume di acqua potenzialmente contenibile nello strato esplorato dalle radici nei diversi suoli.

Altra caratteristica specifica dei suoli è inclusa nella formula, è la capacità di infiltrazione dell'acqua piovana calcolata, calcolata come pioggia utile (P_u) tramite il metodo del *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN) elaborato dal USDA Natural Resources Conservation Service per la stima del runoff superficiale.

Per cui la pioggia utile giornaliera P_u di un suolo s è data dalle precipitazione giornaliere P meno il runoff (Q) stimato per un dato suolo considerando la massima capacità di ritenzione del suolo (S) dopo l'inizio del runoff e il livello iniziale di estrazione di acqua dal suolo (I_a).

$$P_{u_s} = P - Q_s$$

Dove

$$Q = \begin{cases} 0, for P \leq I_a \\ \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, for P > I_a \end{cases}$$

E

$$I_a = 0.2 \cdot S$$

$$S = \left(\frac{1000}{CN_s} - 10 \right)$$

Per cui le proprietà specifiche dei suoli s , considerate in questo studio, sono definite dal CN come riportate in Tabella 11.

Tabella 11: classi di suolo e loro caratteristiche idrologiche per il calcolo della disponibilità di acqua potenziale e della pioggia utile.

Classe di tessitura	Descrizione	wp	fc	awc	gruppo HSG	CN con copertura culturale	CN suolo nudo
C	Argilloso	0.334	0.449	0.115	D	87	94
CL	Franco argilloso	0.195	0.341	0.146	C	83	91
L	Franco	0.142	0.277	0.135	B	75	86
	Franco Limo						
SiCL	Argilloso	0.249	0.396	0.146	C	83	91
SiL	Franco Limoso	0.139	0.311	0.172	B	75	86
SL	Franco Sabbioso	0.105	0.216	0.111	A	63	77

2.3 Risultati

2.3.1 Fenologia della coltura

Il modello utilizzato per la definizione delle date di semina in base all'andamento delle temperature ha evidenziato che nel periodo autunnale la semina potrebbe avvenire tra la fine di settembre e la prima metà di ottobre nelle aree orientali della regione e prossimali ai rilievi alpini del nord ed appenninici (Figura 22).

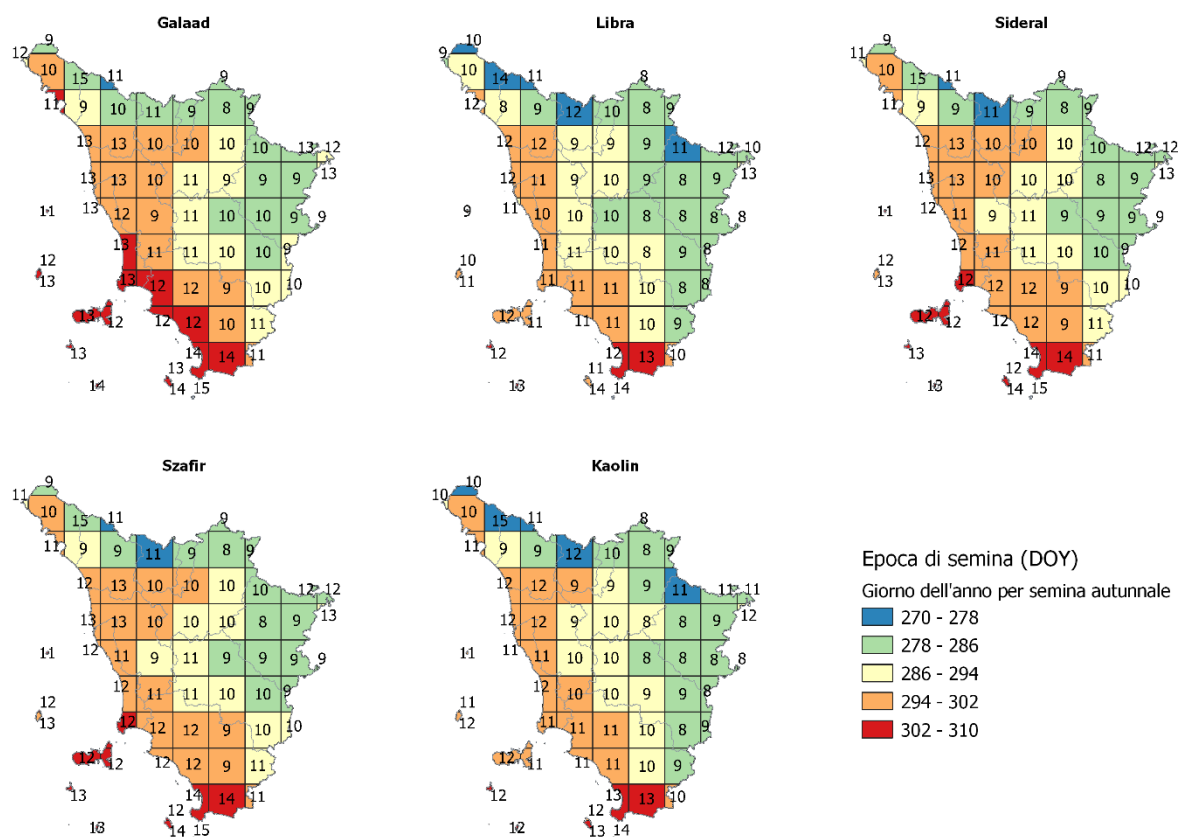


Figura 22: date di semina stimate ed espresse in giorni dell'anno (DOY) per la semina autunnale delle cinque cultivar di lino. L'etichetta riporta, in ogni cella della griglia climatica, la deviazione standard delle data stimata dal modello in base ai dati meteo di lungo periodo.

Al contrario nelle zone costiere e di pianura le condizioni climatiche più miti consentono di posticipare la semina all'ultima decade di ottobre e addirittura alla prima di novembre, a seconda delle cultivar, nelle aree più a sud della regione (Figura 22).

In maniera complementare, nel caso si optasse per la semina primaverile, le date entro le quali sarebbe opportuno completare le operazioni di semina, coincidono con la fine di marzo e la prima decade di aprile nelle aree costiere e pianeggianti della regione a cavallo tra le provincie di Firenze, Pisa, Prato e Pistoia. Mentre nelle aree prossime alla montagne e nel versante orientale della regione, le semine potrebbero concludersi nell'ultima decade di aprile e nella prima di maggio (Figura 23).

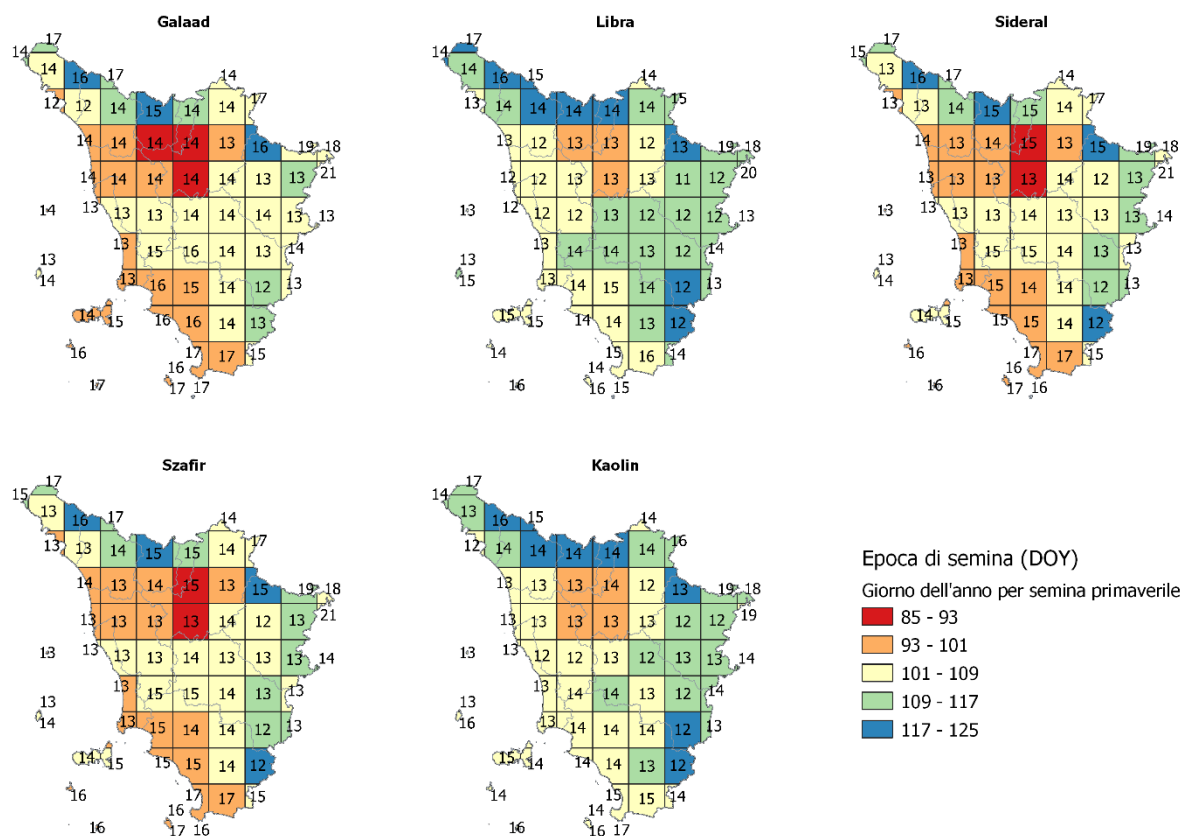


Figura 23: date di semina stimate ed espresse in giorni dell'anno (DOY) per la semina primaverile delle cinque cultivar di lino. L'etichetta riporta, in ogni cella della griglia climatica, la deviazione standard delle data stimate dal modello in base ai dati meteo di lungo periodo.

In merito al periodo di inizio fioritura la recursive partitioning analysis mostra una evidente differenza significativa determinata dalle due epoche di semina. Infatti a livello regionale, in seguito alla semina autunnale, l'inizio della fioritura tende a verificarsi con maggior probabilità alla fine di aprile, DOY=118, mentre con la semina primaverile essa tende a verificarsi a giugno inoltrato, DOY 159 (Figura 24).

Nonostante la recursive partitioning analysis non abbia evidenziato la cultivar come fattore discriminante per la data di inizio fioritura, riportiamo nel grafico di Figura 25, le differenze stimate per tra le diverse cultivar in funzione dell'epoca di semina. Nel caso della semina autunnale a livello regionale Kaolin e Libra sono le varietà che maggiormente tendono ad anticipare l'epoca di inizio fioritura, DOY 116 e 117 rispettivamente, contro DOY medio 123 stimato per la cultivar Sideral. Nel caso della semina primaverile, a livello medio regionale, le differenze tra le cultivar, in merito al giorno di inizio fioritura, si riducono ad appena 5 giorni, con il valore minimo predetto per Galaad (156 DOY) e il valore massimo predetto per Libra (161 DOY).

Albero di regressione per periodo di inizio fioritura

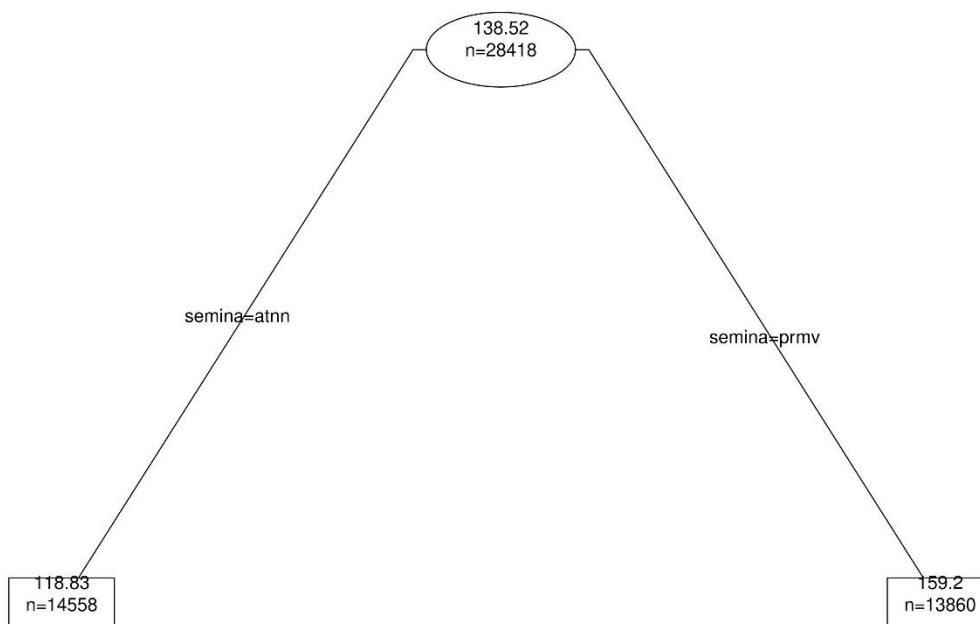


Figura 24: regression tree della data di inizio fioritura a livello regionale senza distinguere in base alle cultivar di lino. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio della data di inizio fioritura in DOY e il numero di casi su cui è calcolato (celle x anni x cultivar). Nelle frecce è riportato il fattore risultato discriminante, questo caso l'epoca di semina: autunnale (atnn) e primaverile (prmn).

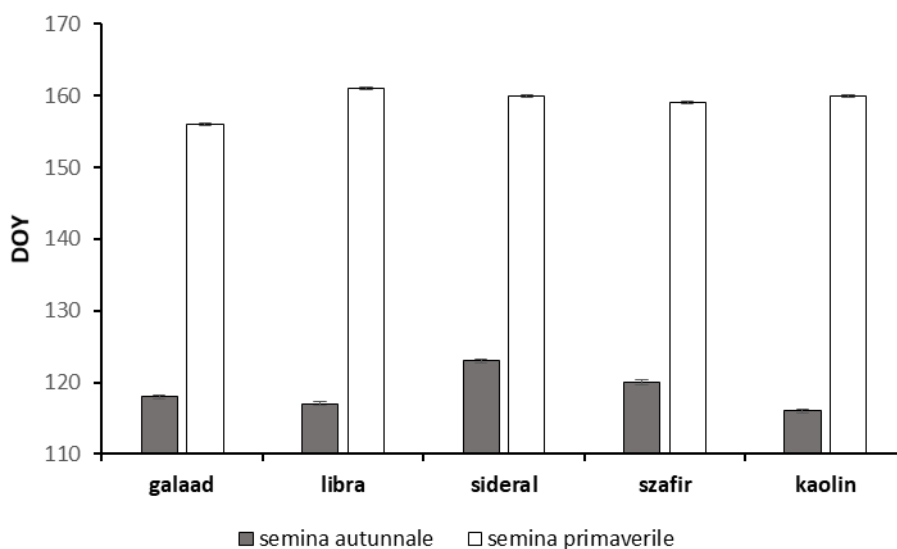


Figura 25: media regionale di lungo periodo del giorno dell'anno di inizio fioritura stimata dal modello per varietà in funzione dell'epoca di semina (autunnale o primaverile). Le barre verticali indicano l'errore standard.

Se si considera la variabilità spaziale (Figura 26), emerge che in quasi tutte le celle della griglia climatica, Kaolin, in condizioni di semina autunnale, si conferma la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di inizio fioritura, con valori compresi tra DOY 100 e 110 (seconda decade di aprile) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze. Nelle aree della Lunigiana e dell'appennino Tosco-Emiliano, Kaolin ritarda l'inizio della fioritura fino alla seconda decade di maggio (130-140 DOY). Sideral, la cultivar che tende a ritardare maggiormente l'inizio della fioritura a seguito della semina autunnale, a livello spaziale mostra un ritardo nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo di circa una decade (Figura 26).

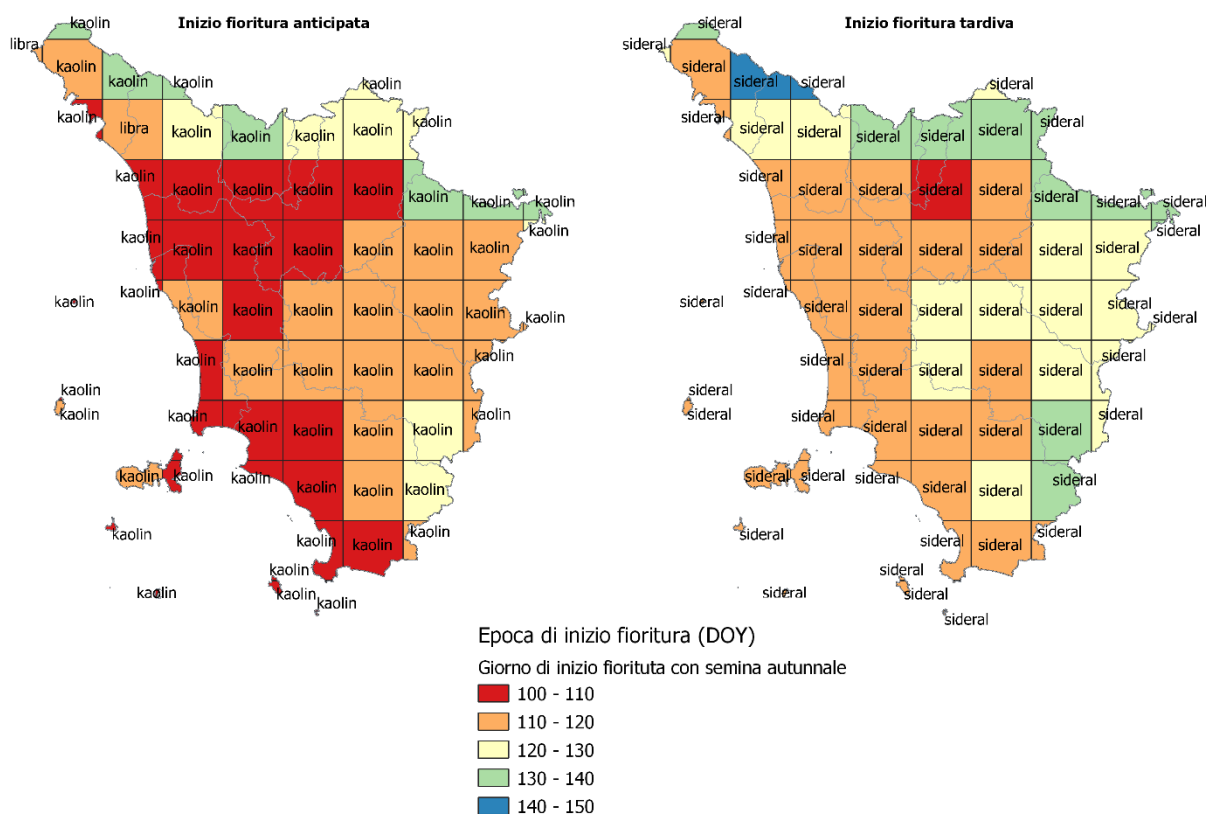


Figura 26: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di inizio fioritura a seguito di semina autunnale. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

Nelle mappe di Figura 27 si osserva che in quasi tutte le celle della griglia climatica, Galaad, in condizioni di semina primaverile, risulta la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di inizio fioritura, con valori compresi tra DOY 140 e 155 (terza decade di maggio – primi di giugno) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze. Nelle aree della Lunigiana, dell'appennino Tosco-Emiliano e del versante orientale dell'Amiata, Galaad ritarda l'inizio della fioritura a partire dalla metà di giugno fino alla fine del mese (165-180 DOY). Libra, la cultivar che tende a ritardare maggiormente l'inizio della fioritura a seguito della semina primaverile, a livello spaziale mostra un ritardo nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo di circa una decade, seconda decade di giugno, su tutta la parte costiera e nelle regioni pianeggianti della regione (Figura 27).

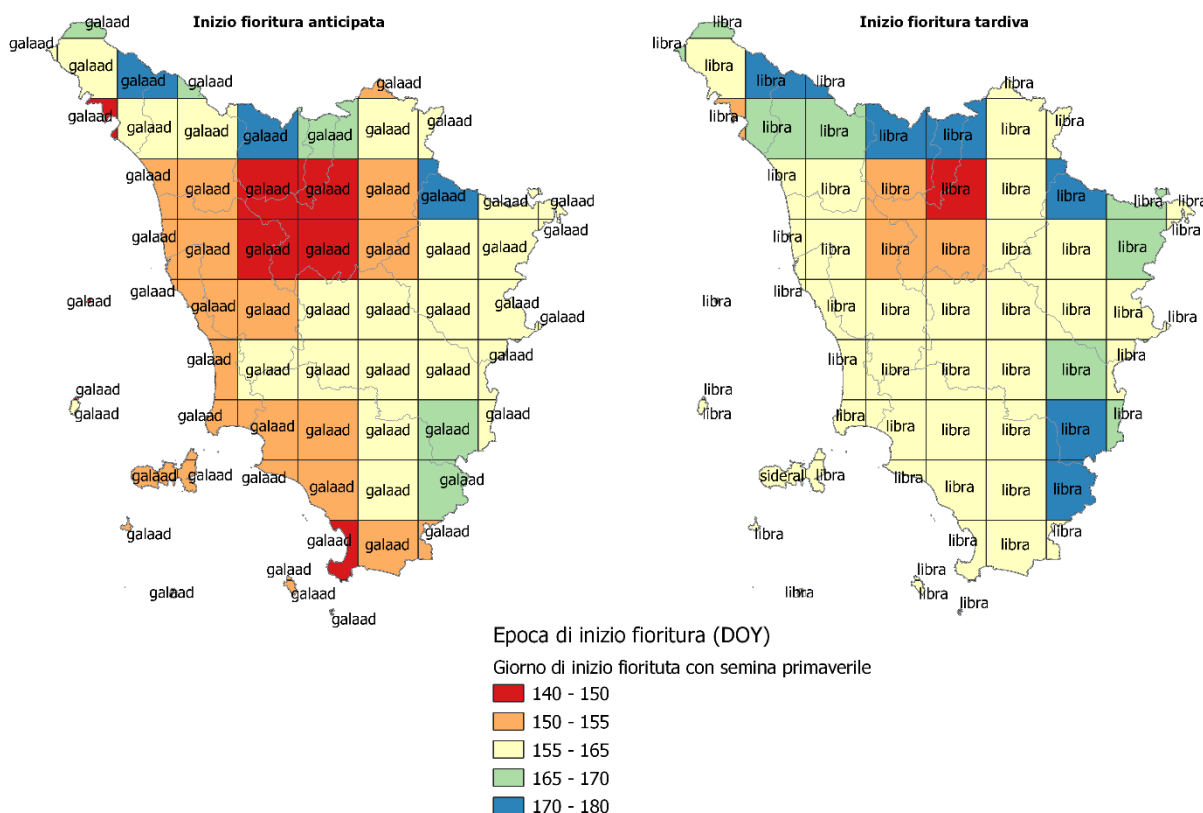


Figura 27: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di inizio fioritura a seguito di semina primaverile. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

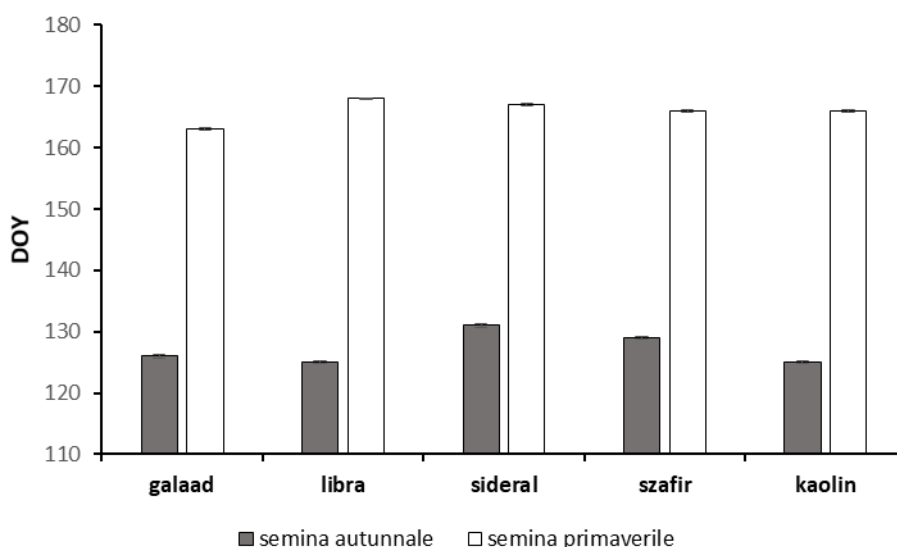


Figura 28: media regionale di lungo periodo del giorno di raggiungimento della piena fioritura stimato dal modello per varietà in funzione dell'epoca di semina (autunnale o primaverile). Le barre verticali indicano l'errore standard.

Il raggiungimento dello fase di piena fioritura (Figura 28) avviene mediamente 8-9 giorni dopo l'inizio della fioritura nel caso della semina autunnale, mentre nel caso della semina primaverile, esso avviene circa 6-7 giorni dopo. In entrambi i casi tale intervallo non sposta i rapporti tra le cultivar, per cui nel caso della semina autunnale Kaolin e Libra risultano ancora le due in anticipo sulle altre (125 DOY) e Sideral si conferma la più tardiva (131 DOY). Nella caso della semina primaverile Galaad raggiunge la piena fioritura in anticipo (163 DOY) rispetto alle altre cultivar, mentre Libra risulta ancora la più tardiva (168 DOY).

Se si considera la variabilità spaziale (Figura 29), emerge che in quasi tutte le celle della griglia climatica, Kaolin, in condizioni di semina autunnale si conferma la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di piena fioritura, con valori compresi tra DOY 110 e 125 (ultima decade di aprile - primi di maggio) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze, dove la piena fioritura può anticipare fino alla metà di aprile. Nelle aree della Lunigiana e dell'appennino Tosco-Emiliano, Kaolin ritarda l'inizio della fioritura fino all'ultima decade di maggio (125-145 DOY). Sideral, la cultivar che tende a ritardare maggiormente la piena fioritura in condizioni di semina autunnale, a livello spaziale mostra un ritardo nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo fino ad una decade, soprattutto nelle aree lontane dalla costa (Figura 29).

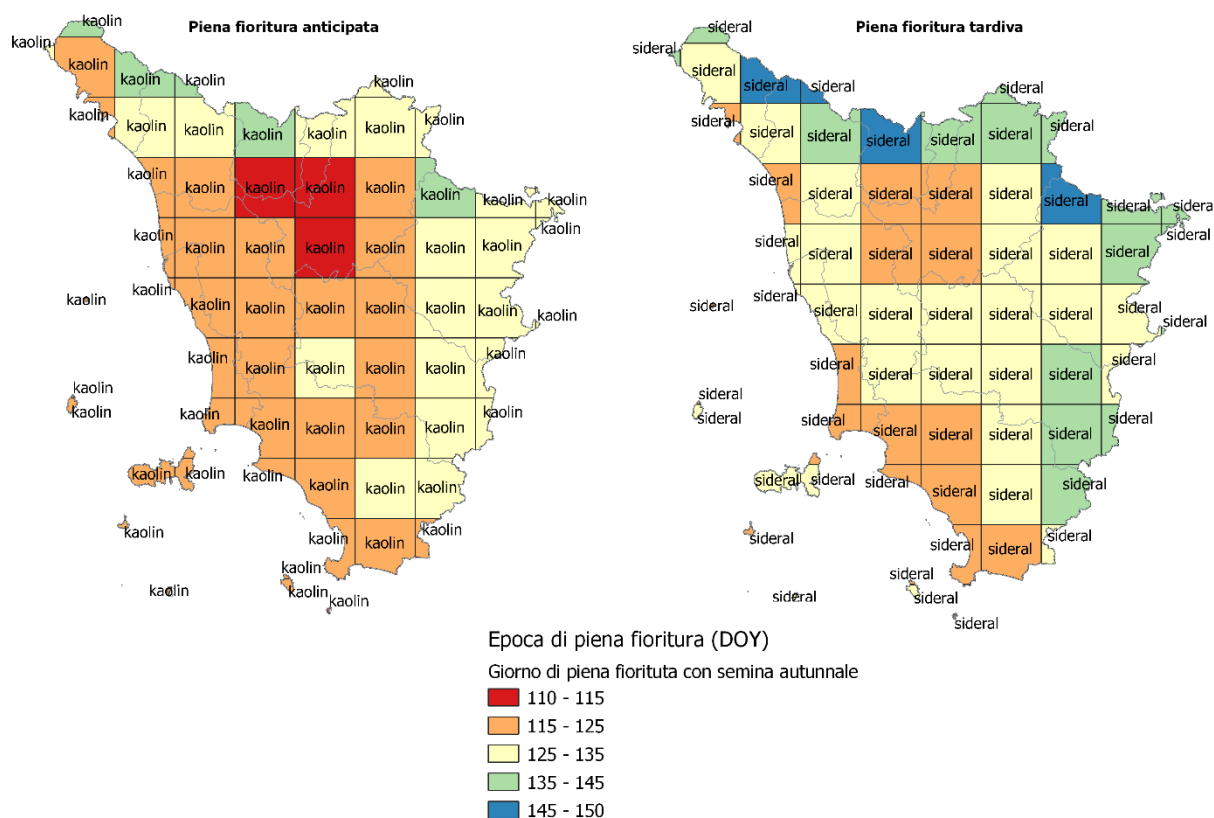


Figura 29: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di piena fioritura a seguito di semina autunnale. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

Nelle mappe di Figura 30 si osserva che in quasi tutte le celle della griglia climatica, Galaad, in condizioni di semina primaverile risulta la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di piena fioritura, con valori compresi tra DOY 145 e 160 (fine di maggio – prima decade di giugno) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze, dove, come nel caso della semina autunnale la fioritura tende ad avvenire con maggiore anticipo rispetto al resto della regione. Nelle aree della Lunigiana, dell'appennino Tosco-Emiliano e del versante orientale dell'Amiata, Galaad ritarda la piena fioritura a partire dall'ultima decade di giugno fino ai primi di luglio (170-185 DOY). Libra, la cultivar che tende a ritardare maggiormente la piena fioritura a seguito della semina primaverile, a livello spaziale mostra un ritardo nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo di circa una decade, dalla seconda decade di giugno a fine giugno, su tutta la parte costiera e nelle regioni pianeggianti della regione (Figura 30). Le differenze tra le varietà sono maggiori nelle aree più fredde e lontane dalla costa.

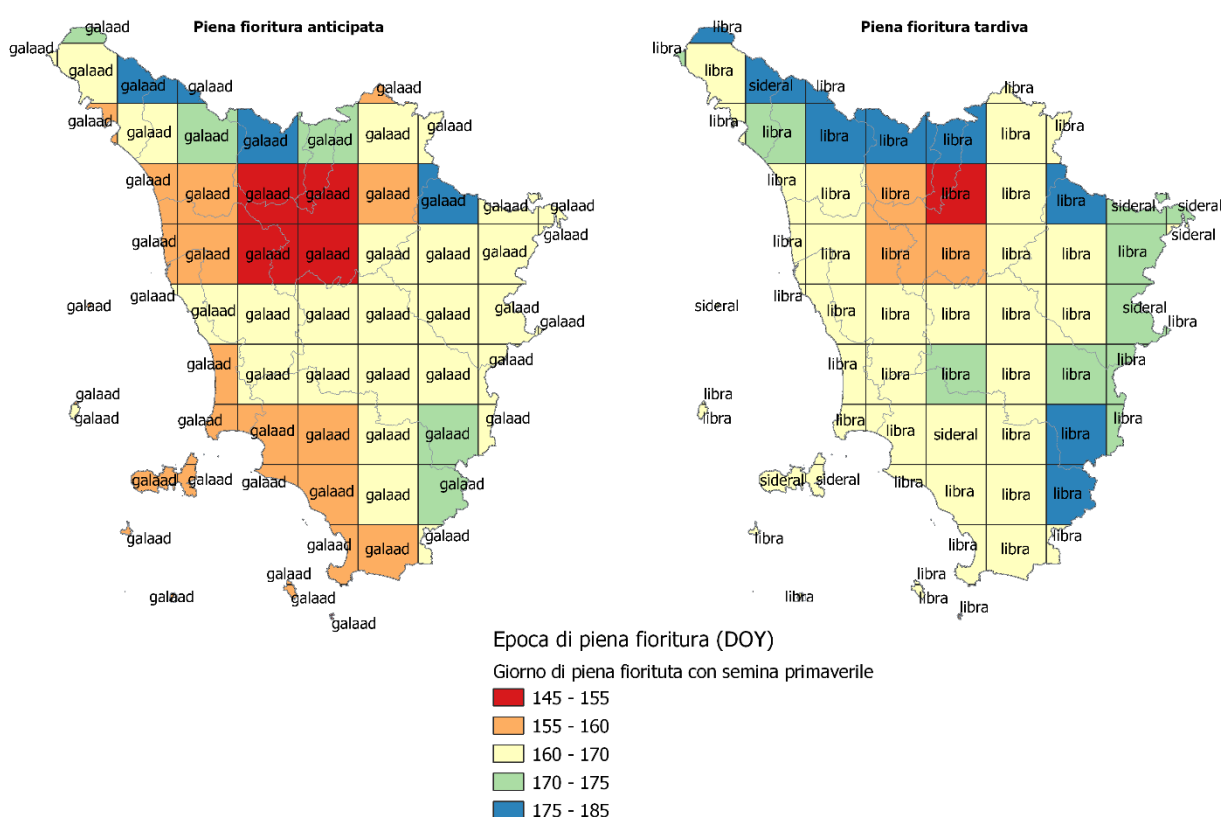


Figura 30: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di piena fioritura a seguito di semina primaverile. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

Il raggiungimento dello fase di maturazione del seme (Figura 31) avviene mediamente 35 giorni dopo la piena fioritura nel caso della semina autunnale, mentre nel caso della semina primaverile, esso avviene circa 40 giorni dopo. Nel caso della semina autunnale è Libra la cultivar in anticipo sulle altre (160 DOY), mentre Szafir risulta la più tardiva (166 DOY).

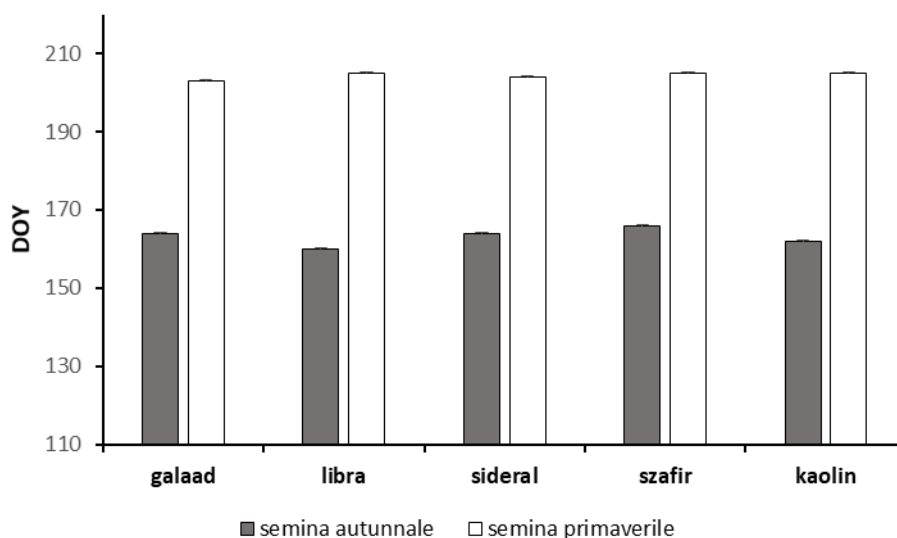


Figura 31: media regionale di lungo periodo del giorno di raggiungimento della piena maturità stimato dal modello per varietà in funzione dell'epoca di semina (autunnale o primaverile). Le barre verticali indicano l'errore standard.

Nella caso della semina primaverile (Figura 31), Galaad raggiunge la piena fioritura in anticipo (203 DOY) rispetto alle altre cultivar, mentre Libra, Szafir e Kaolin risultano le più tardive (205 DOY). Nel caso della semina primaverile la stima dell'epoca di maturazione mostra un intervallo di appena due giorni tra varietà "precoci" e "tardive". Questa differenza minima può essere dipesa dal fatto che in questo studi viene indicata come epoca di maturazione la fase che nelle prove di campo è coincisa con le operazioni di raccolta, non necessariamente legata all'effettivo raggiungimento dello stadio di maturazione fisiologica della coltura.

Se si considera la variabilità spaziale (Figura 32), emerge che in tutte le celle della griglia climatica, Libra, in condizioni di semina autunnale si conferma la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di maturazione, con valori compresi tra DOY 140 e 150 (ultima decade di maggio - primi di giugno) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze, dove la maturazione può avvenire già entro la fine di maggio. Nelle aree della Lunigiana e dell'appennino Tosco-Emiliano, Libra ritarda la maturazione a partire dall'ultima decade di giugno alla prima di luglio (170-190 DOY). Szafir, la cultivar che tende a ritardare maggiormente la maturazione in condizioni di semina autunnale, a livello spaziale mostra un ritardo nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo fino ad una decade, rispetto alle varietà più precoci, soprattutto nelle aree lontane dalla costa (Figura 32).

Nelle mappe di Figura 33 si osserva che in quasi tutte le celle della griglia climatica, Galaad, in condizioni di semina primaverile risulta la cultivar più precoce a raggiungere lo stadio di maturazione, con valori compresi tra DOY 185 e 200 (prime due decadi di luglio) nelle aree costiere del sud della regione e nelle aree pianeggianti della val d'Arno, dalla costa fino a Firenze, dove, come nel caso della semina autunnale la maturazione tende ad avvenire con maggiore anticipo rispetto al resto della regione, a parte l'area costiera dalla provincia di Grosseto, che mostra un trend simile. Nelle aree della Lunigiana, dell'appennino Tosco-Emiliano e del versante orientale dell'Amiata, Galaad ritarda la maturazione a partire fine di luglio fino ai fino alla metà di agosto (210-255 DOY).

Libra, la cultivar che tende a ritardare maggiormente la maturazione a seguito della semina primaverile, a livello spaziale mostra un ritardo minimo, di appena 2-3 giorni nel raggiungimento di questo stadio di sviluppo (Figura 30). Nel caso di semina primaverile la differenza riscontrata tra le varietà anche a livello spaziale è molto ridotta e non rilevante, neppure esistente in alcune celle, dove la stessa varietà compare sia nel caso della rappresentazione del maturazione anticipata che tardiva (Figura 33).

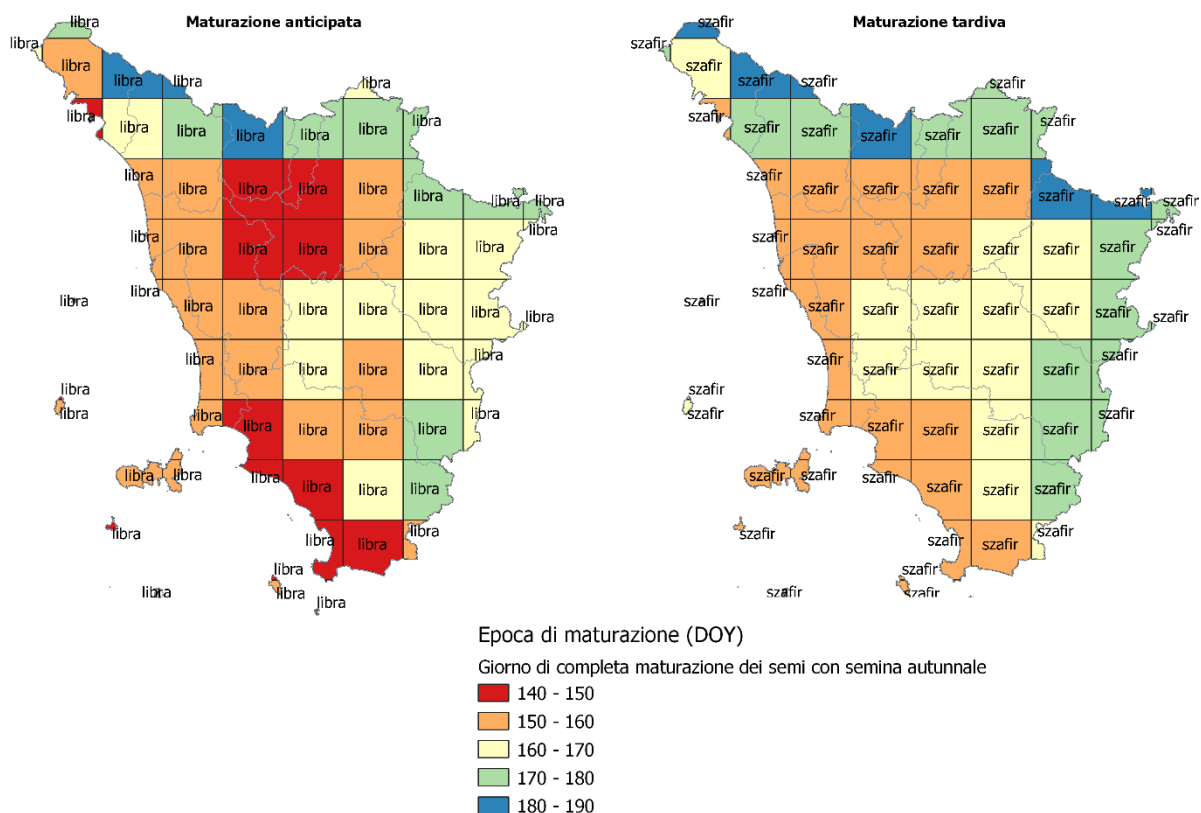


Figura 32: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di maturazione a seguito di semina autunnale. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

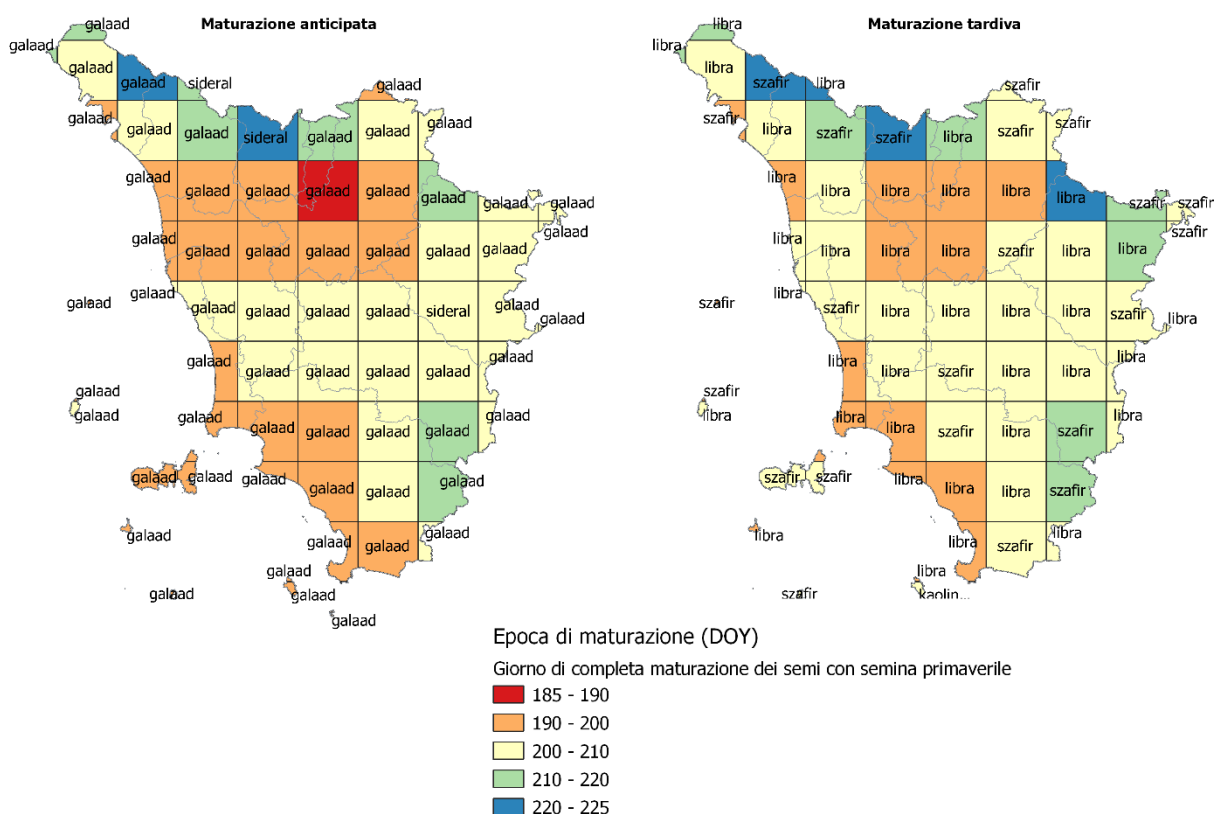


Figura 33: le due mappe riportano gli intervalli stimati in DOY dell'epoca di maturazione a seguito di semina primaverile. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi di DOY espressi dalla varietà che in ogni cella tende ad anticipare maggiormente, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi di DOY espressi dalla varietà che tende a ritardare maggiormente. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valori minimo e massimo di DOY, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

2.3.2 Rischio di stress da freddo

Lo studio ha permesso di rilevare che il rischio di stress da freddo nelle fasi di inizio e piena fioritura è minimo su tutte le cultivar di lino, perfino inesistente nel caso della semina primaverile.

Quindi solo nel caso della semina autunnale possono sussistere annate, con una frequenza bassissima, in cui si verificano giorni con temperature minime inferiori a zero nelle fasi di fioritura di alcune cultivar.

La varietà meno esposta a rischio di stress da freddo durante la fase di inizio fioritura è Sideral, con una media di 0.02 giorni anno⁻¹, che equivale a dire che tale rischio a livello regionale può concretizzarsi 1 giorno ogni 42 anni (Figura 34). Le aree dove il rischio gelata può verificarsi sono ridotte. In caso di rischio minimo, ovvero le aree in cui almeno una varietà non sia esposta al rischio, occupano la maggior parte della regione. La dove tutte le varietà sono esposte a rischio, a cavallo tra le provincie di Arezzo e Siena, le varietà meno suscettibili sono Szafir e Kaolin (Figura 35). Per le varietà più esposte, Galaad e Libra, il rischio di ritorni di freddo durante la fase di inizio fioritura ammonta a poco più di 1.5 giorni all'anno (Figura 34). Nel loro caso il rischio di gelata è molto più esteso a livello geografico, ma sempre circoscritto nella parte sud orientale delle regione, provincie di Siena, Arezzo ed in parte Firenze (Figura 35).

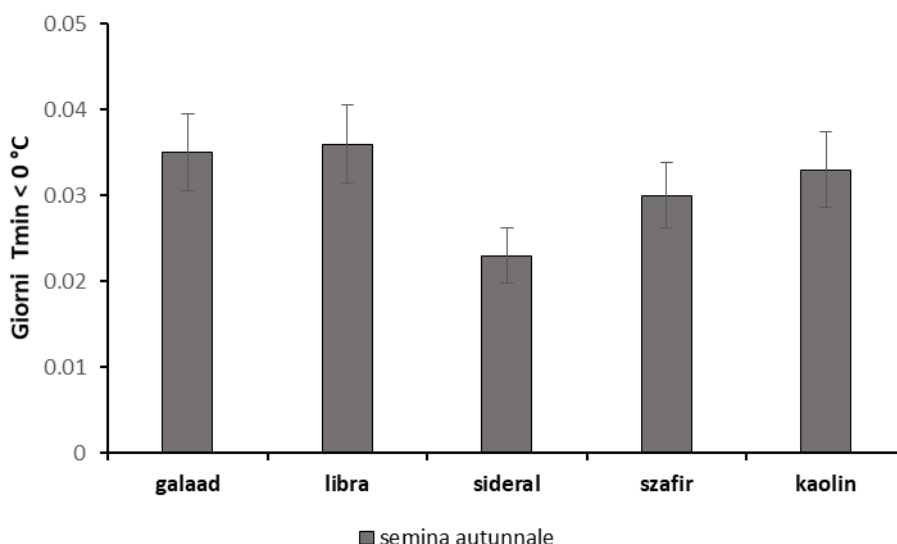


Figura 34: media regionale di lungo periodo del numero di giorni freddi ($T_{min} < 0^{\circ}C$) che possono verificarsi nella fase di inizio fioritura nel caso della semina autunnale. Le barre verticali indicano l'errore standard.

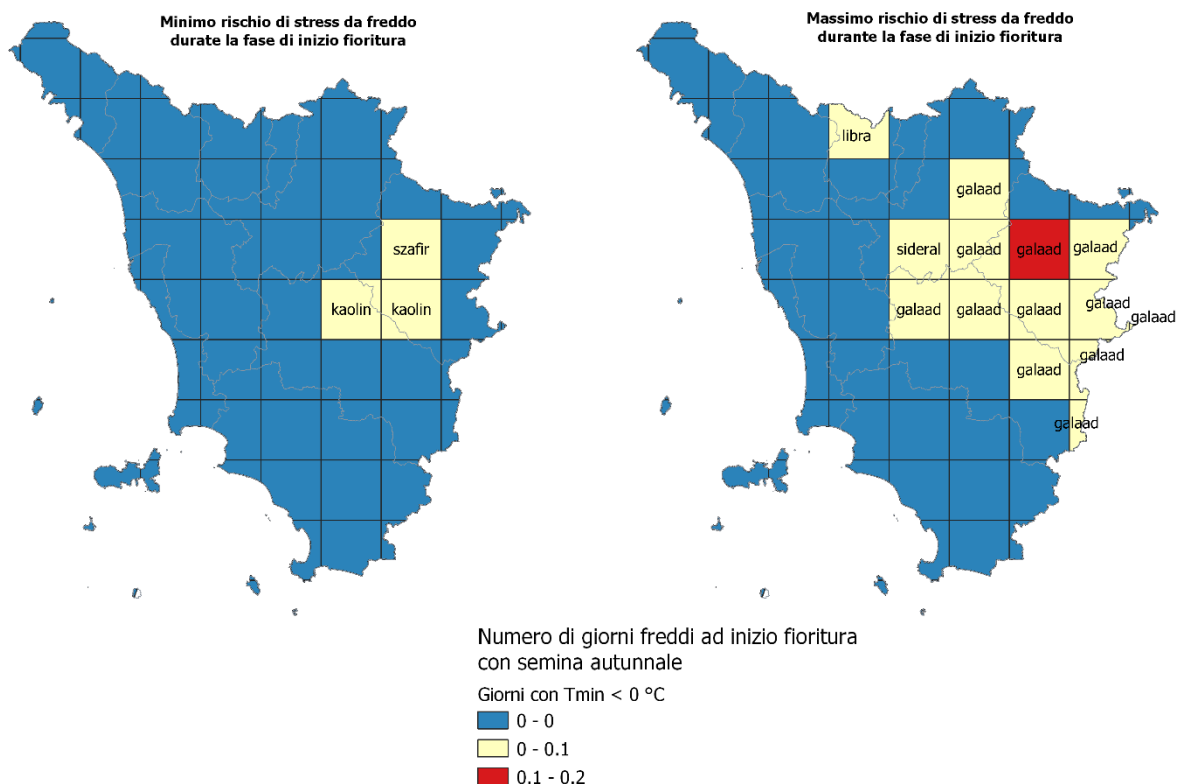


Figura 35: le due mappe riportano la media di lungo periodo per cella del numero di giorni di gelo ($T_{min} < 0^{\circ}C$) che si verificano annualmente durante la fase di inizio fioritura della coltura. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi espressi dalla varietà che in ogni cella tende a subire meno il rischio di ritorni di gelo, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi espressi dalla varietà che tende a subire maggiormente i ritorni di freddo. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valore minimo e massimo, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra. Nel caso in cui almeno una varietà non presenti rischio di esposizione, la cella è colorata di azzurro e non è riportato alcun nome di cultivar.

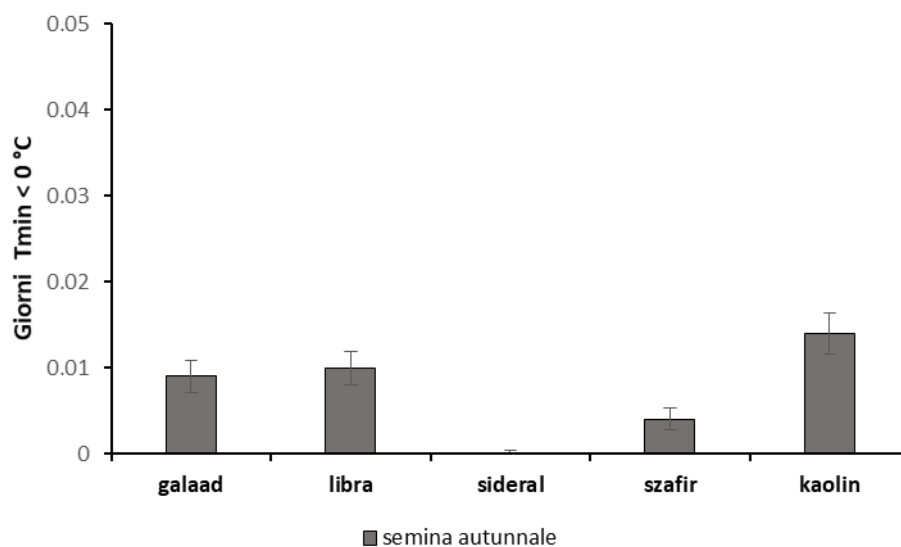


Figura 36: media regionale di lungo periodo del numero di giorni freddi ($T_{min} < 0^{\circ}C$) che possono verificarsi nella fase di piena fioritura nel caso della semina autunnale. Le barre verticali indicano l'errore standard.

La varietà meno esposta a rischio di stress da freddo durante la fase di piena fioritura è Sideral, con un rischio pressoché nullo (Figura 36). Le aree dove il verificarsi di gelate tardive durante la fase di piena fioritura potrebbe coinvolgere tutte le cultivar sono ridotte e presenti nella sola provincia di Firenze (due celle). In quelle aree, Kaolin e Galaad sono le più suscettibili, con 0.5 giorni ogni 42 anni al massimo (Figura 37).

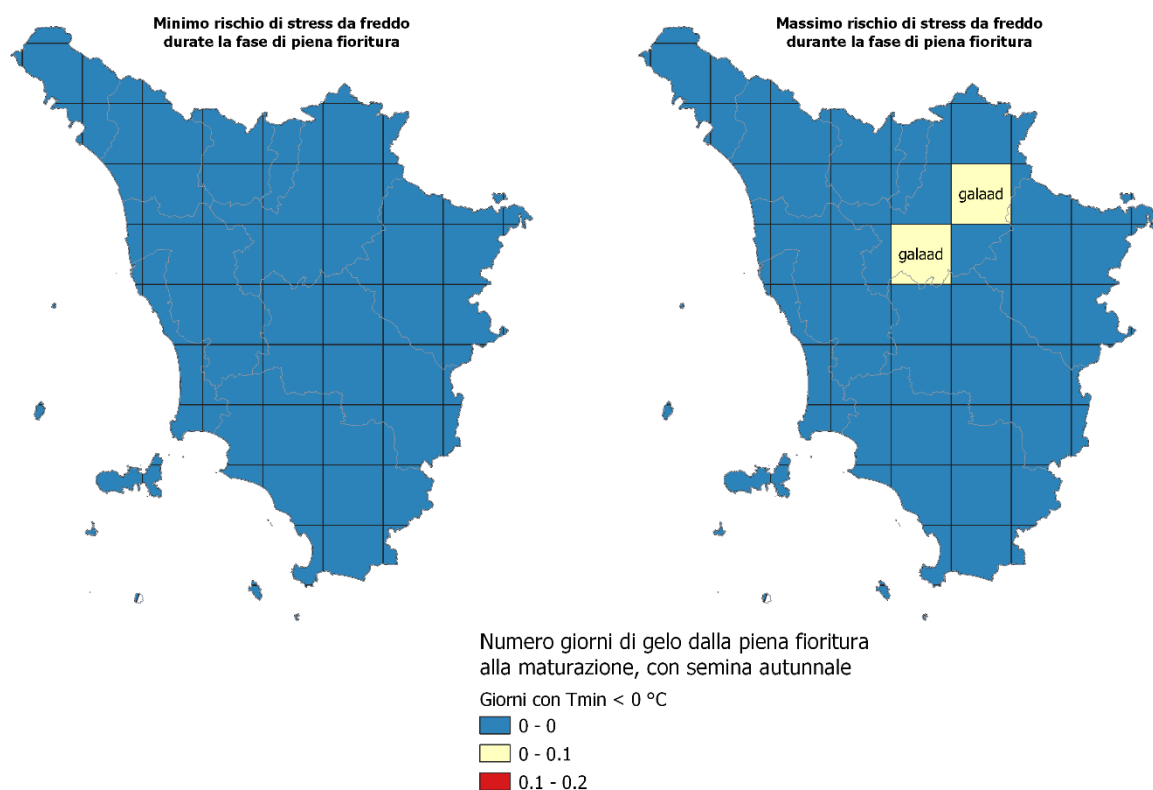


Figura 37: le due mappe riportano la media di lungo periodo per cella del numero di giorni di gelo ($T_{min} < 0\text{ °C}$) che si verificano annualmente durante la fase di piena fioritura della coltura. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi espressi dalla varietà che in ogni cella tende a subire meno il rischio di ritorni di gelo, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi espressi dalla varietà che tende a subire maggiormente i ritorni di freddo. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valore minimo e massimo, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra. Nel caso in cui almeno una varietà non presenti rischio di esposizione, la cella è colorata di azzurro e non è riportato alcun nome di cultivar.

2.3.4 Rischio di stress da caldo

Il rischio di stress da caldo, calcolato come numero di giorni con temperatura media giornaliera superiore a 25° C, nella fase di inizio fioritura è minimo in caso di semina primaverile e pressoché nullo per le semine autunnali (Figura 38).



Figura 38: regression tree del rischio di stress da caldo a livello regionale ad inizio fioritura. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dei giorni con $T_{med} > 25^{\circ}C$ e il numero di casi su cui è calcolato (celle x anni x cultivar). Nelle frecce è riportato il fattore risultato discriminante, in questo caso l'epoca di semina: autunnale (atnn) e primaverile (prmn).

Nel caso di semine primaverili il rischio medio regionale annuo ammonta 0.13 giorni, circa 5 giorni ogni 42 anni. Le varietà più esposte sono Libra e Sideral, 0.17 e 0.16 giorni rispettivamente, mentre le cultivar meno esposte sono Galaad, 0.07 giorni anno⁻¹, Szafir e Kaolin 0.11 giorni anno⁻¹ (Figura 39).

Per più di una cultivar il rischio è nullo nella maggior parte della regione, mentre la dove il rischio di stress da caldo può riguardare più varietà, alcune aree più esposte del versante appenninico e del lato dell'Amiata, coincidenti con la val d'Orcia e dove il ritardo di raggiungimento della fioritura, espone le varietà all'arrivo dei primi caldi intensi, Kaolin e Galaad sono le cultivar per le quali tale rischio è minimo (Figura 40). Alcune aree, 3 celle, non presentano mai rischi associati al caldo, ovvero nessuna varietà è esposta al rischio, mentre nella maggior parte della regione la cultivar più esposte sono Sideral e Libra (Figura 40).

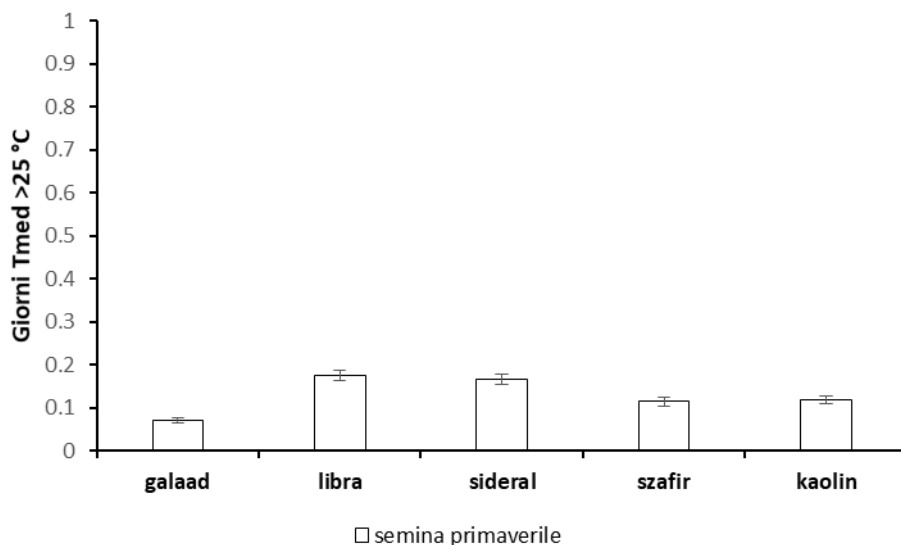


Figura 39: media regionale annuale di lungo periodo dei giorni a rischio di stress da caldo ($T_{med} > 25^{\circ}C$) in fase di inizio fioritura stimata dal modello per varietà per l'epoca di semina primaverile. Le barre verticali indicano l'errore standard.

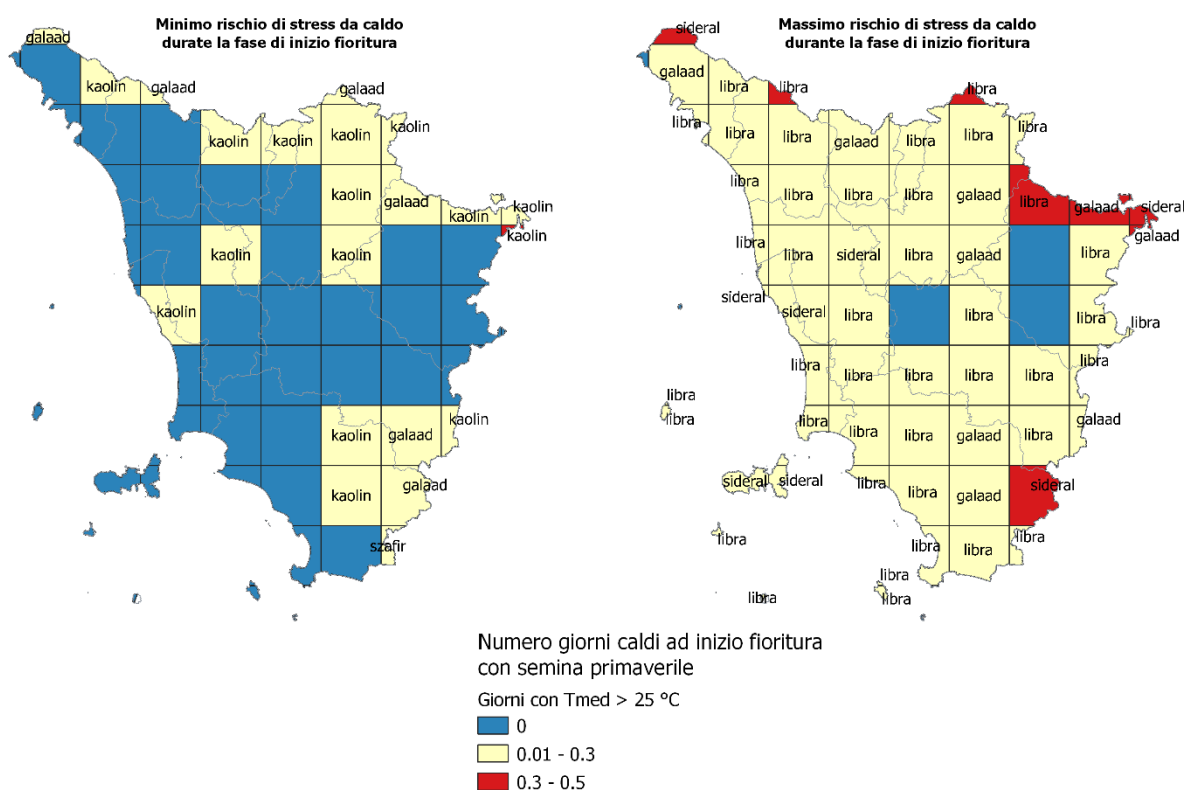


Figura 40: le due mappe riportano la media di lungo periodo per cella del numero di giorni di caldi ($T_{med} > 25^{\circ}C$) che si verificano annualmente durante la fase di inizio fioritura della coltura in caso di semina primaverile. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi espressi dalla varietà che in ogni cella tende subire di meno il rischio di ritorni di gelo, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi espressi dalla varietà che tende a subire maggiormente i ritorni di freddo. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valore minimo e massimo, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra. Nel caso in cui almeno una varietà non presenti rischio di esposizione, la cella è colorata di azzurro e non è riportato alcun nome di cultivar.

Anche per il rischio di stress da caldo nella fase dalla piena fioritura alla maturazione l'esposizione è maggiore nel caso della semina primaverile, con una media regionale di 6.4 giorni anno⁻¹, rispetto alla semina autunnale, per la quale il rischio medio regionale stimato è pari a 0.2 giorni anno⁻¹ (Figura 41).

Albero di regressione per rischio di stress da caldo da piena fioritura a maturazione

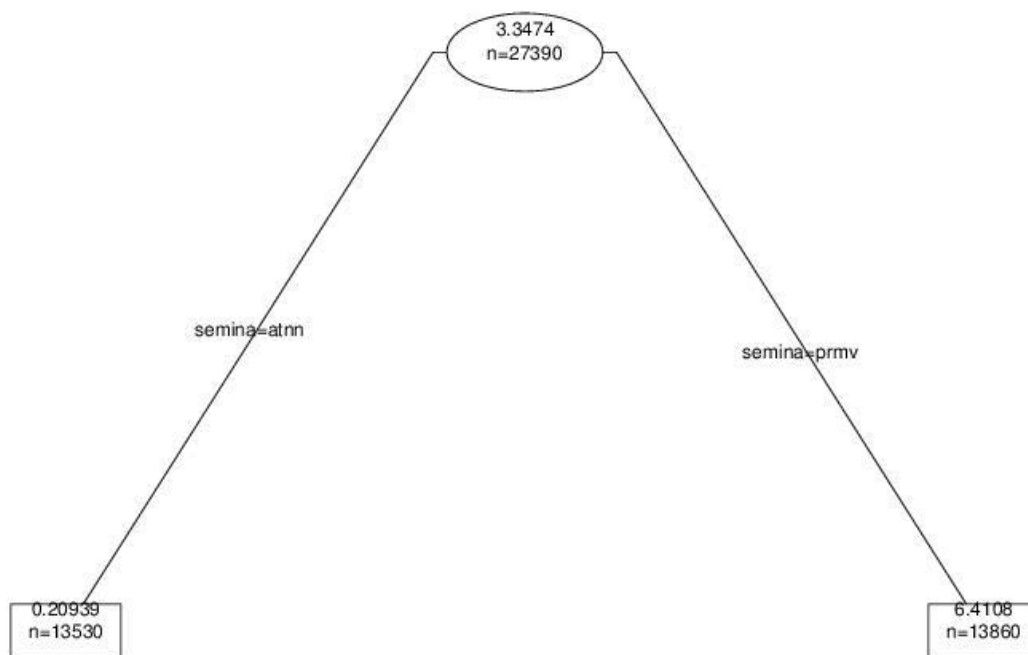


Figura 41: regression tree del rischio di stress da caldo a livello regionale dalla piena fioritura alla maturazione. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dei giorni con Tmed > 25 °C e il numero di casi su cui è calcolato (celle x anni x cultivar). Nelle frecce è riportato il fattore risultato discriminante, in questo caso l'epoca di semina: autunnale (atnn) e primaverile (prmn).

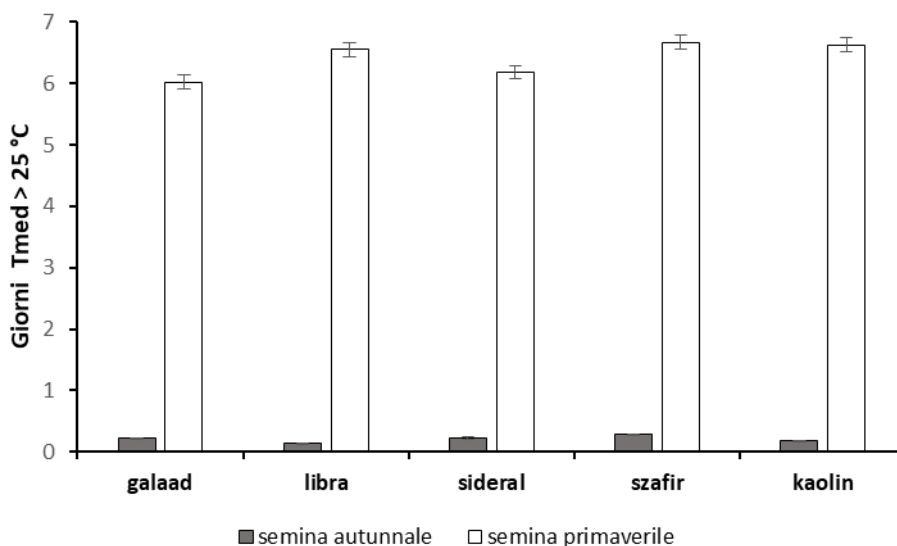


Figura 42: media regionale annuale di lungo periodo dei giorni con rischio di stress da caldo (Tmed > 25 °C) dalla piena fioritura alla maturazione stimata dal modello per varietà in funzione dell'epoca di semina (autunnale o primaverile). Le barre verticali indicano l'errore standard.

L'esposizione al rischio di stress da caldo dalla piena fioritura alla maturazione con semina primaverile è simile in tutte le cultivar, variando da 6 giorni anno⁻¹ in media per Galaad a 6.7 giorni anno⁻¹ per Szafir (Figura 42). Nel caso della semina autunnale il rischio più basso è stato stimato per Libra, 0.14 giorni anno⁻¹, mentre il rischio più alto è stato stimato per Szafir, 0.3 giorni anno⁻¹ (Figura 42).

Con la semina autunnale il rischio di stress da caldo dalla piena fioritura è nullo per almeno una cultivar nella maggior parte della regione, mentre la dove il rischio di stress da caldo può riguardare più varietà, in alcune aree più esposte del versante appenninico e del sud della regione, coincidenti con la provincia di Grosseto, Kaolin e Libra sono le cultivar per le quali tale rischio è minimo (Figura 43). Alcune aree costiere del nord della regione, non presentano mai rischi associati al caldo, ovvero nessuna varietà è esposta al rischio, mentre nella maggior parte della regione la cultivar più esposte sono Galaad e Szafir (Figura 43).

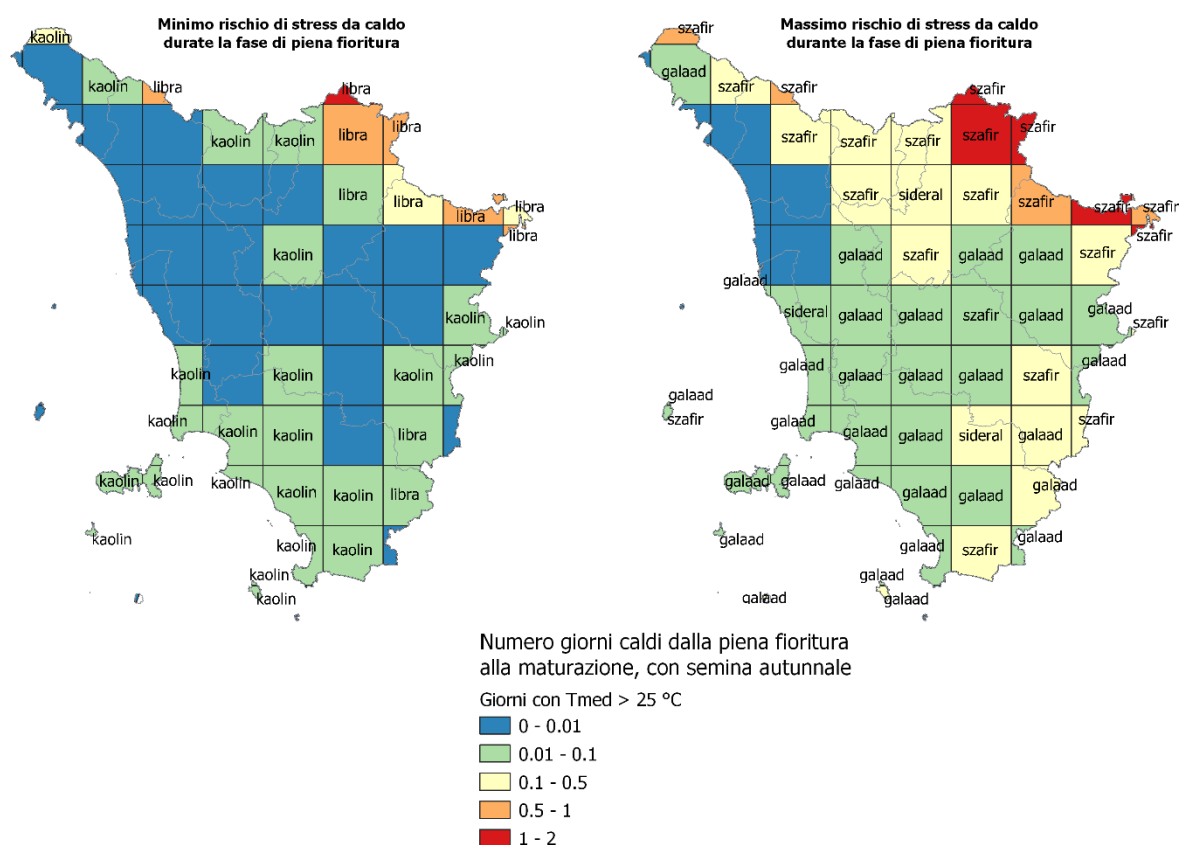


Figura 43: le due mappe riportano la media di lungo periodo per cella del numero di giorni di caldi (Tmed > 25 °C) che si verificano annualmente dalla fase di piena fioritura della coltura in caso di semina autunnale. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi espressi dalla varietà che in ogni cella tende a subire di meno il rischio di ritorni di gelo, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi espressi dalla varietà che tende a subire maggiormente i ritorni di freddo. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valore minimo e massimo, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra. Nel caso in cui almeno una varietà non presenti rischio di esposizione, la cella è colorata di azzurro e non è riportato alcun nome di cultivar.

Nel caso di semina primaverile il rischio di stress da caldo dalla piena fioritura è diffuso su tutta la regione e maggiore nelle aree interne della val d'Arno, tra le provincie di Pisa, Pistoia, Prato e Firenze, e delle zone costiere della provincia di Grosseto, con un numero di gironi di caldo all'anno che può variare da 8 a 11 a seconda delle cultivar. In questo caso le cultivar più esposte sono Szafir e Libra, mentre la cultivar meno

esposta è Galaad. Le aree meno esposte a rischio da stress da caldo, 2-5 giorni anno⁻¹ con Tmed > 25 °C, sono a nord della regione (Figura 44).

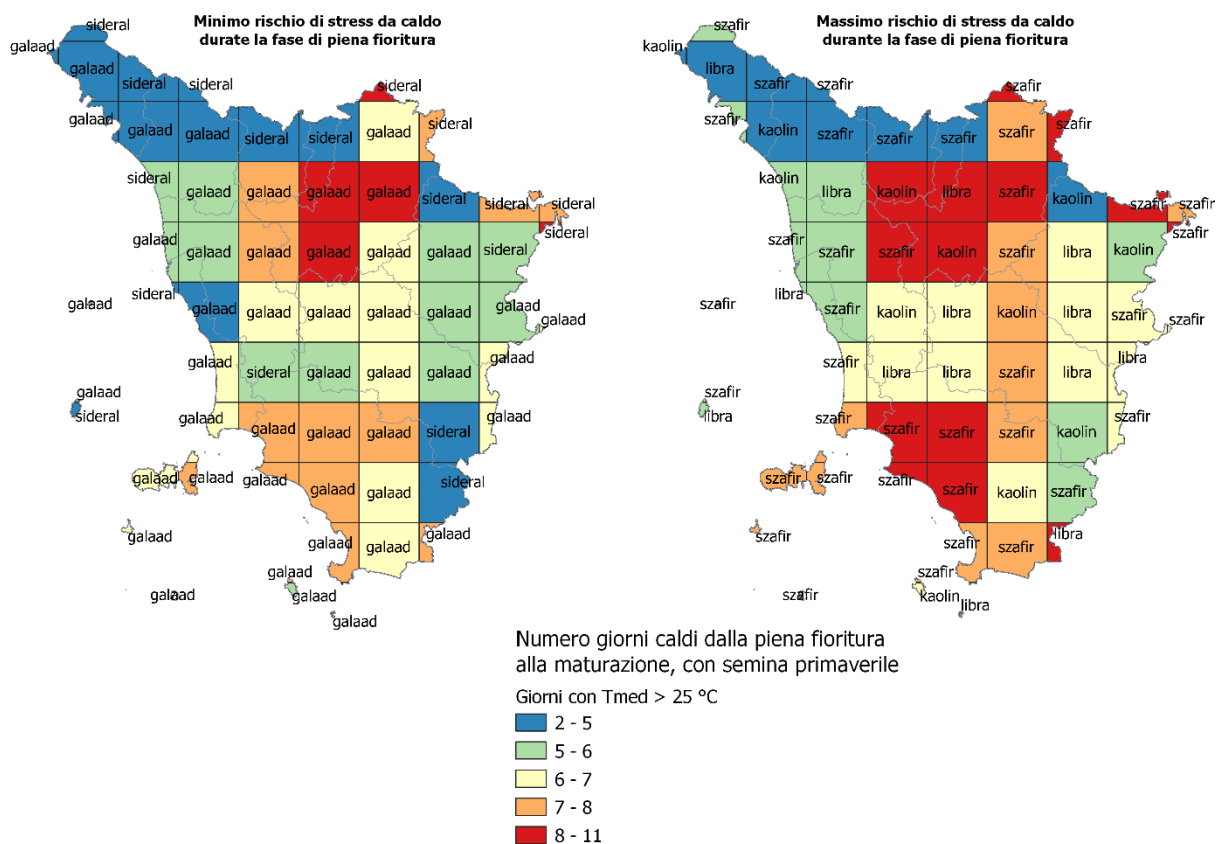


Figura 44: le due mappe riportano la media di lungo periodo per cella del numero di giorni di caldi (Tmed > 25 °C) che si verificano annualmente dalla fase di piena fioritura della coltura in caso di semina primaverile. Nella mappa di sinistra sono riportati i valori minimi espressi dalla varietà che in ogni cella tende a subire di meno il rischio di ritorni di gelo, mentre nella mappa di destra sono riportati i valori massimi espressi dalla varietà che tende a subire maggiormente i ritorni di freddo. In ogni cella è riportato il nome della cultivar cui è associato il valore minimo e massimo, rispettivamente nelle mappe a sinistra e a destra.

2.3.5 Rischio di stress idrico

Il rischio di stress idrico è stato calcolato con un indice di umidità adimensionale (da -1 a 1) specifico per cultivar e tipo di suolo (Ims) che permette di stimare il deficit (nel caso assuma valori negativi) o il surplus (nel caso assuma valori positivi) idrico potenziale.

In base ai valori stimati di Ims sono state individuate classi di rischio di deficit/surplus che vanno da deficit molto grave a surplus moderato (Tabella 12). Tale classificazione è stata adottata nelle rappresentazioni cartografiche successive.

Tabella 12: classificazione del rischio di deficit o surplus idrico definita in base ai valori dell'Indice di umidità specifico Ims

Ims (-)	Classificazione Deficit/Surplus
-1 - -0.8	Deficit molto grave
-0.8 - -0.6	Deficit grave
-0.6 - -0.4	Deficit elevato
-0.4 - -0.2	Deficit moderato
-0.2 - 0	Deficit lieve
0 - 0.2	Surplus lieve
0.2 - 0.4	Surplus moderato

Albero di regressione per rischio di stress idrico ad inizio fioritura

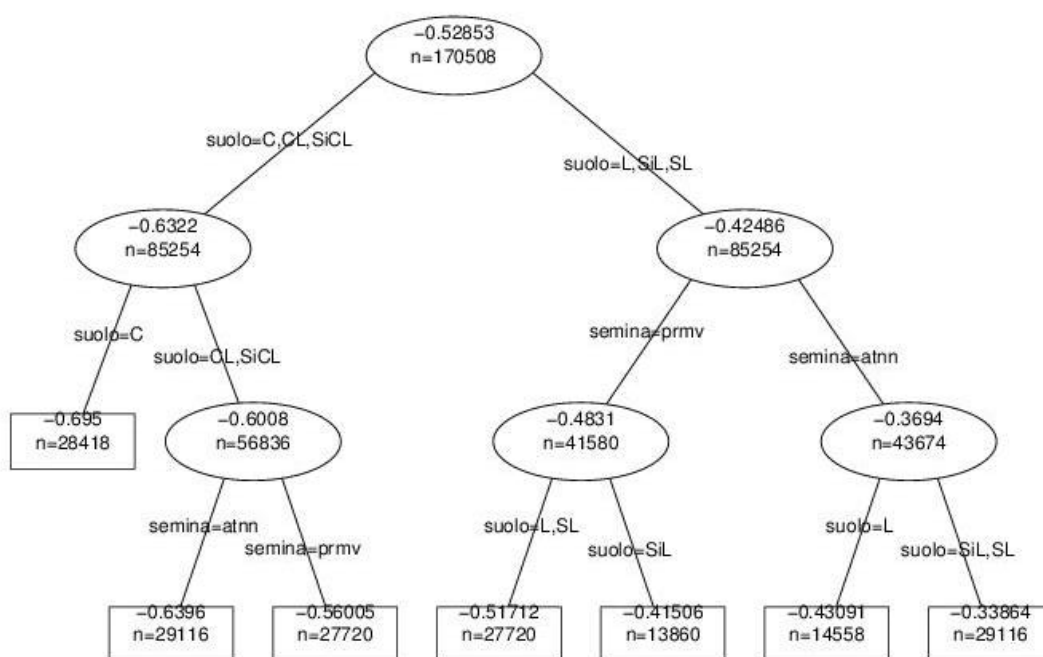


Figura 45: regression tree del rischio di stress idrico a livello regionale nella fase di inizio fioritura. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dell'indice di umidità specifico Ims e il numero di casi su cui è calcolato. Nelle frecce sono riportati i fattori risultati discriminanti, in questo caso il tipo di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) e l'epoca di semina (atnn = autunnale, prmn = primaverile).

La recursive partitioning analysis a tre fattori (epoca di semina, cultivar e tipo di suolo) effettuata sui valori stimati di Ims per la fase di inizio fioritura ha permesso di evidenziare, che i principali fattori di influenza sul rischio di deficit idrico sono la tipologia di suolo e l'epoca di semina (Figura 45).

In particolare si osserva che a livello regionale su suoli pesanti, argillosi, franco argillosi e franco limo argillosi il rischio di deficit idrico è sempre compreso tra elevato e grave a prescindere dall'epoca di semina. Al contrario su suoli franchi, franco limosi o franco sabbiosi il rischio è moderato in caso di semina autunnale ed elevato in caso di semina estiva (Figura 45).

Effettuando la recursive partitioning analysis a due fattori (cultivar e epoca di semina) solo su suoli argillosi (Figura 46), è apprezzabile il fatto che il fattore cultivar non è in grado di determinare il livello di rischio, nonostante l'analisi abbia individuato dei nodi di discriminazione significativi che indicano livelli di deficit più bassi per Galaad, Kaolin e Libra in caso di semina primaverile. Quindi, a prescindere anche dall'epoca di semina tutte le varietà considerate sono esposte ad un rischio elevato di iniziare la fioritura in condizioni di deficit grave, proprio perché le proprietà idrologiche di tali suoli non consentono di sfruttare adeguatamente gli apporti atmosferici per via della bassa capacità di ritenzione di acqua disponibile per la coltura e la bassa capacità di infiltrazione che riduce i livelli di pioggia utile in caso di precipitazioni abbondanti, ma intese.

Albero di regressione per rischio di stress idrico ad inizio fioritura su suolo argilloso

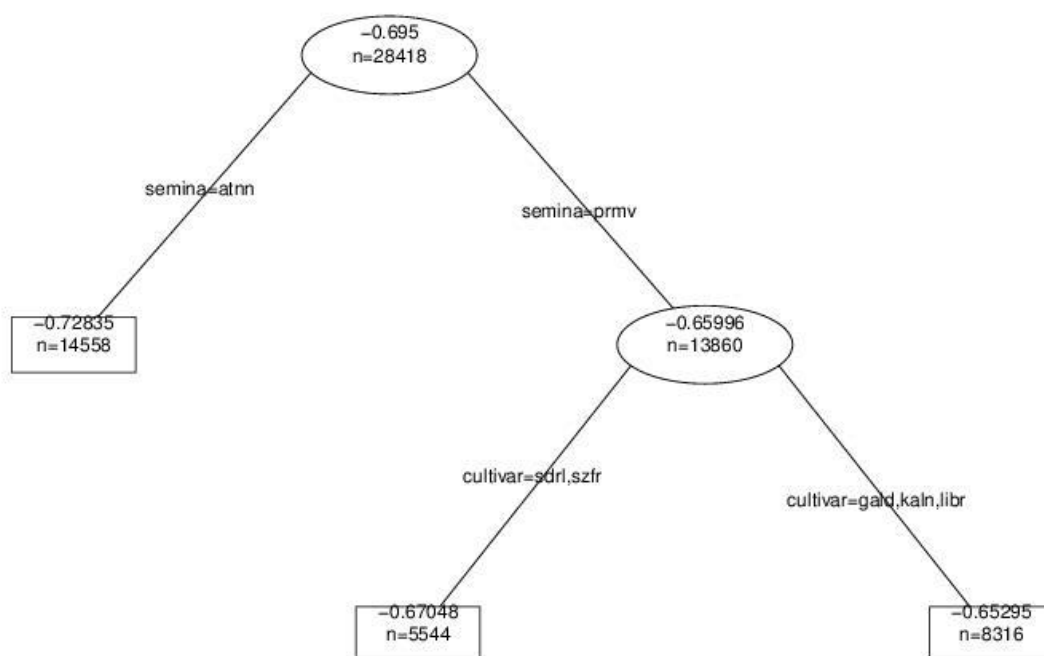


Figura 46: regression tree del rischio di stress idrico a livello regionale nella fase di inizio fioritura su terreno argilloso. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dell'indice di umidità specifico *Ims* e il numero di casi su cui è calcolato. Nelle frecce sono riportati i fattori risultati discriminanti, in questo caso la cultivar (sdrl = Sideral, szfr = Szafir, gald = Glaad, kaln = Kaolin, libr = Libra) e l'epoca di semina (atnn = autunnale, prmn = primaverile).

Dalle mappe da Figura 47 a Figura 50, si osserva bene come a livello territoriale la scelta della cultivar, in base al modello utilizzato, comporti pochi vantaggi in termini di riduzione del rischio di deficit idrico rispetto alle condizioni di suolo. In generale il rischio di deficit idrico è minimizzato con le cultivar Kaolin e Gallaad su terreni franchi ed in particolare su terreni franco limosi e franco sabbiosi dove le classi di rischio individuate variano prevalentemente a lieve da moderato a lieve in caso di semina autunnale, mentre in condizioni di semina primaverile il livello di deficit idrico si mantiene comunque potenzialmente elevato e grave su tutta la regione. Con la semina primaverile il minimo livello di deficit si osserva su terreni franco limosi nelle aree a nord della regione ed in particolare lungo la val d'Arno.

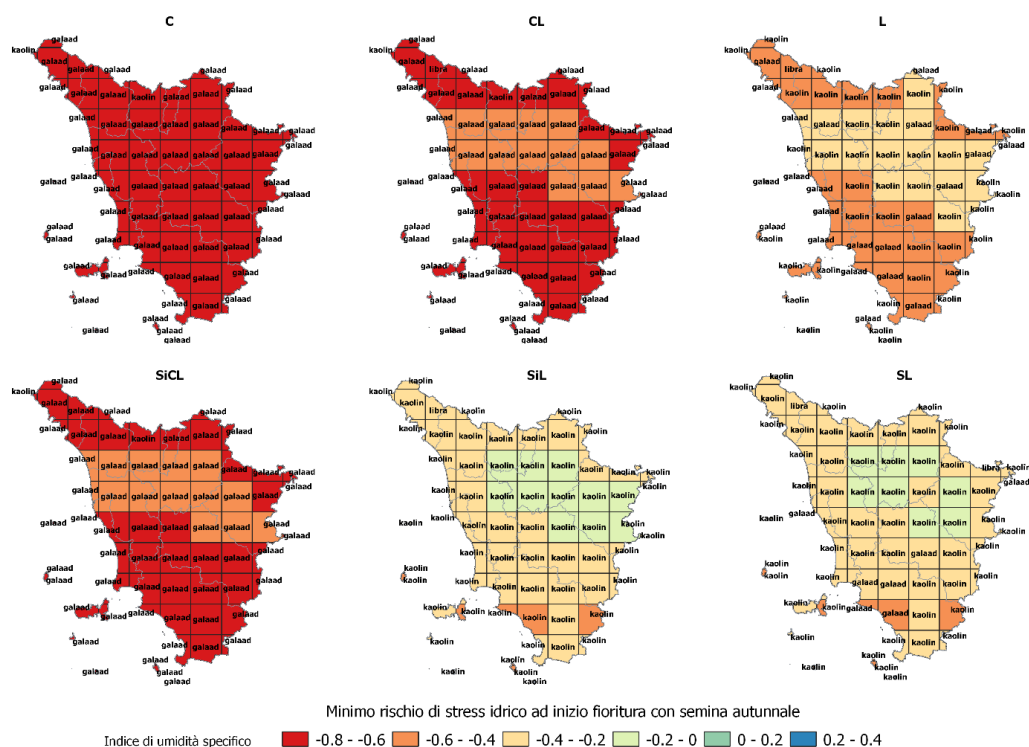


Figura 47: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più bassa suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) nella fase di inizio fioritura con semina autunnale.

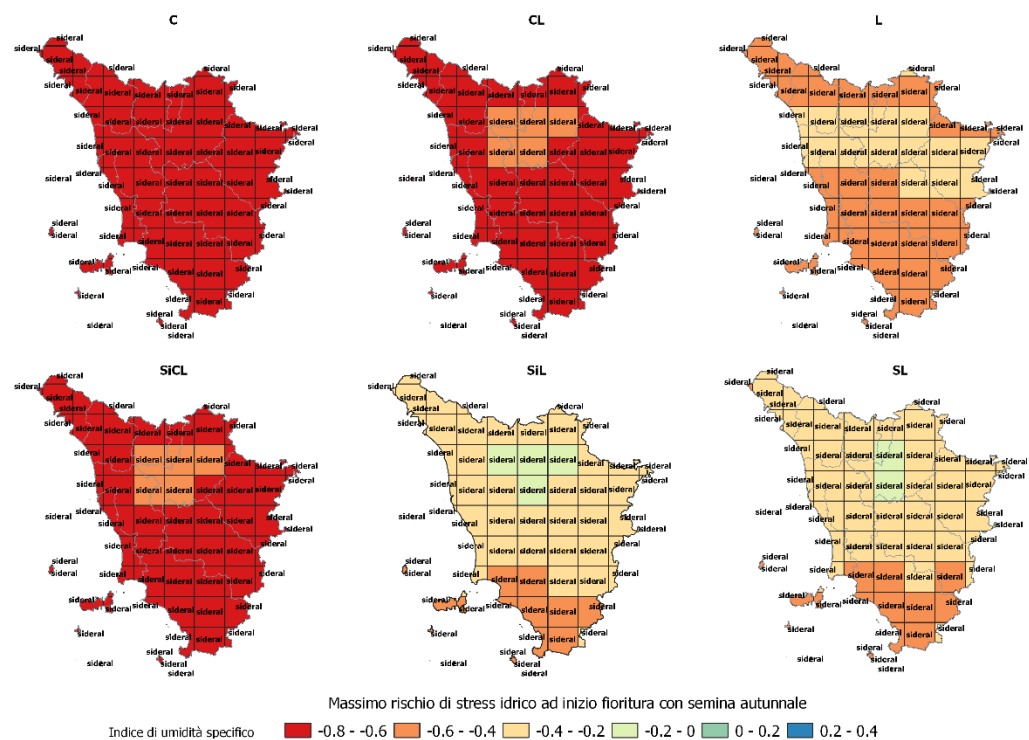


Figura 48: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL= franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più alta suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) nella fase di inizio fioritura con semina autunnale.

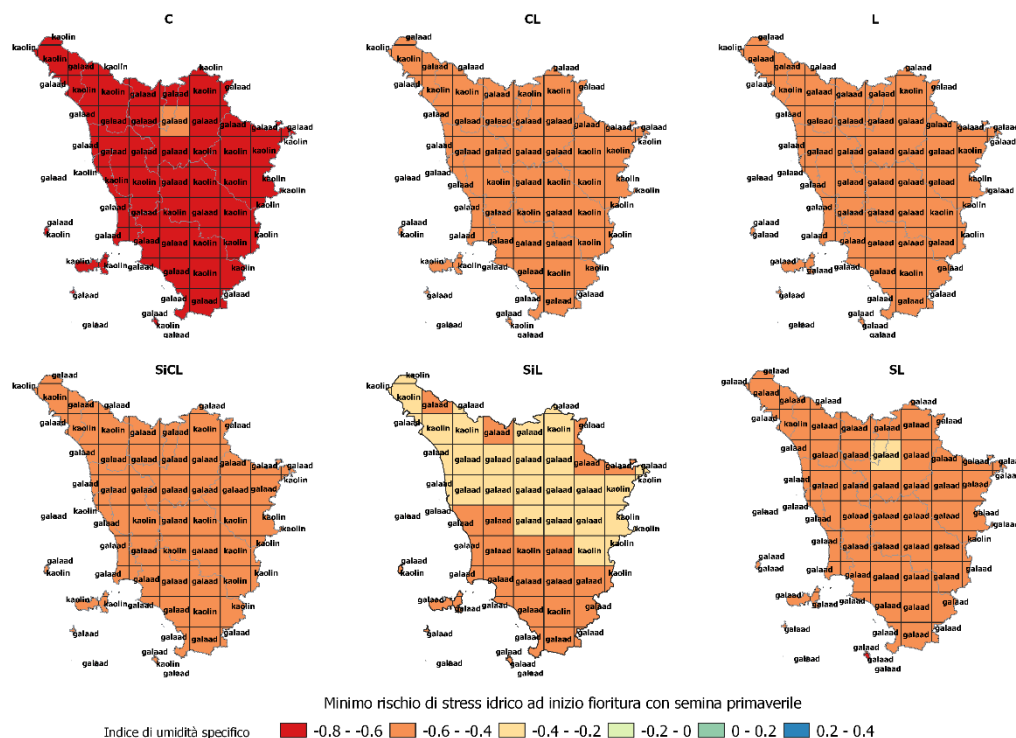


Figura 49: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più bassa suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) nella fase di inizio fioritura con semina primaverile.

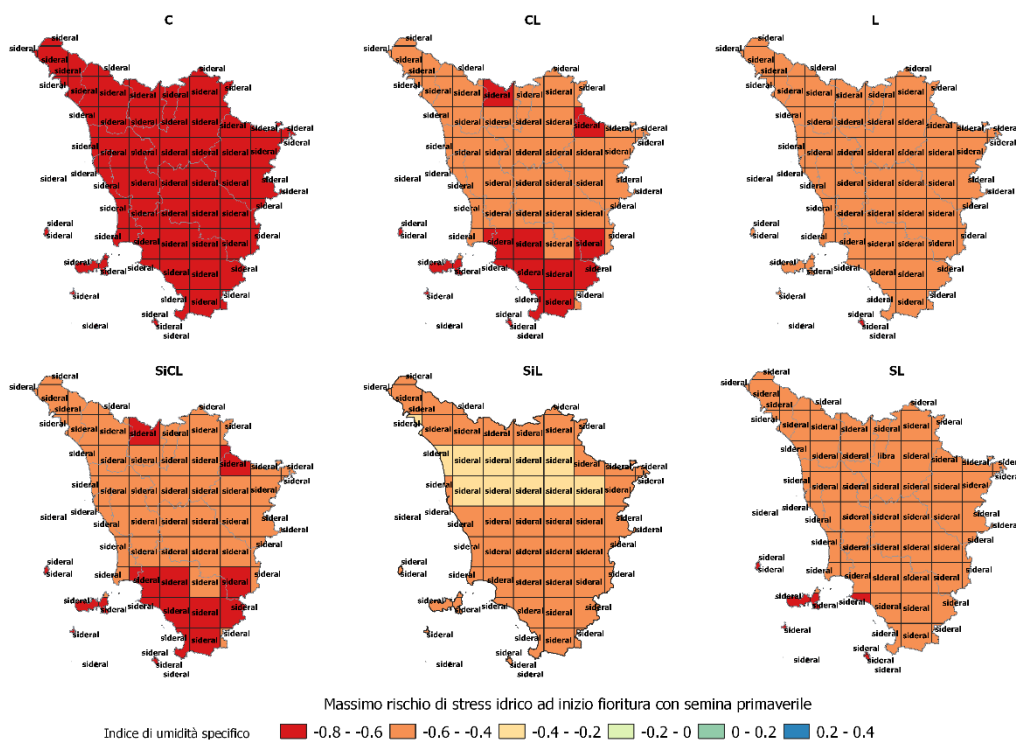


Figura 50: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più alta suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) nella fase di inizio fioritura con semina primaverile.

Anche dalla piena fioritura alla maturazione è stato osservato dalla recursive partitioning analysis a tre fattori (epoca di semina, cultivar e tipo di suolo) che i principali fattori di influenza sul rischio di deficit idrico sono la tipologia di suolo e l'epoca di semina (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**), e analogamente a quanto osservato per la fase di inizio fioritura, è stato stimato che su suoli pesanti, argillosi, franco argillosi e franco limo argillosi il rischio di deficit idrico è sempre compreso tra elevato e grave a prescindere dall'epoca di semina. Al contrario su suoli franchi, franco limosi o franco sabbiosi il rischio è moderato in caso di semina autunnale ed elevato in caso di semina estiva (Figura 46).

Effettuando la recursive partitioning analysis a due fattori (cultivar e epoca di semina) solo su suoli argillosi (Figura 52), anche per questo stadio di sviluppo è stato osservato che il fattore cultivar non è in grado di determinare il livello di rischio, per cui a prescindere anche dall'epoca di semina tutte le varietà considerate rischiano comunque di trovarsi in condizioni di rischio di deficit grave, proprio perché le proprietà idrologiche di tali suoli non consentono di sfruttare adeguatamente gli apporti atmosferici per via della bassa capacità di ritenzione di acqua disponibile per la coltura e la bassa capacità di infiltrazione che riduce i livelli di pioggia utile in caso di precipitazioni abbondanti, ma intense. Nel caso di condizioni di suolo più favorevoli, terreni franco limosi (Figura 53), la recursive partitioning analysis a due fattori, da un lato conferma la scarsa rilevanza della scelta varietale sulla minimizzazione del rischio legato al deficit idrico, dall'altra evidenzia ancora una volta come la semina autunnale possa ridurre l'esposizione di tutte le cultivar considerate a rischi connessi alla carenza di acqua.

Albero di regressione per rischio di stress idrico da fine fioritura a maturazione

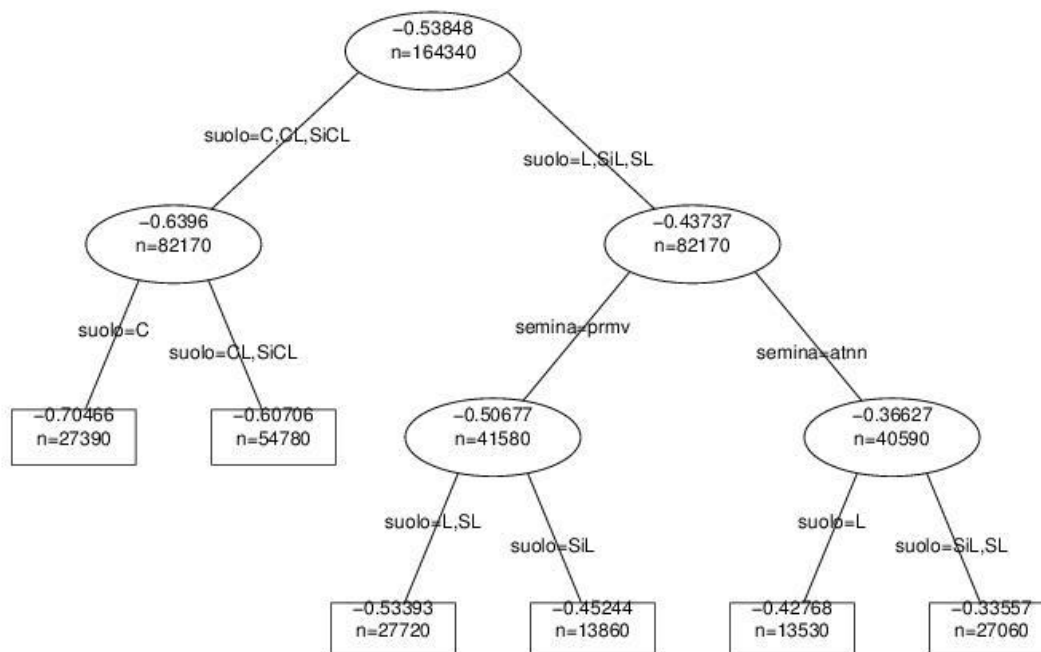


Figura 51: regression tree del rischio di stress idrico a livello regionale dalla piena fioritura alla maturazione. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dell'indice di umidità specifico *Ims* e il numero di casi su cui è calcolato. Nelle frecce sono riportati i fattori risultati discriminanti, in questo caso il tipo di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) e l'epoca di semina (atnn = autunnale, prmn = primaverile).

Albero di regressione per rischio di stress idrico da fine fioritura a maturazione

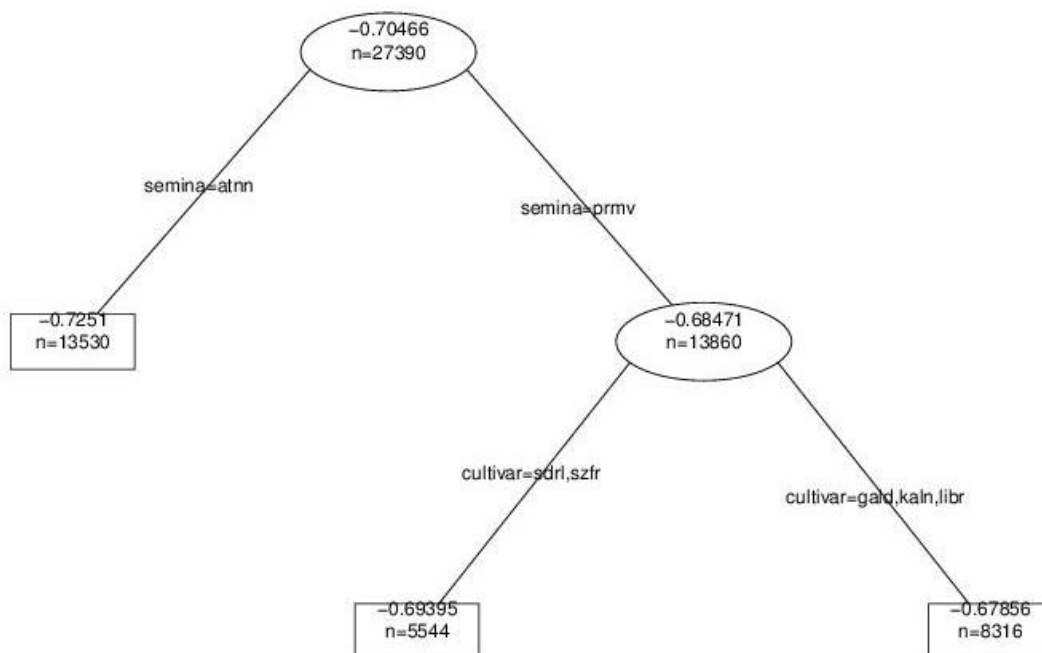


Figura 52: regression tree del rischio di stress idrico a livello regionale dalla piena fioritura alla maturazione su suolo argilloso. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dell'indice di umidità specifico *Ims* e il numero di casi su cui è calcolato. Nelle frecce sono riportati i fattori risultati discriminanti, in questo caso la cultivar (sdr1 = Sideral, szfr = Szafir, gald = Glaad, kaln = Kaolin, libr = Libra) e l'epoca di semina (atnn = autunnale, prmn = primaverile).

Albero di regressione per rischio di stress idrico da piena fioritura a maturazione su suolo franco limoso

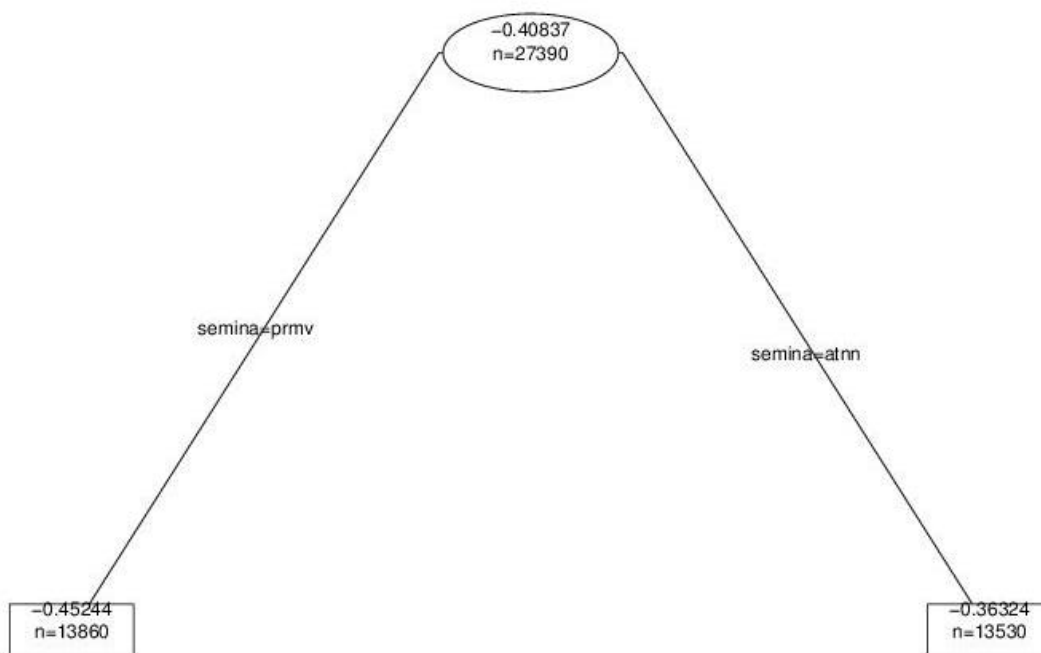


Figura 53: regression tree del rischio di stress idrico a livello regionale dalla piena fioritura alla maturazione su terreno franco limoso. Negli oggetti del diagramma sono riportati il valore medio dell'indice di umidità specifico *Ims* e il numero di casi su cui è calcolato. Nelle frecce sono riportati i fattori risultati discriminanti, in questo caso l'epoca di semina (atnn = autunnale, prmn = primaverile).

Dalle mappe da Figura 54 a Figura 57, è possibile osservare come a livello territoriale la scelta della cultivar, in base al modello utilizzato, comporti pochi vantaggi in termini di riduzione del rischio di deficit idrico rispetto alle condizioni di suolo. In generale il rischio di deficit idrico è minimizzato, anche dalla piena fioritura alla maturazione, con le cultivar Kaolin e Gallaad su terreni franchi ed in particolare su terreni franco limosi e franco sabbiosi dove le classi di rischio individuate variano prevalentemente a lieve da moderato a lieve in caso di semina autunnale, mentre in condizioni di semina primaverile il livello di deficit idrico si mantiene comunque potenzialmente elevato e grave su tutta la regione. Con la semina primaverile il minimo livello di deficit si osserva su terreni franco limosi nelle aree a nord della regione ed in particolare lungo la val d'Arno.

E' importante sottolineare come i valori di *Ims*, calcolati dalla piena fioritura alla maturazione, varino poco rispetto a quelli calcolati per l'inizio fioritura, nonostante che diminuiscano le piogge ed aumenti l'evapotraspirazione di riferimento con l'avanzare della stagione verso l'estate. Questa bassa variazione è conseguenza dei valori dei *Kc* più bassi, utilizzati per il calcolo dell'evapotraspirazione colturale che riducono i fabbisogni idrici della coltura nelle fasi finali del suo sviluppo.

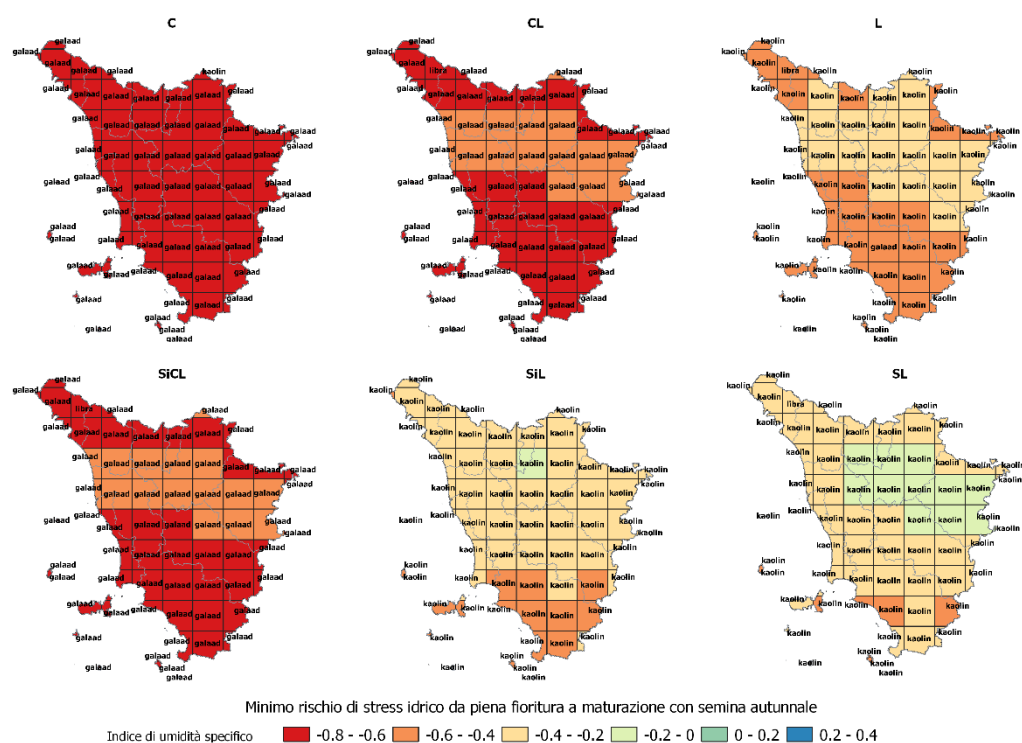


Figura 54: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più bassa suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) dalla piena fioritura alla maturazione con semina autunnale.

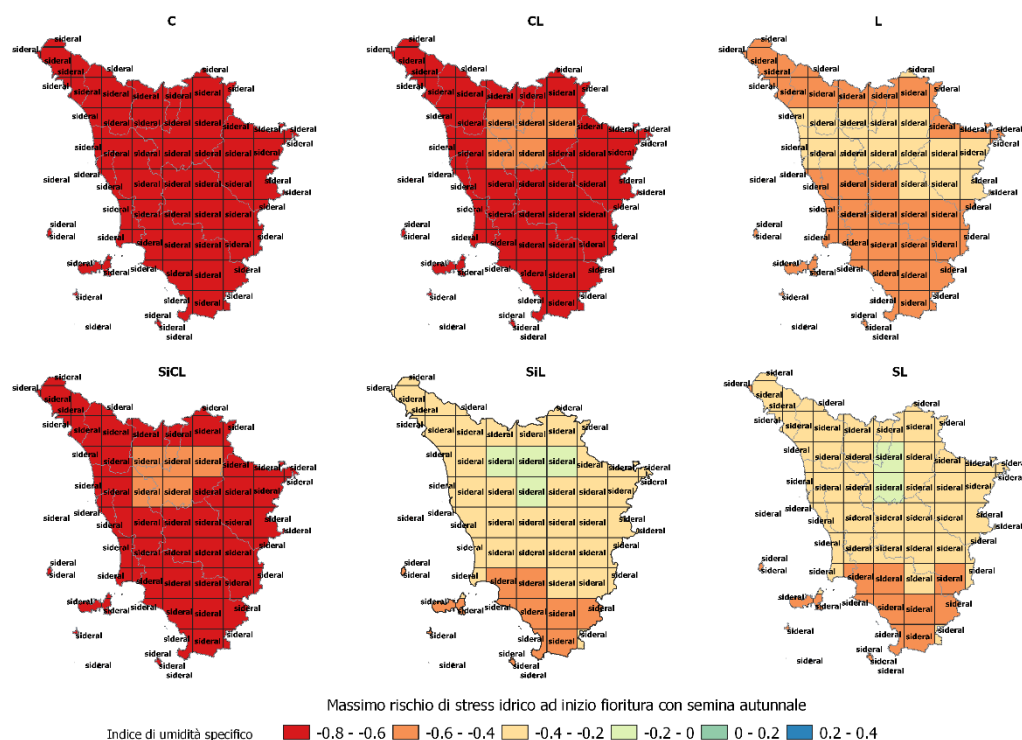


Figura 55: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argilloso, CL= franco argilloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più alta suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) dalla piena fioritura alla maturazione con semina autunnale.

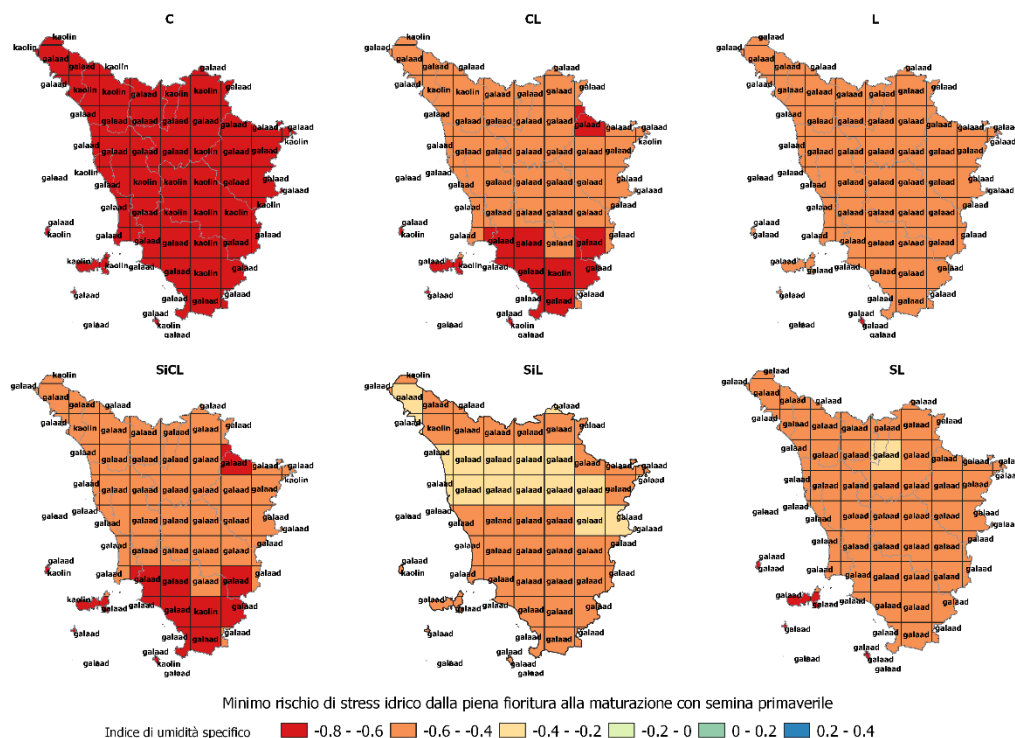


Figura 56: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argiloso, CL= franco argiloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più bassa suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) dalla piena fioritura alla maturazione con semina primaverile.

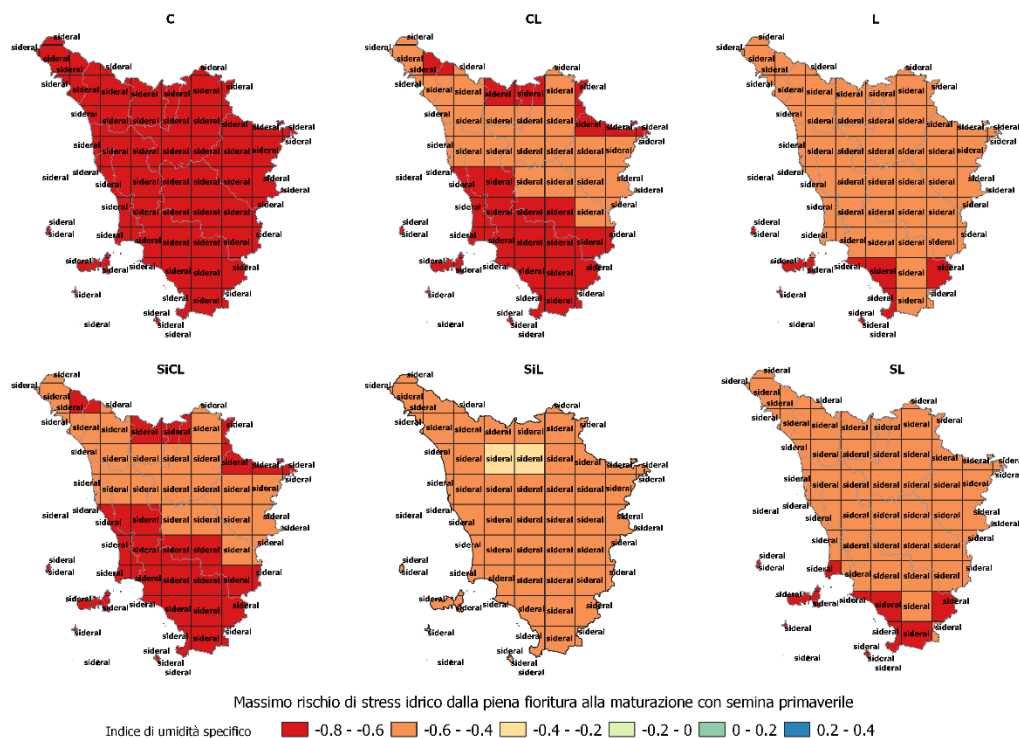


Figura 57: le sei mappe della figura rappresentano il valore dell'indice di umidità specifico (variazioni di colore delle celle) nelle diverse tipologie di suolo (C = argiloso, CL= franco argiloso, SiCL = franco limo argilloso, L = franco, SiL = franco limoso, SL = franco sabbioso) per le varietà che manifestano la più alta suscettibilità al rischio (etichette sulle celle) dalla piena fioritura alla maturazione con semina autunnale.

2.4 Conclusioni

Lo studio condotto è una analisi preliminare di vocazionalità del territorio toscano alla coltivazione del lino che ha permesso di evidenziare e confermare quanto la scelta dell'epoca di semina sia determinante nel valorizzare le caratteristiche proprie di una coltura adatta ad un ciclo autunno vernino. Infatti la semina autunnale rispetto a quella primaverile non comporta un rilevante incremento dei rischi associati al freddo durante le fasi di fioritura e sviluppo dei frutti, a fronte invece di un significativo vantaggio nella riduzione dei rischi associati alle alte temperature e alla carenza idrica.

Alcune aree geografiche, identificabili in tutta la val d'Arno e delle provincie di Arezzo e Siena, risultano particolarmente vocate per una maggiore riduzione dei rischi di stress associati ad eccesso di caldo o a carenza idrica. Mentre la riduzione dei rischi associati al freddo è maggiormente apprezzabile nelle aree costiere del sud dove prevalgono climi miti. Paradossalmente il rischio di stress da caldo è maggiore nelle aree prossime ai rilievi appenninici, dove probabilmente le basse temperature di fine inverno e primavera determinano un rallentamento dello sviluppo ritardando la fioritura a ridosso dell'estate. Di conseguenza proprio varietà con fasi di sviluppo vegetativo più lungo come Sideral sono maggiormente esposte al rischio di stress da caldo nelle fasi di inizio fioritura, in caso di semina primaverile. Così anche Szafir, Libra e Kaolin, che hanno una fase di inizio fioritura più dilatata sono maggiormente esposte a rischi di stress da caldo a partire dalla piena fioritura.

E' bene rimarcare che l'approccio utilizzato non mira a quantificare l'effetto degli stress considerati sulla perdita di produzione, ma ad individuare i possibili livelli di stress in funzione delle condizioni climatiche del territorio e dei ritmi di sviluppo fenologico delle diverse cultivar estrapolati dalle prove sperimentali di campo condotte durante il corso del progetto a San Piero a Grado ed Alberese. La durata dei diversi stadi di sviluppo è stata misurata solo in relazione ai gradi giorno, pertanto il ritmo di sviluppo specifico di ogni cultivar si è basato solo sul termoperiodo e parametrizzato a livello cultivar specifico, mentre i parametri relativi al modello di fotoperiodo sono stati assunti uguali per le cinque varietà, non disponendo di maggiori dati per poterlo parametrizzare a livello cultivar-specifico.

In merito allo stress idrico, oltre all'epoca di semina è stata osservata una forte influenza della tessitura del suolo sul livello di esposizione della coltura a tale stress in funzione del deficit idrico potenziale. L'approccio utilizzato ha tenuto conto della capacità di ritenzione potenziale dei suoli, ma anche la capacità di infiltrazione di essi. Tale approccio ha in effetti permesso di discriminare in maniera significativa l'effetto suolo, tuttavia si tratta solo di un bilancio apparente tra apporti potenziali delle precipitazioni e fabbisogno potenziale della coltura che non considera le perdite di acqua per drenaggio, e tanto meno gli apporti potenziali da falda, che per una coltura come il lino potrebbero essere determinanti ai fini produttivi.

Tuttavia i risultati ottenuti confermano quanto riportato dalla bibliografia su una predilezione da parte della coltura di suoli franchi o tendenzialmente più sciolti rispetto a suoli fini ad alto contenuto di argilla.

In futuro, lo sviluppo e l'ottimizzazione di un modello di crescita dedicato potrebbe consentire l'implementazione di sistemi di simulazioni cultivar specifici in grado di supportare meglio la pianificazione degli itinerari tecnici in funzione delle condizioni ambientali, ma già da questo studio, nonostante le differenze relative alla fenologia delle diverse cultivar siano minime, è possibile apprezzare quale potrebbe essere il ruolo nella selezione genetica di caratteri associati sia al termo che al fotoperiodo, per la selezione di varietà precoci adatte a periodi di semina invernali o primaverili, che talvolta risultano obbligati per via delle abbondanti piogge autunnali.

2.5 Bibliografia

- Allen R.G., Pereira L.S., Res D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56
- Bacci L., Baronti S., Angelini L., di Virgilio N. 2007. Manuale di coltivazione e prima lavorazione del lino e altre piante da fibra. Regione Toscana 2007, pp 80
- Brutch N., Matvienko I., Porokhvinova E., Pavlov A., Nozkova J., Koshkin V. (2020) Effect of Photoperiod on *Linum usitatissimum* L. Characters, Journal of Natural Fibers, 17:9, 1345-1354
- A. Ceglar, R. van der Wijngaart, A. de Wit, R. Lecerf, H. Boogaard, L. Seguini, M. van den Berg, A. Toreti, M. Zampieri, D. Fumagalli, B. Baruth, 2019. Improving WOFOST model to simulate winter wheat phenology in Europe: Evaluation and effects on yield, Agricultural Systems, Volume 168, 2019, Pages 168-180
- Cross R.H, McKay S.A.B, McHughen A.G., Bonham-Smith P.C. 2003. Heat-stress effects on reproduction and seed set in *Linum usitatissimum* L. (flax). Plant Cell and Environment 26(7): 1013 - 1020
- Saxton K.E., Rawls W. Soil Water Characteristics – Hydraulic Properties Calculator.
<https://hrsl.ba.ars.usda.gov/soilwater/Index.htm>
- Thornthwaite C. W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. Geographical Review Vol. 38, No. 1 (Jan., 1948), pp. 55-94