

A) PARTE INTRODUTTIVA

1. INTRODUZIONE

Nel tempo che viviamo la ricerca e le realizzazioni sulle energie rinnovabili ed alternative a quelle dei combustibili fossili sono divenute sempre più intense e planetarie, perché legate al futuro esaurimento dei giacimenti di questi ultimi e dunque al loro costo, all'importanza strategica dell'energia nella vita moderna dell'uomo, ai rapporti geopolitici fra paesi produttori e paesi consumatori di petrolio. Le preoccupazioni per l'esaurimento delle risorse di energia fossile hanno portato, negli ultimi anni, una maggiore attenzione sulle fonti energetiche rinnovabili, che consentirebbero di utilizzare le risorse locali in modo sostenibile. Le scelte del settore, infatti, devono tenere conto, in maniera sempre crescente, delle ricadute ambientali del ciclo dell'energia e dei probabili rischi che esso comporta per la stabilità del clima globale. L'avvio dell'impegno politico della Unione Europea sulle energie rinnovabili è piuttosto recente e si può datare con la sottoscrizione del Protocollo di Kyoto del 1997, entrato in vigore però nel febbraio 2005 con scadenza nel 2012, e con la redazione da parte della Commissione Europea del Libro Bianco sulle fonti rinnovabili nel 1997 e del Libro Verde nel 2000 sull'approvvigionamento energetico con la finalità della riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra, causa principale dei cambiamenti climatici e del riscaldamento della Terra. Successivamente numerosi sono stati gli interventi programmatici e normativi. L'impegno mondiale su questo fronte è ormai ampio ed intenso, come appunto dimostra la recente, nel dicembre scorso, Conferenza ONU sul clima, nota come COP-15 (Conference of the Parties – 15), tenuta a Copenhagen, che ha prodotto la sottoscrizione da parte di 193 Nazioni di un Accordo internazionale per contenere entro i 2°C l'aumento del riscaldamento medio globale della terra. Tuttavia, a causa dei problemi riguardanti lo sviluppo economico di alcuni grandi paesi del mondo (Cina, India, Brasile, USA, Sudafrica), la decisione sulla percentuale di riduzione dell'emissione dei gas serra entro il 2050 (l'indicazione era del 50%) è stata rinviata al COP-16 a Città del Messico il prossimo anno. Le biomasse, prodotte e utilizzate in maniera ciclica, costituiscono una risorsa energetica rinnovabile e rispettosa dell'ambiente. In Italia esse contribuiscono già alla produzione di energia elettrica e di energia termica. Dal 2002 tutti i produttori e importatori di energia elettrica hanno l'obbligo di immettere in rete, ogni anno, elettricità prodotta da fonti rinnovabili pari almeno al 2% della quantità eccedente i 100 GWh. A causa dell'alta incidenza delle accise sui prodotti petroliferi e sul gas naturale, le biomasse ligno-cellulosiche si pongono in posizione di grande competitività nei confronti dei combustibili fossili. Da questo scenario

previsto scaturiscono preoccupazioni sia di ordine economico che di ordine ambientale. Per preservare in modo efficace gli equilibri dell'ecosistema si deve man mano promuovere la sostituzione dell'attuale modello energetico, basato sullo sfruttamento delle fonti fossili di energia con un modello di sviluppo sostenibile basato sull'uso di fonti di energia rinnovabile. Infatti, negli ultimi anni è andato crescendo l'interesse, nelle politiche comunitarie e nazionali, sul ruolo dell'agricoltura come "serbatoio" di fonti rinnovabili di energia e sull'opportunità di valorizzare le biomasse a fini energetici. Ciò rappresenta una rilevante opportunità sia per il settore agricolo e sia per quello forestale in quanto il punto di forza risulta essere la disponibilità di prodotti e sottoprodotti dai quali ottenere energia, ovvero colture specifiche, materie prime non alimentari derivanti da foreste e coltivazioni, residui agro-zootecnici ed agro-industriali. Nel complesso, tali risorse possono rappresentare, a livello nazionale, un'importante fonte di approvvigionamento energetico, mentre a livello locale, consentono di utilizzare in maniera vantaggiosa aree agricole abbandonate integrando il reddito agricolo e fornendo nuove opportunità di lavoro e di sviluppo economico (Giuca, 2008). In questo contesto si inseriscono le produzioni agroenergetiche ancora diffuse a livello sperimentale, il che non consente di definire un preciso mercato di riferimento. In particolare, la principale caratteristica commerciale delle biomasse riguarda il fatto che queste sono delle commodities, si tratta quindi di prodotti non differenziabili la cui competitività si basa esclusivamente sui prezzi. Inoltre, il produttore non ha la possibilità di influenzare il prezzo di mercato che sarà frutto dell'incontro della domanda e dell'offerta. Di conseguenza i fattori di competizione decisivi per le imprese saranno la produttività e la capacità dell'imprenditore di beneficiare di economie di scala che rendano bassi i costi di produzione (Frascarelli, 2007). Su questa base il prezzo non pregiudica, quindi, le prospettive delle colture agroenergetiche, lo sviluppo delle quali è, invece, strettamente subordinato alla presenza di impianti di trasformazione dislocati sul territorio nel raggio di pochi chilometri, ai contratti di filiera tra produttori e trasformatori, alla razionalizzazione delle tecniche colturali in modo da minimizzare i costi economici ed ambientali, alla possibilità di consociazioni tra i produttori di materia prima ed alla presenza di un adeguato sistema di incentivi, previsto sia in ambito comunitario che regionale (Fiorese *et al.*, 2007). Per le energie rinnovabili, come il solare, l'eolico, l'idrico, il geotermico, le tecnologie di produzione sono abbastanza mature ed industrialmente applicate, mentre sono i campi di utilizzazione che si vanno moltiplicando in relazione alle continue innovazioni prodotte dalla ricerca scientifica nei

settori delle tecnologie impiantistiche, della logistica distributiva, dell'economia produttiva. Per le agroenergie invece molti problemi riguardanti gli aspetti della produzione delle materie prime e della convenienza economica connessi con le attività agricole e forestali sono ancora irrisolti e/o da verificare. E specialmente nelle regioni meridionali dell'Italia ed in Sicilia in particolare, dove sulle agroenergie c'è una aspettativa di consistente sviluppo economico-sociale territoriale.

2. IL QUADRO NORMATIVO PER LE AGROENERGIE

2.1 Politica energetica ed agricola dell'Unione Europea

Nel corso degli ultimi anni l'Unione Europea ha preso coscienza e rafforzato il concetto che la lotta al cambiamento climatico è un'azione strategica da perseguire in sinergia con le politiche di ristrutturazione del settore energetico, al fine di promuovere un sistema economico-energetico sicuro, pulito e competitivo (Zezza, 2008). Il settore energetico risulta importante e fondamentale per contribuire al raggiungimento degli obiettivi della riduzione delle emissioni di gas serra oltre che uno dei principali settori dove l'innovazione tecnologica possa funzionare come motore di crescita economica secondo gli obiettivi di crescita ed occupazione fissati dalla Strategia di Lisbona in occasione del Consiglio europeo del marzo 2000 (Costantini, 2005). La firma nel dicembre del 1997, a conclusione della terza sessione plenaria della Conferenza delle parti (COP3), organo decisionale e di controllo dell'applicazione dell'United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), del Protocollo di Kyoto impegna i paesi industrializzati e quelli con economia in transizione a ridurre nel quinquennio 2008-2012 del 5,2% i livelli di emissioni dei principali gas con effetto serra prodotti dall'attività antropica. Il Piano di azione per l'efficienza energetica 2007-2012 dell'UE pone come obiettivi da raggiungere entro il 2020: la riduzione del consumo energetico del 20% (risparmio energetico), il raggiungimento di una quota del 20% di energia da fonti rinnovabili sul consumo di energia totale, il contenimento delle emissioni di CO₂ in atmosfera del 20%. Il cosiddetto principio del 20-20-20 entro il 2020. La Direttiva europea Res (sviluppo energie rinnovabili) 2009/28/CE stabilisce che il 10% dell'energia sviluppata nei trasporti entro il 2020 dovrà provenire da fonti rinnovabili. Gli obiettivi comunitari che si ispirano al "principio 20-20-20" oltre a lasciare ai Paesi membri ampia facoltà di scelta del proprio mix energetico, a fronte della messa a punto di Piani di azione nazionale con obiettivi

specifici saranno ripartiti in maniera differenziata e ponderata sulla base del meccanismo *bunder sharing* introdotto nell'ambito del Protocollo di Kyoto, che tiene conto delle posizioni di partenza dei singoli Paesi (Giuca, 2007). L'obiettivo europeo di impiegare o meglio consumare almeno il 20% di energia da fonti rinnovabili ha posto l'attenzione per lo sviluppo delle produzioni agroenergetiche, stimolato altresì dall'aumento dei prezzi dei combustibili fossili, dalla crescente dipendenza energetica da paesi instabili dal punto di vista politico che determina insicurezza nelle forniture energetiche e soprattutto notevoli fluttuazioni dei prezzi delle materie prime (Rosa, 2007). La crescita delle fonti energetiche rinnovabili diventa strategica non solo dal punto di vista economico ma anche per motivi ecologici, per la disponibilità di nuove tecnologie e capacità imprenditoriali utilizzabili per lo sviluppo economico ed occupazionale attraverso iniziative progettuali agroenergetici. In ambito comunitario la promozione delle fonti rinnovabili è contenuta in numerosi interventi programmatici e normativi realizzati a partire dalla metà degli anni '90, adottato dalla Commissione Europea con il Libro Verde "Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili" che si pone l'ambizioso obiettivo di raddoppiare entro il 2015 il contributo dell'energia rinnovabile al consumo interno lordo di energia consentendo la creazione di nuovi posti di lavoro (Costantini, 2008; CE, 1996). In base agli obiettivi intermedi previsti dalla UE l'Italia avrebbe dovuto già raggiungere una produzione lorda di energia da fonti rinnovabili del 22%, mentre a fine 2009 è del 16,5%; riguardo ai biocombustibili alcune regioni del Nord superano il 4% mentre le regioni del Sud sono in media al di sotto del 3%, che è l'obiettivo, rispetto al consumo totale, fissato per il 2009. La Sicilia si trova al 2,1%. Il Decreto Interministeriale (Ministero dello Sviluppo Economico di concerto con quelli dell'Ambiente, delle Finanze e delle Politiche Agricole) del 25 gennaio 2010 fissa le quote di biocarburanti da immettere obbligatoriamente al consumo a mezzo di miscele nelle benzine e nel gasolio: 3,5% nel 2010, 4% nel 2011, 4,5% nel 2012 (il consumo in Italia di benzina e gasolio per autotrazione nel 2009 è stato il 36 milioni di tonnellate), per cui sono da produrre 1,225 milioni di tonnellate nel 2010, 1,4 milioni di tonnellate nel 2011 e 1,57 milioni di tonnellate nel 2012. Questa imposizione è contraddetta dalla Legge finanziaria 2010 che diminuisce da 73 a 3,8 milioni di euro lo stanziamento per le agevolazioni sulle accise (defiscalizzazione) dei biocarburanti, riducendo così il contingente agevolato da 250.000 tonnellate a 18.000 tonnellate. E' probabile che la riduzione dell'aiuto rallenti il processo di produzione anche nelle regioni più virtuose del Nord e renda dunque più difficile il raggiungimento degli obiettivi prefissati. In Italia si è alla ricerca di prodotti

vegetali primari e di sottoprodotti dell'agricoltura e della silvicoltura da trasformare in agroenergia in processi economicamente convenienti con o senza il sostegno pubblico e senza interferire o con interferenza residuale con il mercato dei prodotti agroalimentari per il consumo umano e per l'alimentazione degli animali. Una previsione della società Assocantieri prevede un elevato aumento della domanda di biocombustibili rispetto agli obblighi di legge, che richiederà per il 2020 oltre 5 milioni di tonnellate di biodiesel e oltre 9 milioni di tonnellate di bioetanolo.

2.2 I biocarburanti nella Comunità Europea

In questo contesto i biocarburanti rappresentano la risposta più immediata all'obiettivo della Comunità Europea di aumentare la quota di energia derivante da fonti rinnovabili disponibili al suo interno, limitando così la dipendenza dai Paesi produttori e contribuendo alla riduzione dei gas serra. Il consumo totale di biocarburanti per il trasporto nel 2008 da parte dei Paesi UE è stato di 10.473.885 tep, pari a 2,5 Mtep (+31,4%) in più rispetto ai consumi del 2007 (7.968.982 tep). Complessivamente nel 2008 il consumo di biocarburanti corrisponde al 3,4% del totale consumo energetico di carburanti per il trasporto su strada nei Paesi UE. Esaminando la ripartizione dei consumi UE nel 2008 per tipologia di biocarburante, emerge la prevalenza del biodiesel (78,2%) sul bioetanolo (17,7%) e sugli altri biocarburanti (4,1%). Il biodiesel nel 2008 è cresciuto del 35,8% rispetto ai consumi del 2007 (6.032.420 tep) per un utilizzo totale di 8.194.218 tep. Nel 2008 anche l'impiego di bioetanolo per il trasporto è aumentato: il consumo finale nei Paesi UE è stato di 1.849.363 tep corrispondente ad un incremento del 54,5% circa rispetto agli utilizzi del 2007 (1.197.333 tep). I due Paesi europei protagonisti nel settore dei biocarburanti sono la Germania, con circa 28.500 persone direttamente ed indirettamente impiegate nel 2007 ed un consumo totale di 3.257.186 tep nel 2008, pari a circa il 31% di tutta l'UE, e la Francia con circa 6.100 posti diretti di lavoro nel 2007 e 2.424.200 tep di consumi nel 2008, pari a circa il 23% dei Paesi UE. I processi ed i materiali utilizzabili per la produzione di biocarburanti sono svariati, alcuni sono attualmente in uso, altri in via di sperimentazione o ancora oggetto di studio. E' presumibile che in un arco di tempo breve queste innovazioni saranno disponibili su vasta scala, aprendo così nuove prospettive al mercato dei biocarburanti ma anche al settore dell'agricoltura e dell'agroindustria.

In quest'ottica i biocarburanti possono essere distinti in:

- biocarburanti di I generazione
- biocarburanti di II generazione

I “biocarburanti di I generazione” sono quelli che nella fase attuale di sviluppo delle filiere bioenergetiche vengono ottenuti mediante processi ben noti:

- spremitura e transesterificazione a partire da semi di specie oleaginose o da oli e grassi animali residuati dalla cottura o frittura (biodiesel);
- fermentazione di zuccheri e amidi derivanti da colture zuccherine e amidacee quali canna da zucchero, frumento, mais etc. (bioetanolo e bio-ETBE),
- digestione di biomasse umide (biogas).

Il fatto che biodiesel e bioetanolo possono essere facilmente ricavati dalle più importanti specie agrarie coltivate (frumento, orzo, mais, colza, soia, girasole, sorgo da granella, barbabietola da zucchero, etc.) comporta implicazioni favorevoli di natura economica, tecnica e sociale, dal momento che si tratta di specie di solida ed antica tradizione; tuttavia la loro utilizzazione a fini energetici potrebbe determinare risvolti negativi a causa della lievitazione dei prezzi di queste derrate originata dalla competizione tra le due destinazioni. L'allarme per tali prospettive è stato lanciato proprio dai Paesi in via di sviluppo che vedono aumentare le difficoltà di approvvigionamento degli alimenti di base (Jean Ziegler, 2007). Al fine di evitare preoccupanti ripercussioni nel settore agroalimentare, una delle prospettive più promettenti è quella di utilizzare “biocarburanti di seconda generazione” che possono essere ricavati da biomasse lignocellulosiche (bioetanolo di seconda generazione) residue dal settore agricolo, forestale, industriale (alimentare, del legno) o da colture lignocellulosiche dedicate, di gran lunga più abbondanti e a buon mercato. Alcune delle tecnologie utilizzate sono già sperimentate nell'UE dove esistono tre impianti pilota in Svezia, Spagna e Danimarca, per la produzione di bioetanolo (COM 2006, 34). Tra le altre tecnologie che convertono la biomassa in biocombustibili liquidi figurano:

- la gasificazione e sintesi di biocarburanti a partire da materiale lignocellulosico (BTL da biomassa a liquidi; l'FT Diesel, diesel di sintesi derivato dal processo di Fischer Tropsch, biodimetil etero, etc);
- il trattamento con idrogeno di oli vegetali e grassi animali per la produzione di biodiesel trattato;

- la gasificazione di materiale lignocellulosico per la sintesi di biogas (SNG gas naturale sintetico);
- la gasificazione di materiale lignocellulosico per la sintesi di bioidrogeno (biogas potenziati).

Prescindendo dagli aspetti più squisitamente tecnologici ed economici, una valutazione generale sulle colture dedicate alla produzione di biomassa per energia deve comunque rispondere a obiettivi di natura agronomica (nuove colture e sistemi colturali in rapporto alle nuove direttive della Politica Agricola Comunitaria), di natura energetica (in rapporto all'energia ottenibile ed a quella impiegata per il suo ottenimento), di natura ambientale, dal momento che i risvolti positivi sulla riduzione delle emissioni, con particolare riferimento all'anidride carbonica nell'atmosfera, richiedono un contestuale rispetto dei parametri dell'agricoltura sostenibile.

2.3 I biocarburanti in Italia

La strategia italiana per l'impiego di biocarburanti sul territorio si basa su:

- il recepimento della normativa europea di riferimento, al fine del raggiungimento degli obiettivi stabiliti dall'UE;
- il provvedimento relativo alla costituzione di adeguate forme di incentivazione.

In particolare, si fa riferimento alla Direttiva 2003/30/CE, recepita con la Legge finanziaria 2007, che istituisce un quadro chiaro e preciso che traccia un percorso progressivo dal 2008 (con obiettivi per la miscelazione di biocarburanti del 2%), per concludersi nel 2010 con una percentuale di immissione al consumo pari al 5,75%. Alla fine del 2009, questi obiettivi sono stati rivisti e l'obiettivo per il 2010 è stato fissato nel 3,5%. Il raggiungimento degli obiettivi è basato sull'imposizione dell'obbligo nei confronti dei soggetti che immettono al consumo il combustibile fossile. Oltre alla strategia utilizzata dalla Legge finanziaria, il Governo fornisce garanzie per l'uso dei biocarburanti con l'adozione di due Decreti:

- Decreto Legge N.110, 29 aprile 2008, del MIPAAF, che esplicita le procedure per l'attuazione dell'obbligo di consumo di biocarburanti, individuando sia la qualità, sia gli enti soggetti all'obbligo;
- Decreto Legge N.100, 23 aprile 2008, dell'MSE, che stabilisce un quadro di sanzioni per chi non miscela biocarburanti.

La via scelta dall'Italia, per stimolare la domanda, è stata quella di utilizzare i quantitativi di biocarburanti con accise agevolate; in particolare, per quanto riguarda il bioetanolo, i primi incentivi risalgono al 2001. Ma è solo con le Leggi finanziarie per il 2007 ed il 2008 che sono stati stanziati i fondi per il periodo 2007-2010: infatti, sono stati previsti 73 milioni di euro per la riduzione dell'accisa sul bioetanolo, per un quantitativo pari a circa 250.000 tonnellate. Nel corso del 2009 il Governo ha ridotto gli incentivi disponibili; per il 2010 gli incentivi sono passati da 73 milioni di euro a soli 3,8 milioni di euro. Recentemente l'Italia ha recepito la Direttiva 2009/28/CE, che promuove l'uso di energie rinnovabili e biocarburanti per il trasporto, con il Piano di Azione Nazionale e con un Decreto Legislativo, che attualmente è in corso di pubblicazione sulla Gazzetta Ufficiale. L'obiettivo fissato da tale Direttiva è la sostituzione dei carburanti fossili nel settore dei trasporti di 2,35 Mtep entro il 2020, pari al 10%. A seguito della pubblicazione del Decreto Legislativo sarà stabilito un percorso per l'immissione al consumo al 2014 di biocarburanti pari al 5%, lasciando ampia flessibilità ai soggetti su cui grava l'obbligo in merito alla scelta della tipologia di biocarburante da impiegare ai fini del raggiungimento dell'obbligo stesso. La Direttiva 2009/30/CE, che introduce il concetto di sostenibilità nella produzione di biocarburanti, è in fase di recepimento. Tuttavia, il Decreto Legislativo in attesa di pubblicazione delinea già il quadro di sostenibilità dei biocarburanti, definendo sostenibili quelli che riducono in maniera sostanziale le emissioni di GHGs durante tutta la loro fase di produzione. Infatti, secondo i criteri di sostenibilità della Direttiva, non potranno essere computati ai fini del raggiungimento dell'obbligo quei biocarburanti che sono prodotti impiegando terreni ad elevata biodiversità, con alti stocks di carbonio o utilizzati per le filiere alimentari. È previsto un meccanismo premiante ai fini del raggiungimento dell'obbligo, per quei biocarburanti che sono prodotti all'interno dell'UE a partire dai rifiuti, dai residui non alimentari, dalle materie prime lignocellulosiche e dalle alghe. Nel 2009 la produzione italiana di bioetanolo è stata di 36.565 tep; tale produzione deriva dall'impiego di residui delle filiere agro-alimentari (e.g. vinacce provenienti dal settore vitivinicolo). La capacità attualmente installata è di 138.214 tep e gli impianti esistenti sono elencati nella tabella 1. Gli attuali meccanismi di incentivo non sono stati in grado di attivare delle filiere nazionali di produzione di bioetanolo da colture energetiche ed attualmente ci sono delle iniziative sporadiche, legate sostanzialmente alla sfera della R&S. L'attivazione delle filiere nazionali non può prescindere dal pieno coinvolgimento degli agricoltori e l'approccio verso impianti decentralizzati di taglia medio-piccola

favorisce questo processo di partecipazione. Al contempo devono essere sostenute le attività di R&S per ottimizzare quei processi, che permetteranno di convertire a bioetanolo i materiali residuali a base lignocellulosica (i.e. bioetanolo di 2^a e 3^a generazione).

Tabella 1: Lista degli impianti di bioetanolo in Italia

Nome	Località	Regione	Capacità (t/a)	Situazione
I.M.A. s.r.l.	Trapani	Sicilia	172.000	Realizzato
Caviro s.r.l.	Faenza	Emilia Romagna	43.000	Realizzato
Mossi&Ghisolfi s.r.l.	Tortona	Piemonte	45.000	Progetto
Totale			260.000	

2.4 La politica comunitaria e regionale per le agro energie

I settori agricolo e forestale giocano un ruolo importante nella produzione di energia rinnovabile in sostituzione dei tradizionali combustibili fossili per la produzione di energia elettrica, termica e meccanica. L'interesse economico elevato trova corrispondenza all'interno delle strategie settoriali perseguite, i cui obiettivi sono stati oggetto di una profonda revisione, testimoniato dall'evoluzione dei principi che hanno ispirato i successivi processi di riforma cui è stata sottoposta la Politica Agricola Comune (PAC) nel corso dell'ultimo ventennio (Sardone, 2008). Si è progressivamente affermato il concetto della multifunzionalità dell'agricoltura europea, associato all'individuazione di un modello agricolo che si è evoluto nel tempo, acquisendo rilevanza come fattore di giustificazione del sostegno finanziario assicurato per il tramite della PAC. Ciò è legato al fatto che, nonostante il progressivo ridimensionamento del peso della PAC all'interno del bilancio comunitario, l'intervento a favore del settore agricolo detiene ancora un ruolo significativo (INEA, 2006). Gli interventi posti in essere all'interno della politica agricola, tramite gli interventi sui mercati agricoli, realizzati nell'ambito delle diverse Organizzazioni Comuni di Mercato (OCM), comunemente identificate come le azioni del I pilastro della PAC, e quelle per il sostegno allo sviluppo delle aree rurali, il II pilastro 4, rappresentano un evidente segno di attenzione al sostegno delle produzioni a finalità energetica, anche se nel complesso è da evidenziare una certa debolezza della visione strategica sul settore primario in relazione al conseguimento degli obiettivi di politica energetica (Sardone, 2008). Con Agenda 2000 il legame tra politica agricola e politica energetica è reso più evidente e diventa esplicito con la revisione di medio termine della PAC del 2003 che come è noto tende a spostare il contributo comunitario all'agricoltura dal prodotto al produttore e a

rafforzare lo sviluppo rurale e migliorare la competitività dell'agricoltura europea. Nell'ambito della riforma Fischler ed in particolare del Reg. CE 1782/2003, del Consiglio del 29 settembre 2003, che stabilisce norme comuni relative ai regimi di sostegno diretto nell'ambito della politica agricola comune ed istituisce taluni regimi di sostegno agli agricoltori, noto anche come regolamento orizzontale, viene dedicato un ampio spazio all'integrazione dell'ambiente all'interno della politica di intervento a sostegno del settore agricolo. Ciò viene realizzato attraverso un collegamento tra l'acquisizione del diritto a beneficiare dell'aiuto erogato sotto forma di pagamento unico, all'interno del quale confluiscono molti dei preesistenti regimi di pagamento diretto garantiti agli agricoltori, rispettando i criteri di gestione obbligatori e mantenendo le superfici agricole in buone condizioni agronomiche ed ambientali. Un forte impulso allo sviluppo delle produzioni agro energetiche è avvenuto propriamente con il Reg. CE 1782/2003 che concede il sostegno al reddito svincolato dalla produzione agricola; nel dettaglio, la normativa, da un lato, consente il mantenimento del regime di deroga alla coltivazione di colture energetiche sui terreni sottoposti al regime del set-aside obbligatorio, dall'altro offre la possibilità ai produttori agricoli, in virtù di quanto previsto dal Titolo IV "Altri regimi di aiuto", Capitolo 5 (artt. 88-92) dello stesso regolamento orizzontale, di adeguare le loro produzioni alle esigenze del mercato energetico, essendo queste equiparate alle attività connesse, e beneficiare di un "aiuto per le colture energetiche" nella misura di 45 euro/ha, purché non si superi a livello comunitario la Superficie Massima Garantita (SMG) di 1.500.000 di ettari, soglia che è stata innalzata a 2 milioni di ettari a seguito dell'estensione del regime di aiuti anche ai nuovi 10 Paesi membri con il conseguente incremento della disponibilità di spesa. I due regimi di sostegno previsti per le colture energetiche sono da considerarsi alternativi e pertanto i relativi aiuti non sono cumulabili. Al fine di poter usufruire dell'aiuto, gli agricoltori devono dimostrare di aver sottoscritto un contratto con l'industria di trasformazione, per l'intera produzione realizzata sulle superfici per le quali si chiede l'aiuto, salvo i casi in cui la trasformazione stessa sia effettuata dall'agricoltore all'interno della propria azienda agricola. La nuova filosofia comunitaria incardinata sulla multifunzionalità e sulla condizionalità dell'azienda agricola, assume come contributo integrante dello sviluppo rurale, l'espletamento da parte degli operatori del settore primario di compiti, funzioni ed altre attività sinergiche alle attività agricole, organizzate in modelli di integrazione verticale tra le filiere agro energetiche ed orizzontale tra aziende appartenenti ad una stessa area produttiva (Rosa, 2007). Misure di sostegno a favore delle

agro energie si trovano anche all'interno della politica di sviluppo rurale e della specifica regolamentazione applicativa (Reg. CE 1698/2005). L'attuazione della politica di sviluppo rurale avviene attraverso degli specifici programmi attuati a livello di singoli Stati membri che eseguono la strategia di sviluppo rurale attraverso una serie di misure. Il raggiungimento degli obiettivi può avvenire attraverso la presentazione di un unico programma per l'intero territorio oppure di specifici programmi regionali. In tale contesto l'Italia, potendo scegliere, ha optato per la seconda soluzione presentando 21 Programmi di Sviluppo Rurale (16 PSR Competitività e 5 PSR Convergenza) e un Programma nazionale di coordinamento "Rete rurale". La Regione Sicilia con Decisione della Commissione europea (2008) 735 del 18/02/2008 ha avuto approvato il Programma di Sviluppo Rurale della Regione Sicilia 2007-2013 che si pone di "perseguire, attraverso un equilibrato uso delle risorse, l'obiettivo di migliorare la competitività e l'attrattività delle zone rurali della Sicilia come luogo in cui investire, lavorare, creare nuovi e migliori posti di lavoro nonché vivere con uguali opportunità rispetto ad altre zone" (Regione Siciliana, 2008a). Il Programma risulta essere molto articolato e ricco di misure volte ad aumentare la competitività delle imprese, a tutelare il territorio salvaguardando l'ambiente, alla diversificazione delle attività nel contesto rurale che per le agro energie concorrono tutte all'obiettivo di accrescere l'incidenza delle fonti energetiche rinnovabili rispetto a quelle tradizionali, ottimizzando non solo il sistema produttivo e distributivo, ma intervenendo al contempo anche sulla politica della domanda, attraverso azioni di comunicazione per informare ed orientare il consumatore verso temi relativi alla sostenibilità ambientale (Regione Siciliana, 2008a).

3. LA BIOMASSA COME FONTE ENERGETICA

A partire dai primi anni novanta, sia sul piano della ricerca che sul piano politico, si è registrato un crescente interesse verso le cosiddette new crops (colture alternative) e a questo cambiamento di indirizzo a livello comunitario ha sicuramente contribuito anche l'esigenza di contenere le eccedenze alimentari determinatesi a seguito di una politica prevalentemente orientata alla produzione e l'urgenza di garantire sul piano ambientale pratiche ecologicamente più rispettose, così come dichiarato dalla Riforma PAC del 1992 (Commissione Europea, 1996). I processi decisionali in campo politico, economico e sociale hanno così iniziato a perseguire obiettivi comuni volti alla diversificazione degli

assetto produttivi agroforestali convenzionali e alla definizione di nuovi modelli di sviluppo dei territori agricoli; al tempo stesso hanno preso avvio attività di ricerca applicate alle filiere no-food. Nel corso dell'ultimo decennio si è comunque sempre più consolidata una visione multifunzionale dell'agricoltura, formalmente riconosciuta come tale in occasione della Conferenza di Cork (1996) e in seguito accolta da Agenda 2000 (1999); tale multifunzionalità si manifesta tra l'altro attraverso:

- la conservazione di pratiche atte a tutelare il paesaggio rurale e a mantenere le sistemazioni idraulico-agrarie, anche in territori predisposti a fenomeni di marginalizzazione;
- la conversione verso modelli colturali a basso input, per l'adozione di metodi colturali integrati e biologici, ma anche grazie a orientamenti produttivi meno chimicizzati per la rusticità e per l'adattabilità delle specie;
- produzioni con finalità non alimentari che permettono di derivare materie prime a sostituzione dei prodotti di sintesi e l'utilizzazione a tali fini dei sottoprodotti colturali e agroindustriali.

Le colture energetiche giocano dunque, o possono giocare, un ruolo strategico di particolare rilievo nelle attuali politiche agricole, anche alla luce del fatto che le traiettorie di sviluppo da esse derivabili rappresentano una possibile alternativa alle produzioni agricole alimentari, per le quali sono prevedibili a breve situazioni assai complesse sul piano della competitività economica, soprattutto a causa dell'allargamento dei mercati e di una prevedibile minore protezione delle produzioni comunitarie. A livello globale, circa il 50% dei residui potenzialmente disponibili è originato nel settore forestale. Il 40% proviene dal settore agricolo, mentre il restante 10% è rappresentato da reflui zootecnici. La materia prima vegetale può infatti essere prodotta da apposite coltivazioni energetiche e la produzione costante di risorse energetiche da coltivazioni agricole viene definita Agro energia. La realizzazione di coltivazioni energetiche interagisce con il territorio utilizzato. Da una parte, infatti, un'accurata gestione durante la produzione delle biomasse consente di contrastare i fattori di degrado ambientale e territoriale, dall'altra, la stessa capacità di produrre biomasse è determinata dallo stato di vitalità, sia fisica che socio-economica, del territorio. La corretta gestione delle risorse territoriali consente, dunque, di disporre di una certa quantità di materia prima organica per usi energetici, agevolando la stabilità socio-ambientale e la crescita economica delle zone rurali coinvolte. La coltivazione di alcune specie erbacee e legnose si presenta come una valida soluzione per l'approvvigionamento

della biomassa. Attraverso produzioni energetiche di origine agricola è infatti possibile disporre di prodotti vergini, materiali agroforestali e relativi sottoprodotti utilizzabili come materia prima per la produzione di bioenergia, che dal punto di vista energetico risultano avere miglior rendimento rispetto ai residui organici. La diffusione delle colture da biomassa, infine, ha recentemente trovato un ulteriore credibile incentivo nell'evoluzione tecnologica che ha reso possibili opzioni un tempo improponibili per le diverse fasi della filiera bioenergetica.

3.1 Definizione di biomassa

“Biomassa” è un termine che riunisce una grande quantità di materiali, di natura estremamente eterogenea. In forma generale, si definisce biomassa tutto ciò che possiede matrice organica e che deriva da processo di organizzazione fotosintetica della CO₂, con esclusione delle plastiche e dei materiali fossili (Foti e Cosentino, 2001). La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili, ovvero trasformati in altre sostanze (solide, liquide o gassose) di più facile utilizzo, negli impianti di conversione. Altre forme di biomassa possono, inoltre, essere costituite dai residui delle coltivazioni destinate all'alimentazione umana o animale (paglia), o piante espressamente coltivate per scopi energetici. Le più importate tipologie di biomassa sono residui forestali, scarti dell'industria di trasformazione del legno (trucioli, segatura, ecc.), scarti delle aziende zootecniche, scarti mercatali e rifiuti solidi urbani (Foti e Cosentino, 2001). La biomassa è ampiamente disponibile ovunque e rappresenta una risorsa locale, pulita e rinnovabile. La brevità del periodo di ripristino fa sì che le biomasse rientrino tra le fonti energetiche rinnovabili, in quanto il tempo di sfruttamento della sostanza è paragonabile a quello di rigenerazione. Poiché nel concetto di rinnovabilità di una fonte energetica è insita anche la sostenibilità ambientale, sarà necessario che le biomasse, con particolare riferimento a quelle di origine forestale, provengano da pratiche aventi impatto ambientale trascurabile o nullo (es. le operazioni di manutenzione boschiva). Non sono invece considerati biomasse alcuni materiali, pur appartenenti alla chimica organica (come le materie plastiche e i materiali fossili), perché non rientrano nel concetto con cui si intendono i materiali organici qui presi in considerazione. Quando si bruciano le biomasse (ad esempio la legna), estraendone l'energia immagazzinata nei componenti chimici, l'ossigeno presente nell'atmosfera si combina con il carbonio delle piante e produce, tra l'altro, anidride

carbonica, uno dei principali gas responsabile dell'effetto serra. Tuttavia, la stessa quantità di anidride carbonica viene assorbita dall'atmosfera durante la crescita delle biomasse. Il processo è ciclico. Fino a quando le biomasse bruciate sono rimpiazzate con nuove biomasse, l'immissione netta di anidride carbonica nell'atmosfera è nulla. La biomassa utilizzabile ai fini energetici consiste in tutti quei materiali organici che possono essere utilizzati direttamente come combustibili ovvero trasformati in combustibili solidi, liquidi o gassosi. Sono quindi biomasse, oltre alle essenze coltivate espressamente per scopi energetici, tutti i prodotti delle coltivazioni agricole e della forestazione, compresi i residui delle lavorazioni agricole e della silvicoltura, gli scarti dei prodotti agro-alimentari destinati all'alimentazione umana o alla zootecnia, i residui, non trattati chimicamente, dell'industria della lavorazione del legno e della carta, tutti i prodotti organici derivanti dall'attività biologica degli animali e dell'uomo, come quelli contenuti nei rifiuti urbani (la "frazione organica" dei Rifiuti). Nell'accezione più generale si può quindi considerare Biomassa tutto il materiale di origine organica sia vegetale, sia animale. Fra le fonti rinnovabili, le biomasse rappresentano una delle soluzioni più interessanti nella ricerca di nuove risorse energetiche rinnovabili, nel breve-medio periodo, per almeno tre ragioni:

- possibilità di produrre energia con investimenti relativamente modesti;
- costituire un'alternativa alle colture tradizionali non in grado di reggere la concorrenza di un mercato ormai globalizzato;
- immagazzinare quantità rilevanti di carbonio nel suolo (e quindi usufruire dei *certificati verdi*, cioè bonus economici scaturiti dal Protocollo di Kyoto).

3.2 Classificazione delle colture da biomassa

Le specie utilizzabili per la produzione di biomassa devono avere come principale valenza agronomica un elevato tasso di crescita, non essendo richieste altre particolari caratteristiche qualitative del prodotto. E' consigliabile orientarsi negli ambienti mediterranei verso quelle specie che manifestino particolare adattabilità e tollerabilità alle varie situazioni sia pedoclimatiche che biologiche (resistenza ai vari infestanti, parassiti, agenti patogeni) che possono ridurre l'efficienza produttiva. Per questo motivo si ritiene che specie autoctone possano garantire meglio di altre i risultati attesi.

Le colture da biomassa vengono convenzionalmente divise in tre filiere:

- quella ligno-cellulosica, di cui fanno parte le colture da biomassa e i residui delle coltivazioni;

- la filiera delle colture da biocombustibili che si suddivide in colture oleaginose, come colza e girasole, e colture zuccherine, come la canna da zucchero;
- infine il biogas, che si ottiene dalla fermentazione dei residui di origine animale o delle sostanze organiche, presenti nelle tonnellate di immondizia ammassate all'interno delle discariche (Iaboni e De Stefanis, 2003).

3.3 Componenti chimiche delle biomasse

Le biomasse vegetali sono costituite da composti ad alto peso molecolare, quali la cellulosa, l'emicellulosa, la lignina e da altre sostanze, relativamente più semplici, come gli estrattivi di natura organica ed inorganica (ceneri). Le loro quantità relative variano a seconda della specie e dell'età della pianta.

3.3.1 Cellulosa

La cellulosa è il maggiore costituente della biomassa ligno-cellulosica (30-60% in peso). L'instaurarsi di legami ad idrogeno tra le catene determina la formazione di domini cristallini che impartiscono resistenza ed elasticità alle fibre vegetali (Figura 1). La cellulosa è un polisaccaride omogeneo, che si differenzia dall'amido in quanto formato da b-glucosio, dove le singole molecole, con un legame B-1,4, sono ruotate l'una rispetto l'altra di 180°; il fatto che ogni molecola sia ruotata di 180° rispetto a quella con cui è legata, fa sì che la molecola di cellulosa assuma una struttura lineare; tale rotazione non avviene nel caso dei legami α -1,4 dell'amido, ed è questo il motivo per cui l'amilosio, costituito da legami α -1,4 di α -glucosio, ha una struttura non lineare ma spiraliforme. In natura si trova allo stato puro solo nelle piante annuali come cotone e lino, mentre nelle piante legnose è sempre accompagnata da emicellulosa e lignina.

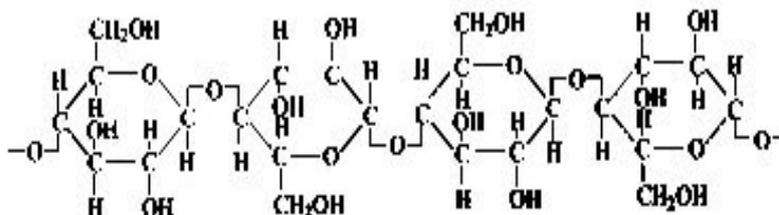


Figura 1: Fibre di cellulosa

3.3.2 Emicellulosa

L'emicellulosa costituisce il 10-40% della biomassa ligno-cellulosica, si presenta come un polimero misto, relativamente corto (da 10 a 200 molecole) e ramificato, formato sia da zuccheri a sei atomi di carbonio (glucosio, mannosio, galattosio) sia da zuccheri a cinque atomi di carbonio (xilosio e arabinosio). Alla presenza dell'emicellulosa si devono alcune importanti proprietà delle fibre, la principale delle quali è quella di favorire l'imbibizione delle stesse, quando è presente l'acqua, che ne provoca il rigonfiamento. L'emicellulosa presenta proprietà adesive, pertanto tende a cementare o a diventare di consistenza cornea con la conseguenza che le fibre diventano rigide e si imbibiscono più lentamente.

3.3.4 Lignina

La lignina, è uno dei costituenti principali dei vegetali poiché ne rappresenta il 10-30% della massa, in dipendenza della specie. La sua principale funzione consiste nel legare e cementare tra loro le varie fibre per conferire compattezza e resistenza alla pianta, costituisce inoltre, una protezione contro insetti, agenti patogeni, lesioni e luce ultravioletta. Viene utilizzata principalmente come combustibile, ma attualmente trova largo impiego nell'industria come disperdente, indurente, emulsionante, per laminati plastici, cartoni e manufatti in gomma. Inoltre può essere trattata chimicamente per produrre composti aromatici, tipo vanillina, siringaldeide, β - idrossibenzaldeide, che possono essere usati nella chimica farmaceutica, nell'industria cosmetica e alimentare.

3.3.5 Ceneri

Per ceneri si intende il materiale inorganico che rimane dopo la combustione del campione in condizioni standard. La presenza della ceneri incide sulla frazione combustibile della biomassa:

- minore potere calorifico;
- maggiore quantità di materiale solido da smaltire (costi);
- formazione ed emissione di incombusti, ossia di materiale particellare nei gas di combustione;
- fenomeni di erosione, corrosione e incrostazione degli impianti (Cl e sostanze alcaline).

4. FILIERA AGROENERGETICA

Il termine filiera, indica l'insieme delle azioni che collegano la fase di produzione delle biomasse a quelle di trasporto, trasformazione ed utilizzo. Le filiere agro energetiche da promuovere in quanto ecosostenibili devono essere corte (nello spazio) e brevi (nel tempo), devono garantire un bilancio energetico positivo e di produzione complessiva di CO₂ negativo o nullo, non devono prescindere dal contributo che le buone pratiche agricole possono dare alla fissazione al suolo del carbonio, alla lotta alla desertificazione e all'erosione, al processo di graduale sostituzione dei concimi chimici e al miglioramento della qualità dei suoli, mediante, ad esempio, l'uso in agricoltura di ammendanti prodotti dal compostaggio delle biomasse ad elevata umidità. Si parla di filiera corta quando "biomassa e biogas sono prodotti entro il raggio di 70 km dall'impianto di produzione dell'energia elettrica. Ma non essendoci al momento normativa, direttive, circolari o quant'altro da assumere a riferimento, che ne stabiliscano obbligatoriamente queste caratteristiche, si pone, per chi si trova a valutare l'autorizzabilità di determinati progetti che prevedono il loro sfruttamento, il problema di come considerare questi criteri di ecosostenibilità. Criteri che rappresentano, come già detto, una sorta di spartiacque per la classificabilità delle biomasse fra le FER. C'è la consapevolezza nel nostro operato che i suddetti criteri in assenza di un qualche documento normativo, non possano di fatto essere considerati "prescrittivi" e vincolanti, e tutt'al più possono al massimo essere considerati non altro che direttive, indirizzi, raccomandazioni, nelle more di un qualche atto nazionale e/o regionale che li assuma come invarianti del sistema e delle filiere agro energetiche. La filiera corta si contraddistingue per le seguenti caratteristiche:

- numero ridotto di intermediari che partecipano alla ripartizione della marginalità globale prodotta;
- è l'agricoltore a governare, ed è coinvolto in tutte le fasi della filiera, da quella iniziale quella finale;
- si realizza l'equilibrio tra domanda ed offerta;
- l'approvvigionamento delle biomasse non richiede grandi spostamenti;
- l'imprenditore agricolo (singolo o associato) produce le colture energetiche, le destina ad una propria piattaforma energetica ed utilizza/colloca sul mercato (autoconsumo/vendita) l'energia prodotta;
- il reddito generato è in capo all'imprenditore agricolo e rientra nel mix dei redditi delle colture destinate al mercato del food;

L'agricoltore dunque da utente a produttore di energia da fonti rinnovabili. In base al D.L.2/2006 le differenti forme di energia rinnovabile prodotte in ambito agricolo sono riconosciute "prodotto agricolo" e come tale possono contribuire alla formazione della PLV aziendale con lo stesso trattamento fiscale delle produzioni destinate al food. Occorre comunque precisare che all'agricoltore non convenga produrre soltanto energia, come avviene invece nella filiera lunga. Si parla di filiera lunga se si usa materia prima vegetale prodotta a una distanza superiore ad esempio, l'olio di palma. Un esempio di filiera lunghissima è quella di una centrale termoelettrica da 20 MWe di un'industria metallurgica Italiana che importa cippato dal Brasile o dal Canada. In questo caso produttore e consumatore non sono direttamente connessi, possono avere logiche commerciali diverse, può esserci una limitata garanzia sia per il produttore agricolo che per il consumatore italiano, infatti in un mercato molto poco trasparente risulta difficile reperire un altro fornitore o un altro cliente. Nella filiera lunga, l'agricoltore s'impegna contrattualmente per un periodo normalmente lungo con il Soggetto Economico che esercita l'attività di produzione e vendita di energia. Il profitto si concentra nella fase terminale senza alcuna ricaduta sul bilancio dell'agricoltore.

Le filiere possibili sono:

- colture oleaginose (colza, soia, girasole, ecc.) per la produzione di oli e biodiesel;
- biomasse e colture zuccherine (barbabietola, mais, sorgo zuccherino, melasse, ecc.) per la produzione di bioetanolo e derivati;
- effluenti zootecnici e materiale vegetale di diversa natura ed origine per produrre biogas;
- biomasse lignocellulosiche per la produzione di energia termica e/o elettrica.

A prescindere dalla filiera ipotizzata, le biomasse impiegate si possono in generale dividere in materie prime (colture dedicate arboree ed erbacee) e materiale residuale proveniente dal comparto agro-forestale (paglie e stocchi dei cereali, potature di vigneti, oliveti, frutteti, verde urbano, prodotti dell'attività silvicolturale) ma anche da quello industriale (industria del legno, agroalimentare e industria della carta). Delle filiere agro energetiche si sono occupati diversi documenti comunitari: (Libro Verde dell'UE, Piano d'Azione per la biomassa, direttiva 01/77/CE per la promozione dell'energia elettrica da fonti rinnovabili, recepita in Italia nel 2004, direttiva 03/30/CE per la promozione dell'uso dei biocarburanti da trazione e la direttiva 03/96 relativo alla tassazione dei prodotti energetici e dell'elettricità recepite in Italia dalla legge 06/81, Comunicazione CE 2006

“Strategia della UE per i biocarburanti”). Le recenti decisioni del Consiglio Europeo sul tema delle energie rinnovabili hanno aperto importanti prospettive di sviluppo in relazione agli obiettivi molto ambiziosi da raggiungere entro il 2020. Tuttavia, l’esigenza di realizzare sistemi produttivi sostenibili comporta la necessità di definire per la realtà Italiana un nuovo modello di sviluppo che tenga conto delle modeste superfici da *commodities* e dei costi di produzione nettamente superiori rispetto ad altre realtà comunitarie ed extracomunitarie. La necessità di definire, per le diverse filiere agro-energetiche da colture dedicate, dei parametri riferiti alla sostenibilità ambientale della filiera, è divenuto un obiettivo primario da perseguire nel breve periodo. Il ricorso a tecniche a ridotti input e la scelta di nuove colture, in funzione dell’areale di coltivazione e dell’utilizzazione integrale delle produzioni sono alcuni degli obiettivi fondamentali per definire filiere virtuose da un punto di vista economico ed ambientale. Quindi all’interno di questi tre grandi raggruppamenti delle filiere (corta, lunga ed integrata) esistono varie filiere caratterizzate dal tipo di combustibile (solido, liquido, gassoso) o dalle modalità di impiego e che talvolta sono in concorrenza tra loro. Essendo questo un settore in forte evoluzione, le diverse filiere sembrano essere scoperte una dopo l’altra con picchi di interesse che spesso volte sotto lo stimolo degli incentivi non tengono conto dei vincoli esistenti. Tema fondamentale per la creazione di filiere agro-energetiche in Italia è la disponibilità di biomasse. Fattori critici per la creazione di filiere in Italia sono:

- la grande diversità nella tipologia di biomassa;
- sviluppo di infrastrutture e tecnologie;
- a potenziale produttività va condivisa con altri settori (agricolo, industria della carta, delle costruzioni e dei mobili).

Non bisogna dimenticare inoltre come in questo mercato sono presenti oltre ad operatori di paesi industrializzati che gestiscono le produzioni in modo corretto e sostenibile, operatori di aree tropicali che forniscono materiale proveniente da foreste naturali.

4.1 Le “colture dedicate”

Le specie utilizzabili per la produzione di biomassa sono potenzialmente molto numerose dato che, non essendo richieste particolari caratteristiche qualitative del prodotto, la principale valenza agronomica delle diverse specie utilizzate consiste nell’elevato tasso di crescita della coltura; in realtà appare opportuno che la scelta ricada su specie *autoctone* che manifestano elevata adattabilità e tollerabilità alle condizioni ambientali locali.

Caratteristiche pedoclimatiche e biologiche (resistenza a vari infestanti, parassiti, agenti patogeni) possono fortemente influire sull'efficienza produttiva. Le colture dedicate possono essere di diverso tipo:

- specie coltivate o presenti allo stato spontaneo in altri areali;
- specie spontanee presenti nell'areale ma finora mai coltivate ;
- specie coltivate per altre destinazioni.

Comune denominatore è, per tutte, l'adozione di sistemi di coltivazione a ridotto impiego di mezzi tecnici. Le colture dedicate, si suddividono in:

1) Arboree da energia (Short Rotation Forestry): ossia piante arboree a rapido accrescimento che, impiantate con un elevato grado di fittezza e gestite con idonee tecniche colturali, vengono ceduate e raccolte con turni di taglio assai più frequenti rispetto alle più tradizionali utilizzazioni del prodotto legnoso. Dalle esperienze condotte finora in Italia, risultano come specie particolarmente adatte il pioppo, il salice, la robinia, pur manifestando differenti capacità di adattamento alle condizioni agropedoclimatiche, soprattutto in termini di disponibilità idriche, e l'eucalipto, che si è talvolta caratterizzato per una maggiore sensibilità alle basse temperature invernali e ai ritorni di freddo primaverili.

2) Erbacee da energia: Colture erbacee poliennali o annuali, tra cui sono identificabili come specie particolarmente adatte alle nostre realtà regionali il miscanto e la canna comune e il sorgo da fibra. Presentano buone potenzialità anche il cardo (soprattutto nelle aree centromeridionali o dove la disponibilità idrica è limitata) e alcune graminacee che recentemente stanno riscuotendo particolare interesse a livello internazionale (ad esempio, *Panicum* spp., *Phalaris* spp.) (Figura 2).

3) Oleifere da energia : dall'esterificazione di oli vegetali di colza, girasole e soia si ottiene il biodiesel, con proprietà e prestazioni simili a quelle del gasolio minerale. Il biodiesel si caratterizza per l'assenza di zolfo e di composti aromatici, il contenimento del particolato fine (Pm10) e la capacità di contribuire alla riduzione dell'effetto serra. Le colture più facilmente adattabili agli ambienti pedoclimatici italiani sono rappresentate dal girasole e dalla colza, per i quali sono già stati messi a punto indirizzi di scelta varietale e di tecnica colturale a basso impatto ambientale e a basso costo (Figura 3).

4) Colture da carboidrati: dalle colture zuccherine si produce, per fermentazione dei carboidrati, il bioetanolo che viene addizionato alle benzine, previa trasformazione in etil-tertiobutiletere. Tra le specie impiegabili, quelle più sperimentate e diffuse sono la canna

da zucchero, il frumento, il sorgo e il mais (ma altre colture di un certo interesse possono essere rappresentate anche dalla barbabietola da zucchero e dal topinambur) (Figura 4).

Colture ligno-cellulosiche

erbacee
annuali



poliennali



legnose



Figura 2: Immagini rappresentative di colture ligno-cellulosiche

Colture oleaginose

erbacee
annuali



Figura 3: Immagini rappresentative di colture oleaginose

Colture da carboidrati
erbacee
annuali



Figura 4: Immagini rappresentative di colture da carboidrati.

4.2 I processi di trasformazione

L'utilizzo delle biomasse presenta una grande variabilità in funzione dei tipi dei materiali disponibili e, nel tempo, sono state sviluppate molte tecnologie di conversione energetica, delle quali alcune possono considerarsi giunte ad un livello di sviluppo tale da consentirne l'utilizzazione su scala industriale, altre, invece, più recenti e molto complesse, necessitano di ulteriore sperimentazione al fine di aumentare i rendimenti e ridurre i costi di conversione energetica. L'energia contenuta nelle biomasse vegetali può essere convertita adottando processi:

- termochimici;
- biologici;
- fisici.

Il risultato finale ad eccezione della combustione diretta è un prodotto ad alta densità energetica utilizzabile con maggiore facilità e flessibilità in successivi processi di conversione energetica. I processi utilizzati attualmente sono riconducibili a due categorie:

processi **termochimici** e processi **biochimici**.

Processi termochimici: I processi di conversione termochimica sono basati sull'azione del calore che permette le reazioni chimiche necessarie a trasformare la materia in energia e sono utilizzabili per i prodotti ed i residui cellulosici e legnosi in cui il rapporto C/N abbia valori superiori a 30 ed un contenuto di umidità che non superi il 30% (tali valori sono indicativi di riferimento). Ad esempio, 1 kg di legna secca (15% umidità residua) fornisce 4,3 kWh di energia e, quindi, 3 kg di legno equivalgono ad 1 kg di gasolio mentre 2,3 kg di legno corrispondono a 1 m³ di metano. Il più semplice dei processi termochimici consiste nell'ossidazione completa del combustibile a H₂O e CO₂ ed è la combustione diretta attuata in caldaie in cui avviene anche lo scambio di calore tra i gas di combustione ed i fluidi di processo. La Carbonizzazione è un processo di pretrattamento del materiale vegetale che consiste nell'alterazione termochimica della biomassa mirato a conferirle migliori caratteristiche mediante somministrazione di calore in presenza di poco ossigeno e la conseguente eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili non combustibili dalla materia vegetale. Un ulteriore processo di degradazione termochimica di materiali organici è la pirolisi: attraverso l'azione del calore, a temperature elevate (tra 400 e 800°C) e in completa assenza degli agenti ossidanti (aria o ossigeno) o con una ridottissima quantità di ossigeno (in questo caso il processo può essere descritto come una parziale gassificazione) si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi che successivamente vengono utilizzati come combustibili. La gassificazione consiste nella trasformazione in combustibile gassoso di un combustibile solido o liquido, nel caso specifico della biomassa, attraverso una decomposizione termica (ossidazione parziale) ad alta temperatura (900÷1.000°C). Il gas prodotto è una miscela di H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O (vapore acqueo) e N₂, accompagnati da ceneri in sospensione e tracce di idrocarburi (C₂H₆). Per rendere economicamente più valido questo processo si può trasformare il gas in alcool metilico (CH₃OH), che può essere impiegato per l'azionamento di motori. Il metanolo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore dell'ordine di 21.000 kJ/kg, può essere successivamente raffinato per ottenere benzina sintetica, con potere calorifico analogo a quello delle benzine tradizionali. La steam explosion (SE) è un trattamento innovativo, a basso impatto ambientale, mediante il quale si può ottenere una vasta gamma di prodotti, utilizzando come materia prima le biomasse vegetali. Rispetto agli altri processi di pretrattamento, la SE presenta il vantaggio fondamentale di separare in tre differenti correnti le frazioni costituenti i comuni substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa, lignina) rendendo possibile l'utilizzazione totale

delle biomasse, attraverso l'uso di vapore saturo ad alta pressione per riscaldare rapidamente legno, o qualsiasi altro materiale lignocellulosico, all'interno di un reattore. Si citano anche la Co-Combustione e la Co-Gassificazione volti a utilizzare nello stesso impianto le biomasse insieme a combustibili tradizionali come il carbone o i derivati dal petrolio.

Processi biochimici: I processi di conversione biochimica sono dovuti al contributo di enzimi, funghi e microrganismi, che si formano nella biomassa in particolari condizioni e vengono preferenzialmente impiegati per quei substrati in cui il rapporto C/N sia inferiore a 30 e l'umidità alla raccolta superiore al 30%. La digestione anaerobica è un processo di fermentazione della materia organica ad opera di microrganismi in assenza di ossigeno; consiste nella demolizione delle sostanze organiche complesse contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale (lipidi, protidi, glucidi), che dà origine ad un gas (biogas) costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte soprattutto da CO₂, con un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm³. Un ulteriore processo biochimico è la fermentazione aerobica che consiste nella metabolizzazione ad opera di batteri delle sostanze organiche, in ambiente condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi microrganismi convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO₂ e H₂O e producendo un elevato riscaldamento del substrato, proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido. La fermentazione alcolica è un processo di tipo microaerofilo che opera la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in etanolo. L'etanolo risulta un prodotto utilizzabile anche nei motori a combustione interna di tipo "dual fuel". Alcune specie vegetali presentano la caratteristica di avere semi ricchi di oli che possono essere estratti ed utilizzati come combustibili per alimentare gruppi elettrogeni attraverso la combustione diretta. Queste piante, dette oleaginose (soia, colza, girasole, mais, ecc.), producono quantità di olio in misura del 20-50% del peso con un notevole potere calorico (fino a 10.000 kcal/kg). Gli oli ottenibili sono adatti, per semplicità di trasformazione ed utilizzazione, alla produzione di energia elettrica ed energia termica con impianti di combustione a tecnologia molto semplice. Gli oli vegetali combustibili sono utilizzati nello stato in cui vengono estratti, a condizione che presentino le caratteristiche idonee in termini di ridotti contenuti di acqua ed impurità, o meglio dopo esterificazione (processo che avviene tramite aggiunta di metanolo per l'eliminazione della glicerina), in modo da assicurare la compatibilità con i motori endotermici. (Rinnovabili 2007).

4.2.1 Tipologie di conversione energetica delle biomasse

Tra le varie tecnologie di conversione energetica delle biomasse alcune possono considerarsi giunte ad un livello di sviluppo tale da consentirne l'utilizzazione su scala industriale, altre necessitano invece di ulteriore sperimentazione al fine di aumentare i rendimenti e ridurre i costi di conversione energetica.

Le tecnologie attualmente disponibili sono sinteticamente:

- a) combustione diretta;
- b) carbonizzazione;
- c) pirolisi;
- d) gassificazione,
- e) digestione anaerobica;
- f) digestione aerobica;
- g) fermentazione alcolica;
- h) estrazione di olii e produzione di biodiesel;
- i) steam explosion.

a) Combustione diretta: è il più semplice dei processi termochimici e consiste nell'ossidazione completa del combustibile a H₂O e CO₂; è attuata, in generale, in apparecchiature (caldaie) in cui avviene anche lo scambio di calore tra i gas di combustione ed i fluidi di processo (acqua, olio diatermico, etc.). La combustione di prodotti e residui agricoli si attua con buoni rendimenti, se si utilizzano come combustibili sostanze ricche di glucidi strutturati (cellulosa e lignina) e con contenuti di acqua inferiori al 30%. I prodotti utilizzabili a tale scopo sono i seguenti:

- legname in tutte le sue forme (cippato e pellet); – paglie di cereali; – residui di raccolta di legumi secchi;
- residui di piante oleaginose (ricino, catramo, etc.); residui di piante da fibra tessile (cotone, canapa, etc.);
- residui legnosi di potatura di piante da frutto e di piante forestali;
- residui dell'industria agro-alimentare.

b) Carbonizzazione: è un processo di pretrattamento del materiale vegetale che consiste nell'alterazione termochimica della biomasse mirato a conferirle migliori caratteristiche attraverso la trasformazione delle molecole strutturate dei prodotti legnosi e cellulosici in carbone (carbone di legna o carbone vegetale), mediante somministrazione di calore in

presenza di poco ossigeno e la conseguente eliminazione dell'acqua e delle sostanze volatili non combustibili dalla materia vegetale.

c) Pirolisi: è un processo di degradazione termochimica di materiali organici, attraverso l'azione del calore, a temperature elevate (tra 400 e 800°C), in completa assenza degli agenti ossidanti (aria o ossigeno) o con una ridottissima quantità di ossigeno (in questo caso il processo può essere descritto come una parziale gassificazione). Dalla pirolisi si ottengono prodotti gassosi, liquidi e solidi, in proporzioni che dipendono dai metodi utilizzati (pirolisi veloce, lenta, o convenzionale) e dai parametri di reazione. La produzione di energia basata su questa tecnica presenta ancora alcuni problemi connessi alla qualità dei prodotti così ottenuti, che non ha ancora raggiunto un livello sufficientemente adeguato rispetto alle applicazioni (con turbine a gas o con motori diesel). Attualmente, le prospettive migliori sono per impianti di grandi dimensioni che utilizzano olio da pirolisi, e per impianti di piccola taglia che usano i prodotti pirolitici con motori a ciclo diesel.

d) Gassificazione: il processo consiste nella trasformazione in combustibile gassoso di un combustibile solido o liquido, nel caso specifico della biomassa, attraverso una decomposizione termica (ossidazione parziale) ad alta temperatura (900÷1.000°C). Il gas prodotto è una miscela di H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O (vapore acqueo) e N₂, accompagnati da ceneri in sospensione e tracce di idrocarburi (C₂H₆). La proporzione tra i vari componenti del gas varia notevolmente in funzione dei diversi tipi di gassificatore, dei combustibili e del loro contenuto di umidità. Questo gas (detto gas di gasogeno) è di potere calorifico inferiore medio-basso, (oscilla tra i 4.000 kJ/Nm³ dei gassificatori ad aria, i 10.000 kJ/Nm³ dei gassificatori a vapor d'acqua ed i 14.000 kJ/Nm³ di quelli ad ossigeno). La tecnologia presenta ancora alcuni problemi, principalmente per il non elevato potere calorifico dei gas ottenuti e per le impurità il loro presenti (polveri, catrami e metalli pesanti). Inoltre, l'utilizzo del gas di gasogeno quale vettore energetico è limitato per i problemi connessi ai costi dello stoccaggio e del trasporto, causa il basso contenuto energetico per unità di volume rispetto ad altri gas. Per rendere economicamente più valido questo processo si trasforma il gas in alcool metilico (CH₃OH), che può essere impiegato per l'azionamento di motori. Il metanolo, caratterizzato da un potere calorifico inferiore dell'ordine di 21.000 kJ/kg, può essere successivamente raffinato per ottenere benzina sintetica, con potere calorifico analogo a quello delle benzine tradizionali.

e) Digestione anaerobica (processi biochimici): è il processo di fermentazione (conversione biochimica) della materia organica ad opera di micro-organismi in assenza di ossigeno; consiste nella demolizione delle sostanze organiche complesse contenute nei vegetali e nei sottoprodotti di origine animale (lipidi, protidi, glucidi), che dà origine ad un gas (biogas) costituito per il 50-70% da metano e per la restante parte soprattutto da CO₂, con un potere calorifico medio dell'ordine di 23.000 kJ/Nm³. Questo processo di fermentazione della sostanza organica ne conserva integri i principali elementi nutritivi presenti (azoto, fosforo, potassio), agevolando la mineralizzazione dell'azoto organico, in modo che l'effluente ne risulti un ottimo fertilizzante. Il biogas prodotto viene raccolto, essiccato, compresso ed immagazzinato per utilizzarlo come combustibile per caldaie a gas nella produzione del calore o per motori a combustione interna (si utilizzano motori di tipo navale a basso numero di giri) per produrre energia elettrica. Gli impianti a digestione anaerobica possono essere alimentati anche con residui ad alto contenuto di umidità, quali le deiezioni animali, i reflui civili, i rifiuti alimentari e la frazione organica dei rifiuti solidi urbani e questo potrebbe rappresentare un'interessante opportunità negli impianti di raccolta dei rifiuti urbani. Però, la raccolta del biogas sviluppato nelle discariche, anche se attrezzate allo scopo, non supera il 40% circa del gas generato e quasi il 60% è disperso in atmosfera, esito non auspicabile perché la gran quantità di metano presente nel biogas ha conseguenze negative sull'effetto serra. Pertanto questo processo andrebbe svolto essenzialmente in appositi impianti chiusi (digestori), dove quasi tutto il gas prodotto viene raccolto ed usato come combustibile.

d) Digestione aerobica: consiste nella metabolizzazione ad opera di batteri delle sostanze organiche, in ambiente condizionato dalla presenza di ossigeno. Questi micro-organismi convertono sostanze complesse in altre più semplici, liberando CO₂ e H₂O e producendo un elevato riscaldamento del substrato, proporzionale alla loro attività metabolica. Il calore prodotto può essere così trasferito all'esterno, mediante scambiatori a fluido. In Europa viene utilizzato il processo di digestione aerobica termofila autoriscaldata (Autoheated Thermophilic Aerobic Digestion) per il trattamento delle acque di scarico. Più recentemente tale tecnologia si è diffusa anche in Canada e Stati Uniti.

g) Fermentazione alcolica: è un processo di tipo micro-aerofilo che opera la trasformazione dei glucidi contenuti nelle produzioni vegetali in etanolo. L'etanolo risulta un prodotto utilizzabile anche nei motori a combustione interna normalmente di tipo "dual fuel", come riconosciuto fin dall'inizio della storia automobilistica. Se, però, l'iniziale ampia

disponibilità ed il basso costo degli idrocarburi avevano impedito di affermare in modo molto rapido l'uso di essi come combustibili, dopo lo shock petrolifero del 1973 sono stati studiati numerosi altri prodotti per sostituire il carburante delle automobili (benzina e gasolio); oggi, tra questi prodotti alternativi, quello che mostra il miglior compromesso tra prezzo, disponibilità e prestazioni è proprio l'etanolo, o più probabilmente il suo derivato ETBE (EtilTertioButilEtere), ottenuto combinando un idrocarburo petrolifero (l'isobutene) e l'etanolo.

h) Estrazione di olii e produzione di biodiesel: alcune essenze vegetali presentano la caratteristica di avere semi ricchi di oli che possono essere estratti ed utilizzati come combustibili per alimentare gruppi elettrogeni attraverso la combustione diretta. Queste piante dette oleaginose (soia, colza, girasole, mais, ecc.) producono quantità di olio in misura del 35-45% del peso con un notevole potere calorico (fino a 10.000 kcal/kg) sono adatti, per semplicità di trasformazione ed utilizzazione, alla produzione di energia elettrica ed energia termica con impianti di combustione a tecnologia molto semplice. Inoltre, offrono interessanti opportunità per la riutilizzazione dei sottoprodotti del processo dell'estrazione dell'olio dai semi; infatti i residui ricchi di materie proteiche sono impiegati per gli alimenti della zootecnia o nell'industria farmaceutica (ad esempio la glicerina) ed infine per la produzione di pellet. Gli oli vegetali combustibili sono utilizzati nello stato in cui vengono estratti, a condizione che presentino le caratteristiche idonee in termini di contenuti minimi di acqua ed impurezze, o meglio dopo esterificazione (processo che avviene tramite aggiunta di metanolo per la eliminazione della glicerina), in modo da assicurare la compatibilità con i motori endotermici.

g) Steam Explosion (ES): è un trattamento innovativo, a basso impatto ambientale, mediante il quale si può ottenere una vasta gamma di prodotti, utilizzando come materia prima le biomasse vegetali (Figura 5). Rispetto agli altri processi di pretrattamento lo SE presenta il vantaggio fondamentale di separare in tre differenti correnti le frazioni costituenti i comuni substrati vegetali (emicellulosa, cellulosa, lignina) rendendo possibile l'utilizzazione totale delle biomasse. Il processo consiste nell'uso di vapore saturo ad alta pressione per riscaldare rapidamente legno, o qualsiasi altro materiale lignocellulosico, in un reattore che può essere ad alimentazione continua o discontinua. Nella SE alla destrutturazione della matrice lignocellulosica partecipano due azioni meccaniche: la compressione della biomassa e l'istantanea decompressione, si realizza passando dall'alta pressione nel reattore alle normali condizioni ambientali. Il vapor d'acqua ad alta

temperatura opera un processo d'idrolisi dei legami chimici dei polimeri della biomassa. Dopo un tempo preselezionato (1-10 minuti) la pressione è rapidamente abbassata ed il materiale è scaricato dal reattore attraverso una "blow-valve". Le elevate forze, generate durante lo scarico violento del materiale attraverso un piccolo orifizio, contribuiscono ulteriormente allo sfibramento del materiale.

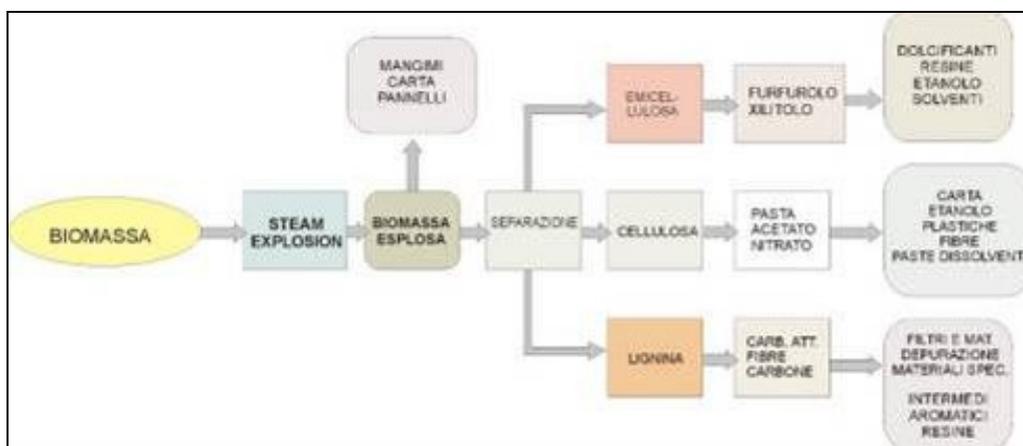


Figura 5: Principali prodotti ottenibili via SE

4.3 Possibili utilizzazioni energetiche del sorgo da biomassa

4.3.1 La filiera per la produzione di bioetanolo

Dal momento che la valorizzazione energetica del bioetanolo è destinata a confrontarsi con la concorrenza da parte sia delle collocazioni alimentari del prodotto fermentato, sia dell'utilizzo per l'autotrazione dei carburanti di origine fossile, nel tempo la filiera produttiva si è intensamente articolata per massimizzare la diversificazione delle materie prime. Per rendere competitiva la filiera energetica la principale tendenza seguita dall'evoluzione tecnologica è stata indirizzata soprattutto allo sfruttamento delle materie prime non destinabili all'alimentazione umana. Il bioetanolo può essere attualmente prodotto dai carboidrati semplici (glucosio, saccarosio, mannosio) e dai polisaccaridi a catena lunga (amido, cellulosa, emicellulosa). Le materie prime possono derivare, pertanto, dalle colture dedicate alcoligene siano esse saccarifere (barbabietola da zucchero, canna da zucchero, sorgo zuccherino) o amidacee (frumento tenero e granturco), nonché dai residui lignocellulosici. La filiera produttiva è articolata in tre sezioni ciascuna delle

quali è caratterizzata da un livello di maturità differente e da soluzioni tecnologiche peculiari:

la sezione saccarifera della filiera per la produzione del bioetanolo. La sezione saccarifera è finalizzata alla conversione energetica degli zuccheri ottenuti dalla barbabietola da zucchero, dalla canna da zucchero e dal sorgo zuccherino. Allo stato attuale la sezione è tecnologicamente matura sebbene, per la sua realizzazione, essa sia influenzata significativamente dalla concorrenza esercitata dalla filiera alimentare. Da un punto di vista tecnologico, la filiera energetica ricalca in linea generale quella alimentare e prevede l'estrazione degli zuccheri dai tessuti vegetali, la loro fermentazione e la distillazione dell'etanolo. La fermentazione è condotta generalmente dal lievito *Saccharomyces cerevisiae* (Lasure, 2003). Viene attuata riproducendo in bioreattori le condizioni ideali per favorire il suo metabolismo di tipo anaerobico (ossia in presenza di basse concentrazioni di ossigeno), alla temperatura compresa tra 5-25°C e in un intervallo di pH variabile tra 4,8 e 5,0 (Sheoran *et al.*, 1999). La separazione dell'etanolo avviene per distillazione, ossia sfruttando le diverse temperature di ebollizione dei componenti presenti nella miscela precedentemente ottenuta: al termine della distillazione si ricava etanolo in concentrazione pari al 95% in peso con un contenuto residuo in acqua del 5%. Per conseguire delle concentrazioni di etanolo prossime al 100%, sebbene ciò comporti un significativo incremento nei costi di produzione, si possono adottare i processi della distillazione frazionata o, in alternativa, della separazione tramite pervaporazione. La distillazione frazionata è eseguita aggiungendo alla miscela di partenza il benzene: in questa ipotesi l'etanolo al termine della separazione presenta un residuo in acqua pari all' 1% in peso. Nella separazione tramite pervaporazione la miscela a valle della fermentazione è portata in fase di vapore e filtrata attraverso delle membrane di materiale selettivo idrofilo; al termine della separazione l'etanolo presenta un residuo in acqua del 3% in peso. La sezione saccarifera della filiera assume particolare rilievo in Brasile dove il bioetanolo è ottenuto dalla canna da zucchero. Ad essa è attribuibile la quasi totalità del bioetanolo prodotto;

la sezione amidacea della filiera per la produzione del bioetanolo. Nella sezione amidacea il bioetanolo è ottenuto a partire da materie prime ricche di amido. In questo caso è necessario trattare l'amido attraverso una reazione di idrolisi, per rendere fermentescibile il glucosio in esso contenuto. A questo scopo le cariossidi (grani) di frumento e di mais sono triturate e disidratate dando origine alla pasta d'amido. L'amido è successivamente

gelificato con vapore diretto alla temperatura di 175°C e alla pressione di 2 atm. L'idrolisi è generalmente condotta utilizzando un enzima, denominato amilasi, che ha la proprietà di liberare le molecole di glucosio incluse nelle catene di amido. Questo trattamento è condotto a una temperatura inferiore a 60°C, e la resa in zuccheri fermentescibili è dell'80%. La restante parte della sezione amidacea è del tutto simile a quella saccarifera. Tale sezione riveste un ruolo di primo piano, soprattutto nel mercato statunitense per la produzione del bioetanolo. Il principale sottoprodotto della sezione amidacea della filiera è costituito dai residui ricchi in olio, proteine e fibre, noti come DDGS (Distillers Dried Grains with Soluble), che sono destinati alla preparazione dei mangimi zootecnici;

la sezione cellulosa della filiera per la produzione del bioetanolo. La produzione di bioetanolo in questo caso è ottenuta a partire da materie cellulosiche ovvero ad alto contenuto di cellulosa ed emicellulosa. La sezione richiede ancora importanti investimenti nel settore della ricerca per l'ottimizzazione tecnologica di diversi punti della filiera. Sebbene attualmente non vi sia a livello mondiale una produzione industriale di etanolo di origine cellulosa, la possibilità di valorizzare attraverso questa via i residui lignocellulosici sta alimentando molteplici attività di ricerca e sviluppo, soprattutto negli USA, dove per ora sono realizzate soltanto in scala di laboratorio o pilota. L'importanza, che è riservata in questa sede alla sezione cellulosa va interpretata come una prospettiva futura auspicabile soprattutto in considerazione dei modesti costi per il reperimento della materia prima. Dei principali componenti della biomassa lignocellulosica (cellulosa, emicellulosa e lignina), soltanto la cellulosa e l'emicellulosa sono costituite da zuccheri fermentescibili e, dunque, possono essere utilizzate per la produzione dell'etanolo. Uno dei punti critici che caratterizza perciò questa sezione della filiera è la separazione fisica della cellulosa e dell'emicellulosa dalla lignina. Questa finalità può essere perseguita mediante trattamenti chimico-fisici (il più studiato utilizza il vapore saturo ad alta pressione ed è denominato steam explosion), chimici (con acidi) e meccanici (con sistemi di presse). La successiva idrolisi dell'emicellulosa e della cellulosa può essere eseguita per via chimica o enzimatica. L'idrolisi chimica acida può essere condotta in un'unica fase con acido solforico (H₂SO₄) concentrato (in concentrazione del 70-77%), addizionato al materiale cellulosico in rapporto 1,25:1 e alla temperatura di 50°C, oppure in due stadi applicando acido solforico diluito: il primo stadio è diretto all'attacco dell'emicellulosa (opera con H₂SO₄ in concentrazione del 0.7% e a una temperatura di 190°C) mentre il secondo è finalizzato all'attacco della cellulosa (opera con H₂SO₄ in concentrazione dello 0,4% e a

una temperatura di 215°C). Con l'idrolisi enzimatica la scissione delle catene di cellulosa ed emicellulosa avviene utilizzando invece enzimi detti cellulasi, scoperti nel microrganismo *Trichoderma reesei* ma individuati successivamente anche in molti altri gruppi microbici, tra cui alcuni batteri anaerobici (*Clostridium* spp. e *Ruminococcus* spp.), alcuni attinomiceti (*Cellulomonas* spp. e *Thermobifida* spp.) e alcuni funghi (*Humicola insolens*) (Lynd *et al.*, 2002). Questa soluzione è ritenuta generalmente preferibile rispetto a quella chimica. In seguito al processo di idrolisi della cellulosa si ottengono molecole di glucosio, ossia uno zucchero a sei atomi di carbonio facilmente fermentescibile: l'idrolisi dell'emicellulosa fornisce anche zuccheri a cinque atomi di carbonio che sono fermentati ad etanolo con maggiore difficoltà. La resa complessiva in bioetanolo di questa sezione è un elemento di ancora elevata criticità, soprattutto per quanto concerne l'emicellulosa. Per ovviare a questo limite, sono in fase di studio alcuni microrganismi, da utilizzare in alternativa al tradizionale *Saccharomyces cerevisiae*, tra cui *Thermoanabacter mathranii* ed *Escherichia coli*. Il principale sottoprodotto della sezione cellulosica della filiera produttiva del bioetanolo è rappresentato dalla lignina, destinabile alla valorizzazione energetica, al pari delle materie prime lignocellulosiche di altra provenienza.

4.3.2 Utilizzazione del culmo per la produzione di etanolo

In virtù delle proprie caratteristiche, il sorgo zuccherino si propone come un'interessante materia prima per la produzione di etanolo (cosiddetto bioetanolo). Tali caratteristiche sono:

- pianta a rapida crescita, con elevata efficienza fotosintetica, avente elevata produzione di biomassa e di zuccheri (Gosse., 1996);
- alto tasso di conversione dell'energia solare;
- elevata resa in carboidrati fermentescibili.

L'etanolo si ottiene dalla fermentazione e dalla successiva distillazione dei carboidrati contenuti nei sughi zuccherini estratti dallo stocco della pianta. Come residuo di questo processo si ottiene la bagassa, dalla cui frazione cellulosica è possibile ottenere nuovamente soluzioni zuccherine, attraverso particolari processi microbiologici ed enzimatici. In definitiva l'evoluzione della ricerca ci consente oggi di affermare che la produzione di bioetanolo non presenta dal punto di vista tecnico particolari difficoltà, infatti, i processi produttivi per l'ottenimento dello stesso da colture zuccherine sono

ampiamente collaudati. Non ancora superati sono invece i problemi di ordine economico, che attualmente ostacolano la produzione su larga scala di bioetanolo.

4.3.3 Il bioetanolo

Il bioetanolo presenta delle caratteristiche chimico-fisiche che lo rendono un carburante affine alla benzina, alla quale può essere miscelato o, in alcuni casi e mediante opportuni accorgimenti, sostituito nell'alimentazione degli autoveicoli. Nella tabella che segue sono poste in evidenza le principali caratteristiche energetiche del bioetanolo a confronto con quelle della benzina.

Tabella 2: principali caratteristiche energetiche del bioetanolo a confronto con quelle della benzina

Parametri	Unità di misura	Bioetanolo	Benzina
Flashpoint	°C	13	21
Temp. ebollizione	Kg/m ³	78	105
p.c.i	Kcal/kg	6.500	10.500

L'utilizzo del bioetanolo anidro (con residuo di acqua del 5%) in sostituzione alla benzina è attualmente una realtà in Brasile, dove i motori sono stati predisposti a questo uso già a partire dagli anni Settanta, quando è emerso in tutta la sua gravità il problema della sicurezza degli approvvigionamenti. Gli interventi che si rendono necessari in tale ipotesi di impiego riguardano la regolazione delle valvole e la sostituzione dei componenti suscettibili di corrosione. Negli USA e in Canada il bioetanolo anidro è utilizzato invece in miscela con la benzina al 10% in motori non modificati e all'85% in motori predisposti. Questi ultimi, denominati con la sigla FFV (Flexible Fuel Vehicles) possono essere alimentati indifferentemente con delle miscele di benzina e bioetanolo o con la sola benzina, poiché sono dotati della regolazione automatica dei tempi di iniezione e dei rapporti di miscelazione tra l'aria e il carburante. Alcuni ulteriori studi condotti in Europa e negli USA hanno evidenziato come sia possibile l'impiego del bioetanolo in miscela fino al 23,5% senza intervenire sulla componentistica del motore. Attualmente in Europa è consentita la presenza del bioetanolo anidro, ossia privo di acqua residua, nella benzina in concentrazione fino al 5%.

4.3.4 Colture da biomassa per fini energetici

La disponibilità delle risorse energetiche è divenuta una problematica attuale in tutto il mondo per il consumo crescente delle risorse e per la non rinnovabilità della maggior parte di esse. Nel mondo occidentale ed in particolare nella Comunità economica europea questo problema a partire dagli anni '70 è andato via via assumendo una importanza strategica, per la quasi totale dipendenza della Comunità da paesi terzi. Infatti, a partire dagli anni ottanta la Comunità ha promosso e realizzato diversi progetti di ricerca nell'ambito di specifici programmi comunitari (ECLAIR, JOULE, ALTENER, AIR, FAIR) finalizzati allo studio delle colture agrarie come possibili fonti di biomassa per la produzione di energia e delle tecniche più adatte alla loro coltivazione e trasformazione. Nell'ambito della realtà europea sono state studiate sino a oggi oltre trenta specie fra colture erbacee annuali e poliennali, arbustive e arboree impiegabili come cedui a turno breve in terreni agricoli. In particolare, in Italia sono state valutate diverse colture di possibile esclusivo impiego per la produzione di biomassa, a cui possono essere aggiunte anche quelle, come ad esempio il mais o i cereali a paglia, che notoriamente sono in grado di produrre adeguate quantità di biomassa per unità di superficie, ma che per il momento interessano soprattutto per le tradizionali destinazioni alimentari. Tra le specie erbacee annuali e poliennali inizialmente prese in considerazione figurano i sorghi da fibra e quelli zuccherini (*Sorghum bicolor* L., Moench), il kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.), alcune falaridi (*Phalaris* spp.), la kochia (*Kochia scoparia* Schrad.), il cardo (*Cynara cardunculus* L.), il miscanto (*Miscanthus sinensis* Anderss.), la canna comune (*Arundo donax* L.), il topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) e il panico (*Panicum virgatum* L.). Tra le specie arboree coltivabili come ceduo a turno breve sono stati considerati i salici (*Salix* spp.), i pioppi (*Populus* spp.), la robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) e gli eucalipti (*Eucalyptus* spp.). La possibile introduzione delle colture da biomassa negli ordinamenti produttivi tradizionali è stato invocato anche in relazione ai possibili risvolti positivi che queste potrebbero rappresentare nei confronti della salvaguardia dell'ambiente. Le ricerche condotte sull'argomento hanno accertato, tuttavia, che le colture da energia comportano sia impatti positivi che negativi verso l'ambiente come è stato riportato da numerose organizzazioni nazionali ed europee (Taschner, 1993). La valutazione dell'impatto di queste colture è oggetto pertanto di studi e ricerche che cercano di mettere a punto metodologie analitiche come l'analisi del ciclo della vita ("life-cycle analysis") ai fini di una valutazione completa dell'impatto ambientale di una coltura (Gosse, 1996; Kaltschmitt e Reinhardt, 1996; Scharmer, 1995;

Oegema e Posma, 1994; Biewinga e der Bijl, 1996). In definitiva le tematiche che necessitano di studi specifici nell'ambito delle colture da biomassa per energia possono essere così sintetizzate:

- ricerche sul miglioramento genetico delle specie utilizzabili in modo da sviluppare varietà ad elevato potenziale energetico e a più basso costo di produzione, elevato rendimento energetico e qualità del carburante;
- valorizzazione delle colture polienni per limitare i costi di impianto;
- trattamenti di diserbo efficienti ed a basso impatto ambientale;
- esigenze idriche e nutrizionali delle colture da energia e le relative implicazioni ai fini della produttività e dell'immagazzinamento dell'acqua nel terreno, della conservazione del suolo, della salvaguardia dall'inquinamento;
- possibilità di utilizzo delle acqua reflue, dei fanghi e delle ceneri nelle colture da energia;

A questo proposito, nei capitoli seguenti, verranno illustrate le caratteristiche e le potenzialità del Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) come “pianta dedicata” da energia.

4.3.5 Utilizzazione della biomassa per la produzione di elettricità

Il sorgo è una pianta da cui si traggono numerosi prodotti che forniscono un notevole contributo energetico, come etanolo e i suoi derivati dal succo zuccherino, oli pirolitici e carburanti ad elevata gradazione, carbone, gas di sintesi, materiali ligno-cellulosici polverizzati dalla bagassa. Tutti questi possono essere considerati il risultato dell'integrazione di vari processi, che hanno lo scopo di valorizzare maggiormente la potenzialità del sorgo zuccherino. L'applicazione energetica più promettente è rappresentata dalla possibilità di poter generare elettricità. Da un'intensificazione della coltura di sorgo da biomassa e dalla relativa trasformazione si potrebbero ottenere riduzioni nei costi relativi alla produzione di elettricità. Combinando questa possibilità con lo sviluppo delle tecnologie, si otterrebbe un rendimento pari a quello offerto dai moderni cicli di produzione che prevedono l'utilizzo dei combustibili fossili (Grassi, G., 1992).

5. L'AMBIENTE MEDITERRANEO

5.1 Caratteristiche dell'ambiente mediterraneo

Il mare Mediterraneo, più esteso in longitudine (3800 km) che in latitudine (1800 km dal grande Sirte a Trieste) è il fattore geografico determinante il clima in tutti i Paesi che lo circondano. Il carattere comune a tutti i climi definiti "Mediterranei" è dato dalla presenza di una stagione secca più o meno prolungata, e da una piovosità media compresa fra 200 e 600 mm, prevalentemente distribuiti da novembre ad aprile. Secondo Aschman (1973) un'area è caratterizzata da tipico clima mediterraneo quando oltre il 65% delle precipitazioni annue si verifica tra novembre e aprile e quando la permanenza della temperatura al di sotto di 0°C, espressa in ore, non supera il 3% rispetto al totale annuo. Da un punto di vista generale e come primo approccio conoscitivo, le peculiarità del clima mediterraneo possono essere espresse dall'indice agronomico della semi-aridità di De Philipps, che risulta dal rapporto tra la piovosità in mm del periodo estivo e la temperatura media in gradi centigradi del mese caldo, per cui un indice inferiore a 3,5 è caratteristico degli ambienti semi-aridi, mentre per valori superiori si va verso il sub-umido e l'umido. Qualsiasi nuovo tentativo di classificazione climatica non può trascurare l'organismo vegetale, perché la pianta, nella quale si integrano tutti gli elementi del clima, è il solo vero climatometro e non potrebbe essere sostituita, in questo suo ruolo, da alcun altro fattore preso isolatamente. Questa esigenza è particolarmente sentita nell'ambiente mediterraneo, dove le pressioni di diversificazione e di selezione, che agiscono sugli organismi vegetali, vengono influenzate non solamente dall'aridità pedologica dovuta alla declività e al grado di permeabilità del suolo e dall'aridità fisiologica, che è determinata, a sua volta, dalla concentrazione della soluzione circolante che può raggiungere valori elevati durante la lunga e calda estate mediterranea (Ballatore 1974). L'aridità estiva caratterizza la pedogenesi dell'ambiente mediterraneo e nel complesso i suoli naturali ed agrari presentano alcuni caratteri comuni: sono terreni poveri di humus, perché la materia organica si degrada rapidamente, più ricchi di Sali solubili e di basi rispetto a quelli dei climi umidi, perché il processo di lisciviazione è rallentato ed i profili si presentano più uniformi (Principi, 1953).

5.2 Meccanismi di adattamento delle piante all'ambiente mediterraneo

Numerose specie e varietà oggi coltivate nei Paesi mediterranei sono il risultato di un adattamento mesoxerofitico, trattasi cioè di piante che riescono a mantenere l'equilibrio

idrico a mezzo di meccanismi morfologici e fisiologici, atti a ridurre la traspirazione. Adattamenti morfologici sono quelli che riguardano la riduzione della superficie traspirante, l'impicciolimento delle cellule, la riduzione della dimensione degli stomi, l'aumento del loro numero per unità di superficie. L'infittimento del reticolo delle nervature fogliari, l'aumento del numero degli strati delle cellule a palizzata. Gli adattamenti di tipo fisiologico riguardano l'aumento della traspirazione ed assimilazione e della pressione osmotica dei succhi cellulari. Fra questi adattamenti della pianta all'ambiente mediterraneo sono da privilegiare sotto il profilo strettamente agronomico quelli che riducendo la traspirazione cuticolare, mantengono inalterata la traspirazione stomatica (meglio regolabile da parte delle piante), in modo da assicurare un livello soddisfacente dell'attività fotosintetica anche in periodi di siccità. Indubbiamente una delle vie per ottenere una elevata produzione di biomassa secca delle piante coltivate in clima mediterraneo è quella di regolare la quantità di acqua a loro disposizione in modo tale che esse possono mantenere aperti i loro apparati stomatici durante la maggior parte del periodo vegetativo. Durante le ore più soleggiate e asciutte della giornata, in genere, gli stomi sono chiusi, e ciò riduce notevolmente la fotosintesi: questa in condizioni di deficit idrico risulta limitata alle prime ore del mattino ed al pomeriggio avanzato e la quantità di anidride carbonica assimilata da una mesoxerofita per un determinato volume d'acqua traspirata può arrivare 1/8 della quantità corrispondente delle mesofite. La durata della chiusura degli stomi, e quindi l'intensità e la durata degli scambi gassosi, pur variando in relazione al genotipo può essere regolata entro certi limiti ricorrendo alla irrigazione. L'irrigazione, quindi, soprattutto in ambiente mediterraneo è il più importante fattore per l'incremento delle rese, ma questo prezioso strumento agronomico può essere pienamente valorizzato soltanto attraverso un ampliamento della conoscenza delle relazioni tra processi di accrescimento e di sviluppo dei singoli genotipi e gli elementi del clima.

6. *SORGHUM BICOLOR* (L.) MOENCH



Figura 6. *Sorghum bicolor* (L.) Moench

6.1 Inquadramento botanico

Il genere “Sorghum” si inquadra nella famiglia delle Graminacee, sottofamiglia Panicoidee, tribù Andropogonee. E’ caratterizzato da infiorescenze con spighe sempre biflore, una sessile e fertile, l’altra pedicellata e sterile. Le spighe sessili, terminali, sono accompagnate da due spighe pedicellate. La letteratura riporta numerosi esempi di classificazione del sorgo, ma il primo studio sistematico del genere *Sorghum* è stato fatto dallo Snowden del 1936. Lo Snowden divise il genere *Sorghum* in due sezioni: Eu-*Sorghum* e Para-*Sorghum*. In quest’ultima sono raggruppati i sorgi, annuali o perenni, a 20 cromosomi somatici; la sezione Eu-*Sorghum*, divisa a sua volta in due sottosezioni, comprende tutti i sorgi più noti:

- **Halepensis**, con sorgi perenni a lunghi rizomi, a 40 cromosomi somatici;
- **Arundinacea**, a 20 cromosomi, a sua volta divisi in due serie:
- **Spontanea**, che include i sorgi selvatici e le varietà coltivate Sudangrass e Tunisgrass;
- **Sativa**, con sorgi da granella e zuccherini coltivati.

Quest’ultima include ben 31 specie differenti, con racemi tenaci e spighe sessili, persistenti nel panicolo a maturità. Negli anni successivi sono seguiti ulteriori classificazioni basate sul fatto che le diverse forme di sorgo possono facilmente incrociarsi tra loro. L’ultima, in ordine cronologico, è quella proposta da De Wet e Harlan, i quali

studiarono dapprima l'origine e la filogenesi semplificata rispetto a quella dello Snowden. Gli autori hanno la loro classificazione esclusivamente sulla morfologia delle spiglette sessili mature, attraverso la quale è possibile identificare le principali forme di sorgo. Limitatamente alle forme coltivate, queste possono essere tutte riportate a cinque tipi base:

- 1) **Bicolor**: cariosside allungata, talvolta leggermente obovata quasi simmetrica dorso-ventralmente; glume che racchiudono la cariosside, che può essere completamente aperta o esposta per $\frac{1}{4}$ della sua lunghezza in punta; spiglette persistenti;
- 2) **Guinea**: cariosside schiacciata dorso-ventralmente, a profilo sub lenticolare, che si gira a maturità di quasi 90° aprendo le glume involute che sono quasi più lunghe della cariosside;
- 3) **Caudatum**: cariosside marcatamente asimmetrica, con il lato prossimo alla gluma inferiore piatto o in casi estremi anche un po' concavo, i lati opposti arrotondati e sporgenti, lo stilo persistente spesso nel punto di distacco verso la gluma inferiore, glume lunghe metà o meno delle cariossidi;
- 4) **Kafir**: cariosside simmetrica, più o meno sferica, glume avvolgenti la cariosside e variabile in lunghezza;
- 5) **Durra**: cariosside obovata con profilo arrotondato a forma di cuneo alla base e leggermente più larga al di sopra della metà; glume molto larghe, la punta con differente tessitura rispetto alla base e spesso con un solco lungo la metà.

I sorghi da granella presentano un'enorme varietà di forme e termini intermedi di passaggio, conseguenza del notevole lavoro di ibridazione al quale sono stati sottoposti.

Gli studiosi americani li dividono nei seguenti gruppi:

- a) **Milo**: culmi più o meno legnosi e sottili, notevole accostamento e panicoli aristati, compatti, ovali, con peduncolo ricurvo. Le cariossidi sono grandi, di colore bianco-crema o salmone e le glume sono brune. Provengono dall'Africa centro-orientale e in genere risultano più resistenti al caldo e alla siccità rispetto ai kafir.
- b) **Kafir**: culmi succosi, foglie relativamente grandi e panicoli eretti, spiglette mutiche e cilindriche. Le cariossidi sono bianche, rosa o rosse; le glume nere o paglierine. Provengono dall'Africa occidentale.
- c) **Hegari**: differiscono dai kafir per avere panicoli quasi ovali con cariossidi bianche e perché sono in grado di accestire. Provengono dal Sudano.
- d) **Feterita**: culmi sottili e legnosi leggermente dolci, poche foglie e panicoli ovali, compatte ed erette. Le cariossidi sono grandi, bianche e sgranano facilmente a maturità.

e) **Durra**: culmi legnosi e panicoli aristati. Le cariossidi sono bianche e piatte. Provengono dal Nord-Africa, dal Medio Oriente e dall'Europa meridionale.

f) **Shallu**: culmi legnosi, alti, sottili e panicoli lassi. Le cariossidi sono bianche, di aspetto perlaceo. In genere, maturano tardivamente e provengono dall'India.

g) **Kaoliang**: culmi legnosi, alti, sottili e semi compatti. Le cariossidi sono brune ed amare. Provengono dall'Estremo Oriente.

6.2. Morfologia

Il sorgo è una coltura con ciclo fotosintetico di tipo C4. Tra le peculiarità delle piante C4 si richiama la caratteristica anatomia della foglia, chiamata “anatomia Kranz”, che presenta una separazione specifica tra la fissazione fotosintetica della CO₂ e la sintesi degli assimilati (i.e. composti prodotti dalla pianta come risultato della fotosintesi e responsabili della crescita della pianta stessa). Questa compartimentazione permette un uso più efficiente della radiazione solare ed una elevata resa fotosintetica della coltura, se confrontata con le colture a metabolismo C3, più comuni nelle regioni temperate. Il rapporto di assimilazione fotosintetica è evidente specialmente in condizioni di elevate radiazione solare e disponibilità di acqua. Il sorgo è una tipica pianta erbacea che in coltura si presenta a stelo singolo, pur mostrando una notevole capacità di accestimento. La pianta è in genere a ciclo annuale, ma può vegetare per anni con la ripresa vegetativa di nuovi polloni alla base della pianta.

Apparato radicale

Il sorgo, come tutte le graminacee, ha un apparato radicale fascicolato o affastellato. Si distinguono due sistemi radicali: uno embrionale, l'altro avventizio secondario. Il primo ha origine dalla radichetta sviluppatasi dall'embrione; il secondo dagli ultimi nodi del culmo, al di sotto della superficie del suolo. In una pianta si distinguono otto verticilli di nodi radicali. Gli ultimi tre si trovano sopra la superficie del terreno e danno luogo alle radici di sostegno.

Culmo

Il culmo del sorgo origina con lo scutello o cotiledone e termina con la gemma apicale. Ha un portamento generalmente eretto; è robusto e la sua altezza può variare da 45 cm a 4 m. Lo spessore del culmo varia anch'esso tra i 5 mm e i 5 cm. Presenta una pesante copertura di cera che può mascherare la colorazione verde. Il culmo è diviso in nodi e internodi il cui numero può variare da 7 a 18 o più. Il nodo, che può avere la stessa larghezza

dell'internodo o essere ispessito, rappresenta il luogo di origine della foglia. Immediatamente sopra l'inserzione della foglia, distinguiamo due zone: la fascia radicale e l'anello di accrescimento. Dalla zona della fascia radicale, nei nodi più bassi, prendono origine le radici, e nelle varietà più alte dai primi nodi al di fuori del terreno si originano le radici di sostegno. Talvolta, dai nodi più bassi possono svilupparsi dei polloni, che in alcune varietà sono in grado di ramificare.

Foglie

La foglia del sorgo è costituita dalla guaina e dal lembo fogliare. Nella zona di congiunzione fra le due parti si distinguono la ligula e le auricole. Sono disposte alternativamente in due file opposte e il loro numero varia a maturità da 7 a 28. Possono raggiungere diversa lunghezza (dai 30 ai 130 cm.) e hanno forma lanceolata. Il margine fogliare per un diverso accrescimento delle zone più esterne rispetto alla nervatura mediana può essere ondulato, in genere però si presenta piatto. La foglia è anfistomatica ed è percorsa da stomi disposti in doppia fila o in singola fila; sono piccoli e numerosi, e ciò permette un migliore controllo degli scambi gassosi con l'esterno. Vi sono delle file di grandi cellule igroscopiche (cellule bulliformi), nella faccia superiore del lembo fogliare, che in condizione di stress idrico, causano l'arrotolamento della lamina. Le foglie sono ricoperte da uno strato fortemente cutinizzato, che ne ritarda l'appassimento, e sopra questo, da uno strato di cera, che impedisce la dispersione dell'acqua per traspirazione. Le parti verdi della pianta contengono un glucoside cianogenetico solubile in acqua, che fu chiamato dal Dunstan "durrina". Questa per idrolisi per effetto dell'enzima emulsina, si scinde in glucosio ed acido cianidrico, risultando altamente tossica. Il glucoside è presente in misura maggiore nelle piante giovani e al crescere della pianta il suo contenuto diminuisce fino alla totale scomparsa in fase di antesi.

Fiore

Il fiore inferiore (sterile) della spighetta è ridotto a glumella e forma una larga brattea, membranosa e ciliata, alquanto troncata all'apice. Il fiore perfetto (fertile) è formato normalmente di una lemma, una palea, due lodicole ciliate, un androceo e un ovario. L'androceo è costituito da tre stami formati da antere e da filamenti; l'ovario, a forma ovale, o carpello, porta due piccoli stili terminando con stimmi piumosi. Il numero di fiori fertili in un'infiorescenza può raggiungere le 4000 unità, ma in genere ne sono contenute 1500~2000.

Frutto

Il frutto del sorgo è una cariosside, cioè un frutto secco indeiscente, monosperma di forma quasi sferica. Distinguiamo una faccia ventrale con superficie liscia, alla base della quale vi è una dorsale, che porta un'escrescenza racchiudente l'embrione. La cariosside è formata dall'embrione o germe e dall'endosperma, entrambi racchiusi dal pericarpo. Le tre parti ricorrono nella cariosside secondo i seguenti valori percentuali, calcolati sul peso secco: endosperma 80-84,6%, embrione 7,8-12,1%, pericarpo 7,5-9,3%. Nell'endosperma, che forma la massima parte di tutta la cariosside, si possono distinguere uno strato aleuronico e la massa amilacea. Dalle analisi chimiche della granella del sorgo si può notare come le percentuali delle diverse componenti siano simili a quelle della cariosside del mais ma rispetto a quest'ultimo, tuttavia, il contenuto in proteine del sorgo è spesso più elevato, mentre quella di olio è più bassa. Anche il contenuto in amminoacidi essenziali sembra essere superiore a quello del mais, ma pur sempre basso rispetto alle esigenze nutritive degli animali. Per quando riguarda il contenuto in vitamine nella granella, sono bene rappresentate quelle del gruppo B, l'acido pantotenico e la niacina, mentre sono deficienti i caroteni.

Panicolo

L'ultimo internodo, detto peduncolo, porta l'unica infiorescenza della pianta che è un panicolo o pannocchia. La forma di questa varia da spargola a più o meno compatta, come nei "Durra". La lunghezza totale dell'asse può variare notevolmente tra 10,5 e 50,8 cm, come lunghezza di tutta la pannocchia. Quest'ultima formata da un rachide centrale, dal quale si dipartono le branche secondarie e talvolta le terziarie, che portano i racemi. I racemi rappresentano due spiglette appaiate, una delle quali è sessile l'altra pedicellata e sterile. Le spiglette terminali della ramificazione sono ternate, e cioè una spigletta sessile è accompagnata da due spiglette pedicellate sterili. La spigletta fertile è formata da un corto asse florale o rachilla, nel quale le parti seguenti ricorrono in due file di ordini: la glume superiore, la glume inferiore, un fiore sterile ed uno fertile. Prima dell'antesi la gluma superiore racchiude parzialmente quella inferiore e tutte due racchiudono le altre parti.

6.3 Biologia

Stadi del ciclo biologico

Il sorgo ha un ciclo biologico caratterizzato da fenofasi in tutto simili a quelle degli altri cereali; è possibile individuare le fasi di emergenza, levata, accestimento, botticella,

spigatura, fioritura, maturazione lattea, maturazione cerosa, maturazione fisiologica, stramaturazione o maturazione di morte. Un sistema rivolto all'individuazione delle fasi di sviluppo del sorgo è stato messo a punto da Vanderlip e Reeves (1972), che individuano le seguenti fasi:

Stadio 0 (emergenza) Si ha quando il coleoptile è visibile sulla superficie del terreno; si manifesta di solito fra i 3 ed i 10 giorni dalla semina.

Stadio 1 (collare della terza foglia visibile) Solitamente si manifesta a circa 10 giorni dall'emergenza.

Stadio 2 (collare della quinta foglia visibile) Si manifesta dopo tre settimane dall'emergenza.

Stadio 3 (differenziazione della zona sviluppo). Approssimativamente questa fase corrisponde all'inizio della levata e rappresenta il passaggio dalla fase vegetativa a quella produttiva. Il periodo che intercorre fra la semina e il terzo stadio corrisponde al 30% circa del tempo necessario per giungere alla maturazione fisiologica, indipendentemente dall'epoca di semina e dalla varietà. Di qui anche l'interesse previsionale che riveste questa fase. In tale stadio la pianta presenta un numero di foglie compreso tra 7 e 10. Durante questi primi stadi si ha la completa differenziazione di tutte le foglie (Krieg, 1990), dei culmi e di buona parte delle radici. Si sostiene inoltre che in questa fase esista una forte correlazione tra fotoperiodo, termoperiodo e durata dello stadio. In generale con condizioni di giorno lungo, è il termoperiodo a determinare la maggiore influenza. Krieg ha inoltre rilevato l'influenza dell'intensità luminosa: bassi livelli di luminosità determinano l'incremento del numero di foglie prolungando il numero di giorni della fase. Questa si conclude quando il meristema apicale inizia a differenziare il panicolo, interrompendo la differenziazione delle foglie.

Stadio 4 (foglia bandiera visibile nell'interezza) continua l'allungamento del culmo, ma le prime 2.5 foglie cadono.

Stadio 5 (botticella) oltre al segno evidente dell'ingrossamento della guaina della foglia bandiera per la presenza del panicolo, si completa la distensione delle foglie.

Stadio 6 (fioritura) tale fase si manifesta a circa 2/3 del periodo necessario per la maturazione fisiologica. La fioritura è basipeda e si completa in 4-7 giorni. Il sorgo è prevalentemente autogamo, con una percentuale di allogamia pari al 6% circa. Il polline resta vitale per sole 3-6 ore, ma la fertilità degli stigmi può prolungarsi, in caso di mancata fecondazione, fino ad una settimana. Solitamente il polline, per la germinazione del tubetto

pollinico, necessita di una certa intensità luminosa e pertanto la fecondazione incomincia solamente all'alba.

Stadio 7 (consistenza cornea della cariosside) l'accumulo di s.s. nel seme rappresenta il 75% e l'attività fotosintetica delle foglie è ulteriormente ridotta.

Stadio 8 (maturità fisiologica), la granella ha accumulato il massimo di s.s. Il tempo necessario per la maturazione dei semi è variabile nell'ambito del panicolo ed è maggiore per i frutti basali. La maturazione normalmente si accompagna alla senescenza delle foglie basali. Destano particolare interesse per la produzione di biomassa, alcune varietà in grado di mantenere integro l'apparato vegetativo anche a completamento del ciclo riproduttivo. Queste varietà mostrano un'elevata attività fotosintetica, un incremento del diametro dello stocco ed anche un aumento del contenuto zuccherino sino alla fine del ciclo. Per contro, tali genotipi manifestano un ritardo generale nelle varie fasi.

6.4 Aspetti genetici

I materiali genetici più utilizzati sono ibridi con ciclo da 120-150 giorni, ottenuti dall'incrocio di linee maschiosterili da granella con linee da saggina, che ne esaltano il vigore vegetativo. La coltivazione del sorgo ha avuto inizio quando il miglioramento genetico si è interessato di questa coltura. Negli USA la presenza di industrie di sciroppi, ha stimolato l'interesse per questa coltura. Una delle prime varietà coltivate venne importata dalla Cina e distribuita dalla "Chinese Amber", altri genotipi quali Orange, Sourless, Goose-neck, Wite-Africa, Sumace Holney, sono stati introdotti da Leonard Wray dal Sudafrica (Dogget, 1988). Alla fine del XIX secolo, vi erano molte specie che consentivano la produzione di sciroppi: Honey, Sugar Drip, White African e Ambers. L'ibridazione naturale ha rappresentato una prima fonte di variabilità. Fin dall'inizio del secolo si è avuto un rapido progresso del miglioramento genetico del sorgo, grazie all'incrocio fra linee superiori seguito dalla selezione delle generazioni segreganti. Alla fine degli anni cinquanta, si è avuta la disponibilità degli ibridi maschio-sterili. Il miglioramento genetico del sorgo zuccherino segue, con un certo ritardo. Particolarmente importante ai fini dell'introduzione di nuove varietà di sorgo per la produzione di sciroppo, è stato il lavoro svolto dallo U.S. Sugar Crops Field Station, Meridian, Mississippi. Il miglioramento genetico ha anche lo scopo di risolvere i problemi legati alle più dannose patologie che affliggono le piante di sorgo zuccherino insieme alla resistenza all'allettamento e alla produzione di uno sciroppo di buona qualità.

6.5 Definizione dell' ideotipo

La considerazione del sorgo come fonte di zuccheri ed energia impone la definizione di uno specifico ideotipo di pianta. La conservazione dei carboidrati nei semi è facilitata dalla selezione di fenotipi a paglia corta, che consentono di ottenere un harvest index maggiore, mentre un'elevata resa in biomassa e quindi di carboidrati solubili è ottenibile coltivando delle piante a taglia alta. E' appunto auspicabile una riduzione della taglia del panicolo, in quanto questo carattere è associato ad una bassa presenza di zuccheri negli stocchi. Esiste una correlazione negativa riscontrata in tutti i tipi di sorgo, fra la densità delle piante e la resistenza all'allettamento, che ha una particolare rilevanza nella definizione dell'ideotipo del sorgo zuccherino. Dal momento in cui il sorgo zuccherino è stato considerato in grado di poter produrre etanolo e quindi di essere inserito in un contesto legato alla produzione di energia (High Energy), è emersa la possibilità di utilizzare varietà ibride, che combinano la produzione di zucchero e granella e sfruttano l'eterosi per massimizzare la resa totale di energia. I programmi di miglioramento genetico dell'HE sorghum, sono condotti dal College Station, Texas, e sono basati sulla possibilità di poter produrre piante a duplice attitudine (Monk *et al.*, 1984). Possiamo affermare che il miglioramento genetico del sorgo ha sviluppato due ideotipi di piante, che hanno migliorato le varietà ad elevato contributo energetico. Il primo modello prevede solo la produzione di una grande quantità di zuccheri solubili negli stocchi. Il secondo modello definisce un ideotipo di sorgo HE, e differisce dal primo per la riduzione dell'altezza del culmo (170-190 cm nel primo e 110-130 cm nel secondo) e per la presenza di una notevole quantità di granella nei panicoli.

6.6 Tecniche colturali e potenzialità produttive

La preparazione del terreno è cruciale per la buona riuscita della coltura del sorgo da biomassa. Per la coltivazione del sorgo da biomassa si fa ricorso alla lavorazione convenzionale (aratura a 25-30 c, seguita da una di scissura a 10-15 cm) e, a seconda della natura del terreno e dell'organizzazione aziendale, si può ricorrere al minimum tillage (fino a 10-15 cm di profondità di lavorazione), ma anche alla semina su sodo (Saballos, 2008). L'epoca di semina più idonea per il sorgo da biomassa è quella primaverile poiché la coltura non tollera il freddo e non cresce con basse temperature. La germinazione dei semi avviene a temperature del suolo superiori agli 8-10°C, generalmente considerata la soglia termica minima. La temperatura ottimale per l'emergenza è di 25°C (ISTA 1996). In

ambiente caldo-arido mediterraneo il sorgo trova le migliori condizioni di luce e temperatura durante i mesi di maggio giugno e luglio. In condizioni di disponibilità idrica ottimale del terreno il sorgo raggiunge le sue massime produzioni. Al fine di ridurre l'apporto idrico artificiale sono stati condotti numerosi studi dove è stata studiata la possibilità di anticipare o ritardare l'epoca di semina. Con riferimento all'anticipo dell'epoca di semina è stato dimostrato che l'osmocondizionamento del seme determina una fase di pre-imbibizione del seme che permette la germinazione del seme anche a temperature inferiori alla soglia minima (Foti *et al.*, 2002). È stato rilevato in pieno campo, tuttavia, che nei terreni argillosi nelle condizioni di basse temperature ed elevata umidità che si determinano con le semine anticipate, solo i semi con tegumento ricco in tannini presentano una buona germinabilità, mentre i semi con tegumento chiaro non riescono a germinare probabilmente preda di muffe (Patanè *et al.*, 2008). L'epoca di semina anticipata ha comunque determinato un lento sviluppo delle plantule e non ha ridotto la quantità di acqua di irrigazione necessaria per sostenere la crescita delle piante avvenuta in luglio (Foti *et al.*, 2001). Considerato anche il controllo delle erbe infestanti risulta più difficile e costoso, l'epoca di semina anticipata non è ancora praticabile. Questo problema potrà essere superato con lo sviluppo di varietà resistenti alle basse temperature, tematica alla quale si stanno occupando numerosi enti di ricerca nazionali. In Sicilia sono state condotte prove sperimentali per valutare la possibilità di ritardare l'epoca di semina in modo da sfruttare le piogge autunnali e risparmiare l'acqua per l'irrigazione. Il letto di semina deve essere ben preparato e adeguatamente rifornito di elementi nutritivi. Per consentire un buon insediamento della coltura è più alta rese è opportuno mantenere la coltura nelle migliori condizioni, attraverso il controllo delle infestanti, un'adeguata densità di semina e altre pratiche colturali che riducano la competizione intra e inter specifica durante la fase di emergenza (30 giorni dalla semina). In questa fase lo sviluppo della coltura è piuttosto lento. Dal momento in cui il sorgo ha completato lo sviluppo dell'apparato radicale, la coltura accelera l'accrescimento e compete con le infestanti senza ulteriori interventi di diserbo. Con riferimento alla modalità di semina si ricorda che l'investimento unitario può variare tra 10-20 piante per metro quadrato con valori ottimali intorno a 12 piante m². Un investimento unitario più alto può determinare l'allettamento delle piante, soprattutto nel sorgo zuccherino che presenta una struttura del culmo meno resistente del sorgo da fibra. La distanza tra le file può variare tra 50 e 70 cm in funzione delle esigenze meccaniche con una distanza all'interno della fila tra 11 e 17 cm.

Considerato il peso di mille semi (20-30 g) per ottenere questo investimento unitario è necessario utilizzare tra 4 e 6 kg di semente per ettaro. Tuttavia è opportuno calcolare la dose di seme in base alla germinabilità del seme, spesso inferiore al 100%. La profondità di semina non deve superare i tre centimetri ed il seme deve essere coperto dal terreno. In considerazione delle dimensioni del seme potrebbe essere opportuno una rullatura del terreno dopo la semina.

Concimazione:

La quantità di fertilizzanti da applicare alla coltura varia in funzione della fertilità del suolo e dei livelli produttivi pianificati. Nelle regioni mediterranee, in cui la fertilità del suolo oscilla tra bassa e moderata, gli apporti richiesti dalla coltura, espressi per ettaro, sono: 100-150 kg N, 60-100 kg P₂O₅ e 60-100 kg K₂O. L'applicazione dell'azoto è consigliata in due fasi: prima della semina e indicativamente 20-30 giorni dopo l'emergenza.

- bassi input, 80 Kg ha⁻¹ di P₂O₅, prima della semina, localizzato, 60 Kg ha⁻¹ di N in copertura (nitrato ammonico);
- alti input, 150 Kg ha⁻¹ di P₂O₅ di cui 80 Kg ha⁻¹ alla semina e 80 Kg ha⁻¹ in copertura, localizzato; 120 Kg ha⁻¹ di N, 60 Kg alla semina (solfato ammonico) e 60 Kg in copertura (nitrato ammonico).

Come per altre colture, la dose ottimale di fertilizzazione dipende dalla fertilità del suolo nel quale la coltura cresce, anche se in generale il sorgo è meno esigente delle altre colture; secondo alcuni studi, il sorgo richiede circa il 40% in meno di azoto rispetto al mais (Monti *et al.*, 2003), fattore che contribuisce notevolmente ad un risparmio energetico poiché limita una delle voci (la fertilizzazione) che più delle altre incide sul bilancio energetico della coltura. Per scopi energetici, sembra che il momento di concimazione, sia più importante dei quantitativi da apportare alla coltura: Almodares and Darany (2006) indicano che l'altezza delle piante, il diametro dei culmi e la resa in biomassa secca aumentano in corrispondenza di un incremento di concimazione azotata effettuata allo stadio vegetativo, rispetto a quella distribuita allo stadio riproduttivo.

Concimazione azotata

Differenti dosi di concime azotato non determinano variazioni di resa significative ma comportano una differenza significativa nella quantità di azoto asportato dalla coltura, per effetto di una differente concentrazione di azoto rilevabile nella pianta. Studi effettuati sulla concimazione azotata su sorgo, riportano che l'azoto distribuito si ripartisce nelle tre componenti della biomassa secca epigea in modo variabile: il 57% circa si accumula nei

culmi, il 40,7 % nelle foglie e il 2,41% nei panicoli (Cosentino *et al.*, 2003). L'efficienza di azoto apportato diminuisce all'aumentare della dose di azoto (vedi aspetti agronomici ed ambientali della dinamica dell'azoto in una coltura di sorgo. Un'importante pratica colturale che riduce l'apporto di azoto e conseguentemente contribuisce al bilancio energetico in senso positivo è la rotazione colturale di sorgo con leguminose in quanto con la loro azione di azotofissazione nel terreno sono in grado di fornire al sorgo fino a 140 kg di azoto del suo fabbisogno. Kaye *et al.*, (2007) indicano che l'azoto fissato da una precedente coltura leguminosa comporta un miglioramento di resa fino al 35-41%. Secondo Begayoko, (2000) micorizze arbuscolari su radici di sorgo cresciuto in rotazione con legumi contribuiscono ulteriormente ad un significativo incremento di resa. In condizioni di pieno soddisfacimento idrico, la differenza tra entrate ed uscite di azoto nel terreno raggiunge il punto di pareggio con una dose di concime di poco inferiore a 150 Kg ha⁻¹ di azoto, con disponibilità idriche ridotte, il punto di pareggio si raggiunge con 120 Kg ha⁻¹ di azoto (Cosentino *et al.*, 2001) La coltura, in pieno soddisfacimento idrico, sembra in grado di ridurre sensibilmente la concentrazione di nitrati nella soluzione circolante del suolo. In particolare si è notato che la riduzione si realizza a partire dal mese di luglio, quando le piante raggiungono la fase di levata ed interessa tutto il profilo del terreno interessato dall'apparato radicale della coltura, rappresentando un significativo contributo al contenimento delle perdite di azoto per lisciviazione lungo il profilo del terreno. Il sorgo, nonostante sia sensibile al contenuto idrico nel terreno, non sembra risentire della differente dose di concime azotato somministrato, in quanto è stato dimostrato che anche in assenza di concimazione azotata è in grado di assumere cospicue quote di azoto dal terreno, aspetto di fondamentale importanza nella prevenzione dei rischi legati alla lisciviazione dei composti azotati durante il periodo successivo alla raccolta (inverno), ma negativo nel periodo di lungo termine per la riduzione di azoto disponibile per la coltura successiva che comporta un depauperamento della fertilità chimica del suolo.

Concimazione fosforica

La risposta del sorgo alla concimazione fosforica è limitata e si verifica solo nelle aree dove è fortemente limitata la disponibilità di acqua nel suolo. Terreni acidi o marginali con bassi livelli di fosforo si avvantaggiano di buoni risultati con un'applicazione iniziale.

Irrigazione

Il sostegno idrico può già essere necessario in fase di emergenza, nel caso di letto di semina troppo asciutto e carenza di piogge. Superata la fase di affrancamento, l'irrigazione

può risultare economica unicamente nei casi di forte deficit idrico. A seconda degli ambienti, gli interventi potranno essere di soccorso (ambienti sub-umidi) o sistematici (ambienti più siccitosi). La prevalenza nell'impiego dell'acqua va data alla fase di levata, contraddistinta da elevati consumi specifici (coefficienti colturali KC della FAO). Il fabbisogno irriguo del sorgo dipende soprattutto dalle caratteristiche climatiche del sito di coltivazione, quali, a titolo di esempio, le temperature medie e massime e la piovosità; inoltre, vi è un fattore intrinseco, legato alle esigenze specifiche della varietà scelta. Generalmente il fabbisogno idrico del sorgo è di 500-1.000 mm. Il sorgo è in grado di valorizzare efficacemente la disponibilità idrica del suolo. Il consumo idrico della coltura può raggiungere, nelle condizioni evapotraspirative del sud Italia e in condizioni ottimali 7-800 mm di acqua per un ciclo colturale. Negli ambienti meridionali gli apporti idrici vengono solo in minima parte assicurati dalle precipitazioni e in gran parte devono essere somministrati attraverso l'irrigazione, utilizzando sistemi di irrigazione che massimizzano l'uso dell'acqua (Figura 7). I volumi di adacquamento durante la stagione sono commisurati alla quota di ETc; possono variare tra 280 e 750 mm in rapporto all'epoca di semina (Mantineo *et al.*, 2009). Numerose prove hanno dimostrato che la riduzione della somministrazione idrica migliora l'efficienza d'uso dell'acqua. In particolare Cosentino (1996), utilizzando dati di numerose prove sperimentali condotte in Sicilia, ha rilevato una relazione tra il consumo idrico della coltura; in generale, un incremento di 100 mm d'acqua, comporta un aumento lineare di produzione di circa 5 t ha^{-1} , condizione che si verifica fino ad un apporto "limite" di 400 mm, dopo il quale l'incremento in resa conseguente a progressivi apporti idrici non è più così evidente (Cosentino, 1996). In condizioni di irrigazione ridotta l'efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE) migliora grazie ad una serie di modificazioni morfologiche che la coltura mette in atto. Le strategie che consentono di ridurre la somministrazione idrica quali le semine anticipate/tardive, l'irrigazione di soccorso durante le fasi del ciclo più sensibili allo stress idrico, il ricorso a varietà arido-resistenti, potrebbe consentire un rilevante risparmio energetico ed una razionalizzazione dell'energia impiegata. Il sorgo tollera le condizioni di stress idrico, ma le produzioni ne sono penalizzate. Ne consegue che nelle regioni mediterranee, caratterizzate da carenze idriche estive, la coltivazione del sorgo richieda un compromesso tra apporto irriguo e livelli produttivi.



Figura 7: Impianto di irrigazione a goccia localizzato

Tecniche di risparmio idrico nel sorgo da biomassa

Ai fini del raggiungimento di risultati produttivi soddisfacenti in colture energetiche dedicate, l'irrigazione assume un ruolo di primaria importanza, specialmente negli ambienti dell'Italia meridionale, dove per le limitate precipitazioni e per l'elevata domanda evapo-traspirativa dell'ambiente durante il periodo interessato della coltura, esistono poche possibilità che eventuali carenze relative alla tecnica irrigua possono essere colmate da apporti idrici naturali. Considerando, inoltre, la ormai accertata influenza esercitata dalle disponibilità idriche sulle rese finali, una migliore gestione dell'irrigazione può fortemente contribuire al miglioramento delle rese finali. Una più corretta utilizzazione della risorsa irrigua è possibile grazie ad una più precisa valutazione dei fabbisogni reali della coltura in funzione degli apporti idrici naturali, ed in particolare di quello fornito dalle falde superficiali, dello sviluppo dell'apparato radicale, della tecnica colturale e della destinazione del prodotto (Battilani, 1994). La conoscenza dei momenti in cui la coltura manifesta le maggiori necessità d'acqua può avere implicazioni:

- dirette, sul suo sviluppo, sulla produzione;
- indirette, sul risparmio di acqua, con conseguenze sui costi colturali e sull'impatto ambientale.

Se non intervengono eventi meteorologici favorevoli, subito dopo la messa a dimora (trapianto o semina) una leggera irrigazione facilita nel primo caso l'attecchimento delle piantine, nell'altro l'emergenza rapida e contemporanea, che si traduce in una più uniforme contemporaneità di maturazione, auspicabile per la raccolta meccanica. Successivamente alla messa a dimora, in corrispondenza delle prime fasi di accrescimento, le esigenze idriche della pianta si riducono, poiché tale fase riguarderà soprattutto l'apparato radicale che, se sottoposto a condizioni di carenza idrica, incrementerà il proprio accrescimento alla ricerca di fonti di approvvigionamento nel terreno. Il momento critico per l'acqua corrisponde alla fase fenologica di "levata" quando anche condizioni di stress idrico di modesta gravità possono provocare arresto della fase fenologica, con conseguenti ripercussioni sulla resa di biomassa finale. A partire dalla fase di fioritura, tutte le energie della pianta, il cui apparato radicale ha raggiunto il suo massimo sviluppo, sono concentrate nell'incremento della parte epigea (panicolo). Condizioni di stress portano alla riduzione delle aperture stomatiche, dei fenomeni di traspirazione e fotosintesi che, aggravati dall'innalzarsi delle temperature, determinano l'arresto di accrescimento degli organi vegetativi e riproduttivi. Risulta quindi, necessario stabilire dei criteri, su base scientifica, per definire quando irrigare e quanta acqua somministrare, per ottimizzare la risposta produttiva della coltura e l'efficienza d'uso della risorsa idrica (Tan, 1988). Attraverso una opportuna regimazione dell'acqua di irrigazione di potrebbe, pertanto, raggiungere un giusto compromesso tra risparmio idrico e produzione finale. Uno dei due metodi per ridurre la quantità d'acqua da somministrare alla coltura attraverso l'irrigazione e mantenere un buon livello di produttività migliorando la efficienza di uso dell'acqua (Water Use efficiency) (Pereira *et al.*, 2002) è rappresentato dalla "Deficit Irrigation" (DI); l'altro dalla "Partial Rootzone Drying Irrigation" (PRD).

La *Deficit Irrigation* (DI), è una strategia di risparmio idrico in cui la coltura viene deliberatamente indotta a sostenere un certo grado di stress idrico e di riduzione di resa (English e Raja, 1996). Questa tecnica comporta la irrigazione della intera zona radicale con volumi inferiori alla evapotraspirazione, ed i suoi effetti sono stati studiati ampiamente su diverse colture (Sepaskhah e Kamgar-Highighi, 1997; Dorjia K. *et al.*, 2005). In zone con scarsa disponibilità idrica e lunghi periodi estivi di siccità, come la Sicilia, la DI viene consigliata al fine di contenere drastiche riduzioni di resa. Tuttavia l'adozione della DI richiede una conoscenza degli stadi del ciclo di crescita della coltura che mostrano una maggiore tolleranza a condizioni di stress idrico e, pertanto, gli agricoltori possono

incontrare qualche difficoltà nell'uso della DI. Stabilire il momento in cui si deve irrigare disponendo di un approvvigionamento idrico autonomo è attualmente ancora problematico. Le numerose tecniche preposte si basano sulla umidità (o potenziale dell'acqua) del terreno fissando nel raggiungimento di un dato valore, oppure sulla determinazione dello stato idrico delle piante (o anche parti di queste) e, infine, sulla evapotraspirazione.

La *Partial Rootzone Drying Irrigation* (PRD), è una forma modificata della Deficit irrigation (English *et al.*, 1990), che coinvolge l'irrigazione solo di una parte della zona radicale in ogni turno di irrigazione, lasciando asciutta l'altra porzione di radice fino al turno irriguo successivo. Il lato delle radici asciutte rispondono sintetizzando acido abscissico (ABA), un regolatore di crescita delle piante, che viaggia attraverso lo xilema vascolare alle foglie innescando una riduzione della apertura degli stomi e di conseguenza una riduzione della perdita di traspirazione dell'acqua. Una rappresentazione schematica della Full Irrigation (FI), DI e PRD sono illustrati nella Figura 8 (Davies e Hartung, 2004).

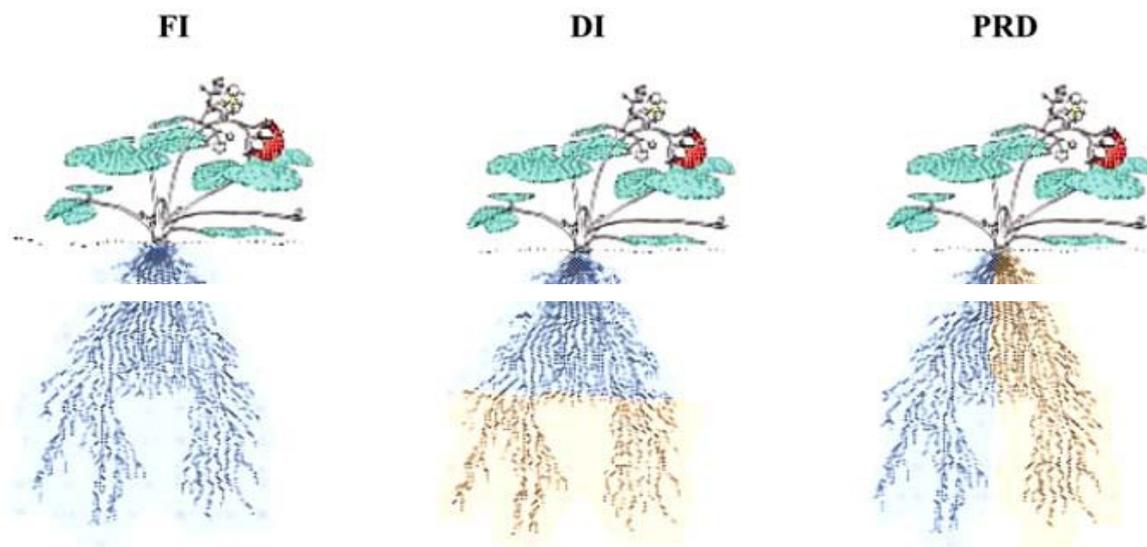


Figura 8. Rappresentazione schematica della FI, DI, e PRD (Davies e Hartung, 2004).

In origine, la strategia del PRD è stato applicato da Grimes *et al.* (1968) negli Stati Uniti sul cotone in campo dove veniva eseguita l'irrigazione a solchi alternati e poi seguito da Sepaskhah *et al.* (1976), Sepaskhah e Amin-Sichani (1976), e Samadi e Sepaskhah (1984) sul fagiolo attraverso irrigazioni a goccia in superficie e del sottosuolo in Iran. Più tardi, alcuni studi approfonditi su PRD sono stati condotti in Australia e il termine PRD è stato utilizzato e sviluppato per la vite (Loveys *et al.*, 2000; Kriedmann e Goodwin, 2003). La

PRD è stato originariamente sviluppato come tecnica di irrigazione atto a stimolare l'apparato radicale facendo aumentare così la Water Use Efficiency. Per quanto riguarda il sorgo, in base ai risultati di numerose ricerche, si deve intervenire allorchè il contenuto idrico scende al di sotto del 60-70% di acqua utile (acqua tra capacità di campo e punto di appassimento). Oltrepassando questo limite soprattutto durante il periodo critico che per il sorgo corrisponde alla fase di inizio fioritura, si verifica una perdita in biomassa rilevante. Occorre dire che determinare di volta in volta l'umidità del terreno è estremamente oneroso (campionamento, essiccamento in stufa, pesate) e richiede tempo e, d'altronde, l'impiego di tensiometri presenta problemi di corretto posizionamento e di scarsa sensibilità a variazioni limitate le potenziale idrico. Più utilizzato attualmente è il sistema della evapotraspirazione attraverso i valori della evaporazione da vasca evapori metrica, in generale quella detta di classe "A". Tali valori devono essere, comunque, corretti in base a quelli della evapotraspirazione, ottenuti da ricerche sperimentali con lisimetri in zone caratterizzate dalle medesime o analoghe condizioni climatiche. Il governo dell'acqua è un aspetto di primaria importanza, a prescindere dal sistema irriguo adottato, in considerazione del fatto che le risorse idriche rappresentano sempre più spesso il principale fattore limitante nell'agricoltura dei Paesi caldo-aridi (Dumas 1999).

Varietà zuccherine: nel sorgo zuccherino al suo interno, il culmo è midolloso, succoso e ricco in zuccheri solubili (Figura 9), la cui percentuale sul fresco può variare dall'8% al 14%. Lo stelo contiene il 36-40% di cellulosa, il 25-30% di emicellulosa e 8-9% di lignina. L'infiorescenza è costituita da un panicolo di dimensioni molto più ridotte rispetto ai tipi da granella per evitare un eccessivo accumulo di carboidrati nel seme. I vantaggi legati alla sua coltivazione ai fini energetici derivano dalla facilità con cui può essere introdotto negli ordinamenti colturali in atto applicando l'ordinaria tecnica colturale e il parco macchine aziendale. I punti di debolezza riguardano allo stato attuale il reperimento del seme. Aspetti problematici sono costituiti dalla necessità dell'irrigazione negli ambienti meridionali, la suscettibilità all'allettamento, che si controlla in parte attraverso la tecnica agronomica (concimazione, irrigazione, densità di semina), in parte con la scelta di genotipi.



Figura 9. Sorgho zuccherino

Varietà da fibra: nel sorgo da fibra invece, la parte esterna del culmo è fibrosa, mentre la parte centrale appare, comunque, spugnosa (Figura 10). Nel sorgo da fibra si verifica una diversa destinazione del carbonio organico durante la fotosintesi rispetto a quello da zucchero: nel tipo da fibra prevale la produzione di carboidrati strutturali, in particolare di cellulosa; nel tipo da zucchero, invece, almeno il 30% di tutta la sostanza secca accumulata è costituita da zuccheri semplici (saccarosi, glucosio e fruttosio) (Cosentino e Copani, 2003). I vantaggi specifici del sorgo da fibra riguardano il facile reperimento del seme, che attualmente viene prodotto e distribuito in Europa, la minore suscettibilità all'allettamento rispetto al tipo zuccherino, aspetto che costituisce, tra l'altro, un degli obiettivi del miglioramento genetico a cui si sta lavorando in Italia. Nonostante le caratteristiche di arido-resistenza, negli ambienti meridionali il sorgo può essere introdotto in sistemi colturali in irriguo e nelle aziende agrarie dove è prevista l'irrigazione di soccorso. Il rispetto dei principi dell'aridocoltura giova alla sostenibilità economica ed ambientale del sorgo da biomassa negli ambienti meridionali.



Figura 10. Sorgho da fibra

Trattamenti antiparassitari

Il sorgo è una specie molto resistente agli stress biotici; in generale la maggior parte dei “parassiti” non causano seri danni alla coltura; un’adeguata gestione di pratiche agricole (concimazione, irrigazione, rotazioni colturali) e l’utilizzo di semi di alta qualità, contribuiscono ad aumentare la resistenza verso tali avversità. Tuttavia, il sorgo mostra una certa suscettibilità a lepidotteri ed afidi che causano danni diretti alla produzione ed indiretti essendo vettori di virus. Trattamenti chimici si rendono talvolta necessari nel caso di forti infestazioni. Nel caso di varietà sensibili agli agro-farmaci organo fosforici, è preferibile ricorrere in sostituzione di questi ad un controllo di tipo fisico-meccanico-biologico. Prima della semina i semi di sorgo sono trattati con insetticidi e fungicidi in modo da prevenire marciumi radicali e attacchi da insetti. Allo stadio vegetativo, la coltura mostra suscettibilità nei confronti di funghi patogeni (antracosi fusarium) e virus controllabili attraverso varietà resistenti e pratiche di avvicendamento.

Protezione della coltura

Il sorgo è molto sensibile alla competizione con le infestanti, soprattutto nelle prime fasi del ciclo biologico (i.e. dalla semina alla completa copertura del suolo, quando la pianta raggiunge l’altezza di 1 m). Dunque, è essenziale che nel corso della preparazione del letto

di semina siano eliminate le infestanti, anche mediante l'applicazione di prodotti fitoiatrici. Inoltre, l'applicazione di diserbanti deve essere ripetuta immediatamente dopo la semina (i.e. in pre-emergenza), perché la germinazione del sorgo è molto rapida e la coltura potrebbe essere danneggiata in caso di ritardo nell'applicazione. Il sorgo è suscettibile alle stesse malattie ed all'attacco da parte degli stessi parassiti che danneggiano le coltivazioni estensive di mais e canna da zucchero, rispettivamente negli USA ed in Brasile. Contrariamente, se le coltivazioni non sono vaste, questi problemi non si verificano. Per quanto riguarda i danni da agenti abiotici, il sorgo è sensibile soprattutto al freddo ed è soggetto all'allettamento.

1. Freddo. Si può ovviare a questa criticità attraverso una adeguata scelta della varietà (i.e. sulla base della durata del ciclo biologico) e del periodo di semina.
2. Allettamento. Si può ovviare a questa criticità attraverso un'adeguata scelta della varietà e della tecnica colturale applicata (i.e. altezza delle piante, diametro dei culmi, densità delle piante, fertilizzazioni azotate), nonché della data di raccolta.

Raccolta

Un valido sistema per la raccolta della biomassa prevede il taglio con falci-condizionatrice, (Figura 11), seguito da essiccamento in andane fino ad un contenuto di umidità del 20-25%. A questo punto è possibile imballare e stoccare il prodotto. Questa modalità è consigliabile, nel centro-nord Italia, non oltre la prima decade di settembre, con sorgo in maturazione latteo-cerosa. Ritardare oltre tale epoca aumenta il rischio di piogge che causano allettamento e ostacolano la raccolta del prodotto da terra. Altri sistemi prevedono: sfalcio, trinciatura, essiccazione del prodotto a terra e successiva raccolta con imballatrice; trinciatura, caricamento diretto del prodotto e successivo insilamento. In terreni fertili del nord Italia, gli ibridi odierni raggiungono produzioni parcellari da 20 a 30 t ha⁻¹ di s.s. in asciutto mentre la produzione media si attesta intorno alle 100 t ha⁻¹ di materiale fresco con il 10-12% di saccarosio in media e con un rendimento potenziale del 60% di alcool per fermentazione (Baldoni, 2000). In condizioni ottimali di rifornimento idrico è in grado di raggiungere alti livelli di produzione (40 t ha⁻¹) e un'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) compresa tra 48 e 5,3 g l⁻¹ mentre in condizioni di limitata disponibilità idrica la WUE migliora per effetto di una serie di modificazioni morfologiche. La produzione areica di biomassa è direttamente proporzionale alla somministrazione idrica, tuttavia secondo Foti *et al.* (1997), esiste una relazione tra acqua utilizzata dalla coltura e

biomassa secca totale, ed una tra acqua utilizzata e produzione relativa massima, variabili secondo epoche di semina differenti. Queste relazioni sono di tipo quadratico: l'aumento di produzione in biomassa secca totale è più marcato al verificarsi di semine precoci, rispetto a quelle tardive, probabilmente perché svolgono il proprio ciclo durante il periodo di massima intensità luminosa e hanno un apparato fogliare con una maggiore durata in efficienza. In generale, un incremento di 100 mm d'acqua, comporta un aumento lineare di produzione di circa 5 t ha^{-1} , condizione che si verifica fino ad un valore "limite" di 400 mm, dopo il quale l'incremento in resa conseguente a progressivi apporti idrici non è più così evidente. Il momento migliore per la raccolta avviene in corrispondenza della fase di riempimento dei grani (Ottobre-Novembre).



Figura 11: Raccolta meccanica del sorgo da biomassa

7. ECOFISIOLOGIA DELLA COLTURA

I fattori che presiedono alla produzione della granella sono stati oggetto di numerose ricerche, mentre gli studi sugli aspetti fisiologici relativi all'accumulo di carboidrati solubili devono ancora essere perfezionati. Gli aspetti fisiologici della resa del sorgo devono essere trattati evitando di generalizzare i risultati ottenuti, considerando l'elevato grado di differenziazione delle razze, delle famiglie e dei vari genotipi.

8.1. *Fotoperiodismo e reazione alla temperatura*

Il sorgo è una pianta brevidiurna. I meristemi apicali rimangono vegetativi producendo solo abbozzi fogliari fino a quando la lunghezza del giorno è sufficientemente breve (fotoperiodismo critico). Considerando le temperature (Doggett, 1988) ed il regime luminoso giornaliero Doggett ha raggruppato le piante di sorgo in tre diversi gruppi:

- sorgo tollerante al freddo
- sorgo adatto a climi temperati
- sorgo adatto a climi tropicali

La variabilità genetica per la tolleranza al freddo è stata usata in parecchi programmi di miglioramento genetico (Miller, 1982). In termini di produzione reale la biomassa di sorgo zuccherino ottenibile nelle condizioni climatiche medie della Sicilia oscillano, nell'ambito delle aree che presentano una somma termica sufficiente ($1862\text{ }^{\circ}\text{C}$), tra le 6 e le 12 t ha^{-1} . La produzione non supera le 6 t ha^{-1} nell'ambito delle aree più siccitose delle pianure e delle zone costiere, e sale a 8 t ha^{-1} nella collina interna e nell'altopiano ibleo, raggiungendo le $10\text{-}12\text{ t ha}^{-1}$ nelle aree delle Madonie e nell'Ennese (Foti *et al.*, 1997). Un modello per la previsione dell'emissione delle foglie, in funzione della temperatura e del fotoperiodo, è stato sviluppato (Mantineo *et al.*, 1996) nella varietà "Keller" ed è stata studiata la risposta al fotoperiodo della durata dello stadio emergenza-fioritura. Queste relazioni sono state utilizzate per stimare i coefficienti genetici necessari per l'utilizzazione del modello di produttività "CERES" sorgo.

7.1 **Assimilazione e ripartizione dei fotosintetati**

Il sorgo è una pianta C4 che ha un'elevata efficienza fotosintetica in presenza di un alto livello di luminosità. Le specie mostrano un'elevata capacità di accumulare s.s. in relazione al consumo idrico, ma l'efficienza idrica della pianta anche in presenza di un'elevata illuminazione decresce se le temperature scendono al di sotto dei valori ottimali. Fra le caratteristiche intrinseche del sorgo che limitano l'accumulo di s.s., la più importante

sembra essere la disposizione fogliare. Importante è pure l'investimento unitario per la determinazione della resa. Il LAI dipende, infatti, dal numero delle piante, ed ha un ruolo rilevante nel condizionare la resa in s.s. (Fisher e Wilson, 1975). Un buon controllo del LAI può essere effettuato utilizzando piante monostelo.

7.2 Accumulo di carboidrati non strutturali

Il miglioramento genetico ha permesso di selezionare genotipi di Sorghum che possono accumulare una notevole quantità di carboidrati nei culmi. I loro culmi, analizzati durante la maturità fisiologica, presentano una concentrazione totale di zuccheri compresa tra il 17,8% e il 40,3% sul totale della s.s. (Subramanian *et al.*,1987). È evidente che esiste una correlazione tra lo stadio di maturazione e la concentrazione dei carboidrati non strutturali. Nei sorghi zuccherini il contenuto totale di carboidrati incrementa significativamente dopo l'antesi (Webster *et al.*,1948; McBee e Miller, 1982; McBee, 1984). Gli zuccheri solubili sono costituiti principalmente da fruttosio, glucosio e saccarosio. Il contenuto in saccarosio aumenta raggiungendo il massimo dopo lo stadio di maturazione cerosa. La concentrazione di zuccheri invertiti appare maggiore nella parte superiore dello stocco rispetto alla parte basale e centrale. Gli effetti della lunghezza del giorno sugli zuccheri solubili sono evidenti durante la fase di botticella, infatti, la massima concentrazione di carboidrati non strutturali si ha verso sera mentre successivamente il loro contenuto si riduce. Il livello di carboidrati negli stocchi dipende anche dal grado di senescenza, infatti, i genotipi "non-senescenti" mantengono le foglie verdi anche dopo la maturazione della granella (Duncan *et al.*,1981), condizione questa che favorisce l'accumulo dei carboidrati. Ricerche effettuate (Copani *et al.*,1989) sulle differenti caratteristiche biologiche, la resa in zuccheri fermentescibili e l'accumulo di questi durante il ciclo biologico, in varietà di sorgo zuccherino coltivate in Sicilia, hanno fornito valide indicazioni sull'adattabilità della coltura e sulla scelta del genotipo più idoneo. In particolare è emersa la superiorità delle varietà a ciclo lungo, distinte per la loro elevata capacità ad accumulare zuccheri negli stocchi, le cui rese sono risultate comprese tra 17,9 e 15,4 t ha⁻¹. In tali varietà il massimo accumulo è coinciso con le fasi finali del ciclo colturale.

8. ANALISI DELL'ACCRESIMENTO (Growth analysis)

Considerata la complessità dei fattori naturali e tecnici che intervengono nel determinismo della resa, l'analisi delle componenti di questa, non è sufficiente a renderci ragione dei fatti e dei fenomeni che in un dato ambiente contribuiscono a deprimerla o ad esaltarla. Per accettare le basi fisiologiche delle variazioni della produzione vegetale, il progresso della ricerca scientifica ha richiesto metodi di indagine più analitici ed approfonditi. Tra questi, merita di essere ricordata la cosiddetta analisi dell'accrescimento, fondata sul rilievo, in corrispondenza di stadi o momenti successivi del ciclo biologico, del peso secco totale e della superficie fogliare, sia di una pianta singola che di un gruppo di piante facenti parte di una comunità coltivata. Questi dati, opportunamente elaborati, servono a calcolare una serie di indici, attraverso i quali è possibile analizzare il procedere dell'accrescimento e alla luce dei fattori ambientali e tecnici che intervengono nelle successive fasi del processo stesso comprendere meglio il determinismo della produzione, analizzare o individuare le cause che possono limitarla, mettere a punto mezzi per esaltarla. Tra gli indici più comunemente adottati per l'analisi dell'accrescimento ricordiamo.

Indice dell'area fogliare (LAI): esso esprime la superficie fogliare che insiste sull'unità di superficie del terreno. Quando all'assimilazione carbonica concorrono anche strutture diverse da quelle fogliari, quali guaine, culmi, glume, ecc., può essere utile determinare la superficie assimilatoria comprendente, oltre all'area fogliare, anche quella di queste altre strutture. Il valore medio del LAI, che indica l'incremento della superficie delle foglie che ricadono sulla unità di superficie del terreno, in un determinato intervallo di tempo, si ricava dalla seguente espressione:

$${}_{1-2} \overline{\text{LAI}} = 2^L A + 1^L A/S$$

ed è espresso da un numero puro.

Indice della durata dell'area fogliare (LAD): esprime la durata in efficienza dell'apparato fogliare, dalla quale, congiuntamente con l'estensione dell'apparato stesso e con l'intensità di assimilazione, dipende la quantità di materia organica prodotta da una pianta o da una coltura. Il relativo valore medio, in un determinato intervallo di tempo, si ricava dall'espressione:

$${}_{1-2} \overline{\text{LAD}} = (1^L A + 2^L A) * (2^T - 1^T)/2$$

Si esprime in centimetri quadrati di superficie assimilante per giorni di funzionamento ($\text{cm}^2 * \text{d}$), e rappresenta l'integrale del LAI nel tempo,

dove:

LAD = Leaf Area Duration (giorni)

LAI₁ e LAI₂ = LAI rispettivamente al tempo t₁ e t₂

t₁ e t₂ = numero di giorni dalla semina ai prelievi rispettivamente 1 e 2

E' stata, dunque, presa in considerazione la sommatoria dei valori di LAD calcolati per ciascun intervallo di tempo fra un prelievo ed il successivo.

Altro indice di crescita della coltura è dato dal tasso di crescita della coltura (Crop Growth Rate, CGR) attraverso la seguente formula:

$$\text{CGR} = (\text{B}_2 - \text{B}_1) / (t_2 - t_1)$$

dove:

CGR = Crop Growth Rate ($\text{g s.s. m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

B₁ e B₂ = biomassa secca (g m^{-2}) rispettivamente al tempo t₁ e t₂

t₁ e t₂ = numero di giorni dalla semina dei semi ai prelievi rispettivamente 1 e 2.

Il CGR dipende dalla genetica, soprattutto per l'ampiezza dell'apparato foto sintetizzante, ma viene fortemente condizionato dai fattori ambientali, dalla competizione e dalle operazioni colturali.

Altro indice di accrescimento è il NAR (Net Assimilation Rate). Il NAR rappresenta la velocità di accumulo di sostanza secca riferita all'unità di area foto sintetizzante, ed è espresso dalla seguente formula:

$$\text{NAR} = 1 / (L_2 - L_1) * (\text{B}_2 - \text{B}_1) / (t_2 - t_1)$$

dove:

NAR = Net Assimilation Rate ($\text{g s.s. m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

t₁ e t₂ = numero di giorni dalla semina ai prelievi rispettivamente 1 e 2

B₁ e B₂ = biomassa secca (g m^{-2}) rispettivamente al tempo 1 e 2

L₁ e L₂ = superficie fogliare al tempo t₁ e t₂

Il NAR dipende dalla velocità di fotosintesi, dal tasso di respirazione, e dalla traspirazione e funzionalità delle foglie.

9. RISPOSTA DELLA PIANTA DI SORGO AGLI STRESS IDRICO, SALINO E TERMICO

E' bene iniziare la discussione sugli stress dandone la giusta definizione. Gli stress abiotici, definiti come qualsiasi causa di natura fisica o chimica che limita lo sviluppo e la crescita della pianta, provocano seri danni alla produttività e alla qualità dei prodotti agricoli. Si stima che soltanto il 10% della superficie coltivata nel mondo può essere classificata nella categoria "non stress" mentre il restante 90%, con diversa intensità, può essere soggetta a stress singoli o combinazioni di stress (Sharma K.K., Lavanya M. 2002). Le riduzioni qualitative delle produzioni causate dal verificarsi dei fenomeni di stress sono ingenti a livello mondiale ed italiano, tanto che diversi governi considerano una priorità la ricerca di base ed applicata, al fine di sviluppare nuove tecnologie da introdurre nella pratica agricola per limitare gli effetti avversi. A breve e medio termine sono stati promossi interventi di base per comprendere i meccanismi di difesa (naturalmente presenti nella biodiversità vegetale) attivati dalle piante al verificarsi dei fenomeni di stress. Una volta acquisiti questi risultati saranno esportati nella pratica agricola mediante tecnologie innovative ed in condizioni di agricoltura sostenibile. A parte le zone endemicamente caratterizzate da condizioni limitanti, vaste aree, tra cui le regioni mediterranee, sono soggette ad eventi di stress, quali periodi di siccità o inverni particolarmente rigidi, sempre più frequenti in seguito ai cambiamenti globali del clima. Pertanto, mentre l'incremento delle produzioni agricole resta ancora un obiettivo di importanza prioritaria nei Paesi in via di sviluppo, la stabilità di produzione e la qualità dei prodotti rappresentano l'obiettivo cruciale per l'economia e la sicurezza alimentare di tutti i Paesi. Nelle regioni mediterranee, ed in particolare in Italia, il freddo e la siccità sono gli stress abiotici più frequenti; il primo costituisce un fattore limitante sia per le piante a ciclo invernale che per quelle a ciclo estivo, soprattutto durante le fasi precoci di vita della pianta, mentre la carenza idrica influenza negativamente la stabilità e la qualità della produzione di quasi tutte le specie coltivate in Italia. Nel caso di stress idrici, ossia in condizioni di siccità, la pianta mette in gioco alcuni meccanismi per contrastare il processo di mancanza di acqua: si deve fare una distinzione tra disidratazione ritardata (abilità a mantenere i tessuti idratati) e tolleranza alla disidratazione (abilità a funzionare durante la disidratazione) perché spesso si definiscono erroneamente come tolleranti alla siccità a potenziali idrici rispettivamente alti e bassi. La vecchia letteratura indicava "evitazione della siccità" contrapposta a "tolleranza alla siccità", ma tale terminologia risulta essere inappropriata in quanto la siccità è una

condizione meteorologica tollerata da tutte le piante che riescono a sopravvivere ad essa e che nessuna pianta può evitare. Esiste una categoria, la fuga dalla siccità, che comprende quelle piante che compiono il loro ciclo biologico durante la stagione umida, prima dell'arrivo della siccità. Nel caso di stress salini, A livello fisiologico le piante subiscono tre tipi di danni da salinità : osmotico, nutrizionale e tossico (Greenway e Munns, 1980). A questi si aggiungono quelli derivanti da asfissia radicale causata dalla riduzione della permeabilità dei terreni, quando nell'acqua d'irrigazione il contenuto di sodio rispetto a quello del calcio e del magnesio (SAR, sodium absorption ratio) è elevato. I danni osmotici, legati al basso potenziale idrico del terreno, sono dovuti ad una riduzione del turgore cellulare che comporta alterazione dei processi metabolici ed inibizione della crescita. Lo stress nutrizionale, invece, è dovuto alla competizione ionica nei processi di assorbimento radicale. Il danno tossico, infine, può influire sia sulla funzionalità di membrana, alterando la permeabilità ed il trasporto, sia sulle attività enzimatiche danneggiando processi metabolici quali fotosintesi e respirazione. Il grado di tossicità dei diversi sali varia con la specie e con il sistema di coltivazione. La relazione tra la salinità dell'acqua irrigua, espressa con la sua conducibilità elettrica (CE_i), o del terreno, espressa come conducibilità elettrica dell'estratto di pasta satura (CE_e), presenta due parametri che risultano indicativi nel discriminare le diverse specie e/o cultivar (Barbieri e De Pascale, 1995):

- "soglia critica" di salinità che rappresenta il livello massimo di salinità tollerato senza perdita di produzione; al di sotto di tale valore di salinità, quindi, la produzione relativa è del 100%;
- "pendenza" che rappresenta un fattore che lega linearmente le riduzioni produttive con gli incrementi di salinità al di sopra del valore soglia; in pratica indica la riduzione produttiva per ogni incremento unitario di salinità.

Attraverso tali parametri è possibile definire il grado di tolleranza delle diverse specie e formulare, così, una loro classificazione. Gli effetti della salinità su una coltura possono variare in relazione allo stadio fenologico in cui lo stress si manifesta. Per esempio è noto che la tolleranza alla salinità durante la germinazione non è correlata alla tolleranza nella fase di emergenza, in fase vegetativa, in fioritura o durante la fruttificazione (Pessaraky, 1994). Conoscere la risposta alla salinità di una specie nei diversi stadi di crescita è portante non solo per una oculata scelta colturale ma anche per adottare idonee strategie agronomiche, quali una corretta gestione dell'irrigazione, soprattutto quando oltre che di

acqua salmastra si dispone anche di risorse idriche di buona qualità con cui è possibile irrigare nelle fenofasi critiche. La resistenza alla salinità delle specie vegetali è un carattere complesso con implicazioni a diversi livelli di organizzazione (organo, tessuto, cellula ed organello). Molteplici, infatti, sono i meccanismi messi in atto dalla pianta per proteggere i componenti sensibili dagli effetti dannosi dei sali. Tali meccanismi possono riguardare le capacità di filtro della membrana plasmatica (pompate ioni fuori dalla membrana o dentro il vacuolo) e la capacità di singole foglie di costituire una riserva di ioni tossici, mentre le regioni meristematiche del germoglio ed i frutti in accrescimento sono i più protetti dall'accumulo di ioni tossici. Molti altri caratteri come la conduttanza stomatica, la struttura del mesofillo, le cere epicuticolari, la colorazione e la forma fogliare possono giocare un ruolo determinante nel conferire resistenza. Sebbene molti passi avanti siano stati fatti per classificare le diverse specie vegetali in base al loro livello di tolleranza alla salinità, quest'ultimo risulta altamente variabile in relazione al genotipo, all'ambiente pedoclimatico ed alle tecniche agronomiche utilizzate. In particolare l'adozione di idonee strategie agronomiche, in associazione con un'oculata scelta della specie e della cultivar, consentirebbe di minimizzare le riduzioni di resa. Ciò riguarda in particolar modo il controllo della salinità della zona radicale, soprattutto durante la germinazione e nelle prime fasi fenologiche, ottenibile, per esempio, incrementando la frequenza d'irrigazione o con il soddisfacimento del fabbisogno in lisciviazione.

9.1 Stress idrico

Il deficit idrico nella cellula si verifica quando il tasso di traspirazione supera quello di assorbimento, ed è una componente di stress diversi quali siccità, basse temperature, salinità, attacco massiccio di parassiti. La risposta dipende dalla quantità di acqua perduta, dal tasso di perdita, e dalla durata dello stress. Quando la perdita di acqua è limitata (<10%) il danno è reversibile e il recupero della funzione può essere totale al ristabilirsi dell'equilibrio; il danno invece è irreversibile quando la perdita di acqua è più intensa (30-40%) e il recupero della funzione, a seguito di una ottimale re-idratazione, è seriamente compromesso. In queste condizioni la pianta accelera le fasi di sviluppo al fine di convogliare tutte le sostanze di riserva negli organi riproduttivi per garantire la sua sopravvivenza. La siccità è uno stress multidimensionale difficile da caratterizzare; può infatti colpire la pianta in diverse fasi del ciclo vegetativo, con tempi più o meno prolungati (da pochi minuti fino anche a settimane o mesi), provocando una serie di sintomi che

vanno dalla chiusura degli stomi fino all'inibizione della fotosintesi ed alla morte. Anche la tolleranza a questo stress è un carattere complesso, dipendente da svariate caratteristiche morfologiche e funzionali proprie della pianta, come lo sviluppo delle radici, la forma e l'esposizione delle foglie, la concentrazione relativa di acqua (RWC), la capacità di aggiustamento osmotico (OA), la presenza di cere, l'accumulo di osmoliti ed ABA. L'aumento della quantità di questo ormone ha un ruolo fondamentale nel determinare la risposta allo stress idrico. L'ABA è ormone chiave in meccanismi di resistenza, come la chiusura degli stomi e l'espressione di geni specifici contro la disidratazione. Diversi studi sono stati condotti sui cambiamenti giornalieri e periodici dello stato idrico del sorgo, in relazione a diverse condizioni climatiche (Blum, 1977). Sono state approfondite le conoscenze sul comportamento biologico, fisiologico e produttivo del sorgo zuccherino in relazione alla disponibilità idrica del terreno (Cosentino *et al.*, 1996). La "Water Use Efficiency" è risultata in condizioni idriche ottimali del terreno, compresa tra 188 e 210 l kg⁻¹ (Cosentino, 1996), abbastanza contenuta, se comparata ad altre colture nello stesso ambiente (Foti *et al.*, 1996). In condizioni di limitata disponibilità idrica la WUE migliora per effetto di una serie di modificazioni morfologiche. Lo stato idrico della pianta viene influenzato da un deficit idrico del terreno superiore al 70-75% dell'acqua disponibile a cui corrisponde un potenziale idrico fogliare "a midday" di -12, -14 bar. Al di sotto di questa soglia la traspirazione fogliare e la conduttanza stomatica si riducono progressivamente, diminuendo lentamente; questo meccanismo dovuto alla regolazione osmotica della pianta, le permette di continuare a scambiare gas con l'atmosfera e ad assimilare anche a potenziali idrici fogliari molto bassi. Sono state riscontrate (Sung e Krieg 1978; Krieg *et al.*, 1978) differenze genotipiche fra i vari ibridi e le diverse cultivar per quanto riguarda la distribuzione dei fotosintetati in condizione di stress idrico. Jordan e Monk (1980) e Jordan e Sullivan (1982) hanno rilevato che l'epoca di maturazione, la conformazione dell'apparato radicale, la presenza di uno strato ceroso epiculicolare, la regolazione osmotica, la tolleranza al caldo e all'essiccamento sono i meccanismi che consentono alle piante di sfuggire allo stress idrico. Gli autori hanno concluso che l'utilizzo di questi meccanismi implica, tuttavia, una riduzione della resa finale. Studi simili a questi, effettuati sul sorgo e su altre colture cerealicole, hanno dimostrato che il sorgo rispetto agli altri cereali richiede una minore quantità di acqua (Miller, 1923), ha un rapido recupero dopo lo stress (Glover, 1959), riduce le perdite in acqua in seguito allo stress (Sanchez – Diaz e Kramer, 1971) ed ha migliori meccanismi in termoregolazione fogliare. Tutte

queste caratteristiche permettono al sorgo di superare le rese del mais in condizioni di limitata disponibilità idrica (Gilley *et al.*, 1980). Brown *et al.*, (1959) hanno descritto i consumi idrici stagionali di diverse aree produttive interessate alla coltivazione del sorgo rappresentative di diverse condizioni ambientali e pedologiche, e di diverse disponibilità idriche. Si può affermare che il consumo idrico giornaliero di una prima fase dipende in larga misura dall'evaporazione della superficie del suolo, mentre successivamente, la traspirazione delle foglie sufficientemente sviluppate fa variare il rapporto fra i due fattori responsabili del consumo idrico rendendo così possibile la valutazione della loro incidenza relativa. Il sorgo se si trova in buone condizioni idriche, ha una temperatura fogliare di diversi gradi inferiore alla temperatura dell'aria, questo è indice di un'elevata traspirazione (Van Bavel *et al.*, 1967). La differenza di temperatura tra le foglie e l'aria è molto accentuata nel tardo pomeriggio quando l'incidenza delle radiazioni declina rapidamente ma la temperatura delle foglie raggiunge il suo massimo. Nella prima parte della fase di rendimento della granella si ha un consumo idrico elevato mentre le fasi finali dello stesso periodo sono caratterizzate da una diminuzione del consumo idrico. La riduzione dei consumi idrici delle ultime fasi del ciclo della pianta è da mettere in relazione con la riduzione della superficie fogliare, che è un fenomeno dovuto alla senescenza delle foglie. Lo stesso accade nelle radici cosicché esse non possono assorbire un quantitativo di acqua in grado di far fronte ad un elevato tasso di traspirazione. La senescenza è anche responsabile delle resistenze che il flusso idrico trova all'interno della foglia. I fattori citati possono spiegare la riduzione del potenziale idrico nelle foglie vecchie in presenza di disponibilità idriche illimitate (Hsiao *et al.*, 1978). Gli effetti dello stress idrico possono essere differenti in relazione al momento del suo intervento e alla sua intensità. Lo stadio di differenziazione del panicolo è lo stadio di sviluppo in cui il sorgo soffre maggiormente lo stress idrico. Se le piante riescono a superare con il minimo stress questa fase si avrà solo una minima riduzione del peso dei semi. L'influenza del numero di piante sull'evapotraspirazione è stata riconosciuta simile agli effetti che ha il grado di copertura del terreno sull'ET. Diversi studi effettuati in regioni aride e semi-aride hanno messo in evidenza l'importanza che ha la velocità di sviluppo della copertura fogliare in relazione ad una possibile riduzione dell'acqua evaporata dal terreno e all'incremento traspirativo della pianta, indipendentemente dal quantitativo di acqua traspirata a causa della radiazione netta (Ritchie e Burnett, 1971). I risultati fin qui ottenuti sottolineano la necessità di modificare la disposizione delle piante per cercare di avere la massima copertura vegetale più presto

possibile, compatibilmente con i limiti di densità offerti dalla disponibilità idrica. La durata e l'intensità dello stress durante la fase di crescita sono fattori estremamente critici nella determinazione della risposta delle piante in relazione alla loro capacità a produrre granella. Esistono grandi differenze genotipiche per quanto riguarda la differenziazione del panicolo in relazione allo stress idrico, che riesce a condizionare il numero di semi del panicolo e di conseguenza la resa potenziale. Ulteriori differenze genotipiche possono essere importanti nella determinazione dell'efficienza di utilizzazione idrica; queste sono identificate nei differenti angoli di intersezione fogliare, che alterano il rapporto fotosintesi/traspirazione, nella lunghezza e nella densità radicale, che possono fare variare il quantitativo di acqua disponibile e nel grado di regolazione stomatica, che può far variare il rapporto fotosintesi/traspirazione.

9.2 Stress salino

Un fattore di stress molto diffuso in grado di limitare l'accrescimento delle piante in molte regioni temperate è rappresentato dalla salinità del suolo. Nonostante attualmente siano disponibili tecnologie di gestione dei suoli avanzate, gli alti livelli di salinità di milioni di ettari coltivati continuano a ridurre severamente la produzione delle colture. Il problema è presente principalmente nelle regioni aride e semiaride, ma anche in zone a clima subumido, nelle regioni costiere dove la presenza di acqua marina, attraverso estuari e fiumi e attraverso acque freatiche, causa la salinizzazione. La dimensione di questo problema è cresciuta in questi ultimi anni soprattutto nelle regioni in cui le acque freatiche ad alto contenuto di sale vengono usate per l'irrigazione. D'altro canto l'irrigazione con acqua di falda ad elevata salinità rappresenta la sola acqua disponibile per l'irrigazione in molte aree, tra cui alcune zone del Mezzogiorno d'Italia. Un'altra fonte di salinità è rappresentata dalle concimazioni: coltivazioni intensive che insistono sul medesimo terreno causano un accumulo di macronutrienti che può compromettere la produttività delle piante. L'ampia letteratura esistente sull'argomento ha chiaramente definito le strategie tecnologiche e, in termini di risposta produttiva, i diversi livelli di tolleranza delle principali specie coltivate. Carenti risultano, invece, le informazioni circa gli effetti dello stress salino sui parametri ecofisiologici coinvolti nel processo produttivo e sui meccanismi di risposta e di adattamento messi in atto dalla pianta. Lo stress salino si riferisce ad un eccesso di ioni nel terreno, in particolare Na^+ e Cl^- . L'eccesso di sale nel terreno è un problema molto diffuso nelle zone aride limitrofe al mare. Nelle piante non

esiste un vero e proprio trasportatore specifico per l'assimilazione del sodio (Na^+), ma questo ione entra nella cellula mediante competizione con altri cationi, in particolare lo ione potassio (K^+). L'approfondimento di tali aspetti si rende indispensabile sia per ampliare le informazioni di base su questi processi, sia per rendere più mirato il lavoro di miglioramento genetico. I dati attualmente disponibili classificano il sorgo da granella come specie moderatamente tollerante alla salinità (Maas, 1984; Yang *et al.*, 1990), mentre il sorgo da foraggio (*Sorghum sudanese* L.) è considerato moderatamente sensibile secondo l'UNESCO (1970) e moderatamente tollerante secondo Maas (l.c). Maggiore tolleranza alla salinità è stata osservata da Yang *et al.*, (l.c.) sui sorghi infestanti tipo *Sorghum halepense* L. Pers.

Tabella 3: Concentrazione di Sali nelle acque di pioggia e nel mare

Ione	Acqua piovane		Acqua marina	
	mg/kg (ppm)	($\mu\text{mol/L}$) μM	g/kg (‰)	(mmol/L) mM
Sodio (Na^+)	2,0	86	10,8	470
Cloruro (Cl^-)	3,8	107	19,4	547
Solfato (SO_4^{2-})	0,6	6	2,7	28
Magnesio (Mg^{2+})	0,3	11	1,3	53
Calcio (Ca^{2+})	0,1	2	0,4	10
Potassio (K^+)	0,3	8	0,4	10
Totale	7,0		35,0	

Fonte: Enciclopedia Britannica

9.3 Stress termico

Lo stress da alte temperature è spesso definito come l'aumento della temperatura oltre un livello di soglia per un periodo di tempo sufficiente a provocare irreversibili danni alla crescita e allo sviluppo delle piante. In generale, un transitorio aumento della temperatura, di solito 10-15°C sopra la temperatura ambiente, è considerato shock termico o stress da calore. Tuttavia, lo stress da calore è una funzione complessa di intensità (temperatura in gradi), la durata e il tasso di aumento della temperatura. La tolleranza al calore è generalmente definita come la capacità della pianta di crescere e produrre rendimento economico a temperature elevate. Tuttavia, mentre alcuni ricercatori ritengono che di notte le temperature alte sono fattori limitanti indicativi per lo stato di salute delle piante, altri hanno sostenuto che tra giorno e notte le temperature non influenzano la pianta in maniera

indipendente e che la temperatura media diurna è un migliore indicatore di risposta delle piante a temperature elevate (Peet e Willits, 1998). Il sorgo è una tipica coltura estiva, e la sua coltivazione in terreni con temperature subotimali risultano limitanti per una rapida e vigorosa crescita delle piantine. La maggior parte dei sorghi ha origine in aree tropicali vicino all'Equatore, ma Vavilov pone l'origine della varietà 'kaoliang', resistente alle basse temperature, in una zona della Cina, comprendente le regioni montuose della Cina centrale e occidentale e le loro pianure adiacenti. Nel 1959 e nel 1960 sono stati condotti degli esperimenti da Strickler *et al.* i quali hanno confrontato la velocità e la durata della germinazione e la crescita delle piantine della varietà kaoliang con quella di sorghi da granella. I risultati di questi esperimenti suggeriscono che le varietà kaoliang sono migliori rispetto alle altre varietà di sorgo da granella in quanto la velocità di germinazione e di emergenza in campo sono fortemente condizionate dalle basse temperature. I risultati di queste ricerche evidenziano inoltre come le varietà kaoliang presentano un tasso di crescita delle piantine superiore a quello dei tipi da granella. All'interno del gruppo dei sorghi kaoliang, esistono varietà che potrebbero essere utilizzate per aumentare la velocità di germinazione e il tasso di crescita delle piantine di sorgo, in condizioni di basse temperature del terreno. Tradizionalmente il sorgo non si coltiva in climi freddi come invece avviene per il mais, il quale ha usufruito di studi di miglioramento genetico che hanno portato a sviluppare piante tolleranti alle basse temperature (Bacon *et al.*, (1986).

B) PARTE SPERIMENTALE

1. SCOPO DELLA RICERCA

Il sorgo da biomassa coltura non alimentare, è andato assumendo una importanza sempre maggiore per una sua possibile utilizzazione a fini energetici. L'Unione Europea, infatti, nella necessità di ricercare fonti alternative di energia, per quel che riguarda la produzione di biomasse si è indirizzata verso colture ad elevata potenzialità produttiva ("colture dedicate"). Da molti anni l'UE sostiene gruppi di ricerca al fine di definire la fattibilità agronomica ed economica di numerose colture da biomassa sia già coltivate che di nuova introduzione. Le ricerche condotte, in questo ambito, sul sorgo da biomassa per energia hanno avuto fin qui, essenzialmente lo scopo di verificare la possibile produzione di bioetanolo dallo zucchero prodotto dai tipi zuccherini per una sua utilizzazione quale carburante per autotrazione, al pari di quanto già fatto in Brasile dove, a questo scopo, viene utilizzata la canna da zucchero. Più di recente, si è vista la possibilità di destinare la totalità della biomassa prodotta ad altri possibili tipi di trasformazione a fini energetici (pirolisi, gassificazione aerobica (biogas), anaerobica (syngas)). Tra le colture da biomassa per energia, il sorgo, sia da fibra che zuccherino, è considerato una delle specie più promettenti. In relazione alle sue esigenze fototermiche questa coltura è ritenuta adatta agli ambienti dell'Europa meridionale, anche se per poter espletare la sua notevole potenzialità produttiva necessita di apporti idrici supplementari (Cosentino, 1996; Perniola *et al.*, 1997; Mastrorilli *et al.*, 1998). È noto, peraltro, che la coltura, sempre in rapporto alla sua origine, presenta spiccate caratteristiche biologiche e fisiologiche di arido-resistenza che le consentono di poter superare periodi di carenza idrica, arrestando momentaneamente accrescimento e sviluppo (Cosentino, 1996). A tal proposito, l'ampia variabilità che si riscontra tra i genotipi in rapporto alle caratteristiche biologiche e fisiologiche potrebbe essere indagata allo scopo di individuare i meccanismi che consentono un migliore adattamento all'ambiente caldo-arido del mediterraneo (Cosentino *et al.*, 1997a, 1997b). È stato posto in evidenza che proprio le colture il cui prodotto viene destinato alla semplice trasformazione energetica, sia necessario valutare l'opportunità di ridurre i livelli di energia ausiliaria in relazione alla specifica destinazione produttiva. I consumi di energia ausiliaria di più rilevante entità sono imputabili soprattutto alla concimazione, lavorazione e irrigazione. Il sorgo, negli ambienti semi-aridi del Sud Italia viene coltivato nella stagione estiva, richiedendo pertanto l'uso dell'acqua di irrigazione (Cosentino *et al.*, 2002). Le semine precoci (Marzo-Aprile) nel sorgo possono consentire alla coltura di sfuggire a parte del periodo secco e di utilizzare proficuamente le riserve idriche

accumulatesi nel terreno nel corso della stagione piovosa, risparmiando, e garantendo pertanto un risparmio idrico. Inoltre, le semine precoci risultano vantaggiose in termini di biomassa prodotta (Cosentino *et al.*, 2008). Tuttavia, le esigenze termiche del sorgo per la germinazione del seme ($>10^{\circ}\text{C}$) limitano l'adozione di semine precoci, poiché le basse temperature del terreno possono determinare uno scarso insediamento delle plantule legato ad un rallentamento nella emergenza delle plantule e ad una ridotta percentuale di plantule emerse (Singh, 1985). La tolleranza alle basse temperature in fase di germinazione rappresenta un aspetto importante ai fini dell'adozione di semine precoci nel sorgo, e la identificazione di cultivar meno sensibili alle basse temperature durante la germinazione o di trattamenti al seme che possano garantire al seme il parziale superamento dei limiti imposti dalle basse temperature del terreno alla sua germinazione può condurre ad un soddisfacente insediamento della coltura seminata in epoca precoce. La prova preliminare "Screening genotipico per la resistenza alle basse temperature in fase di germinazione in cultivar di sorgo da biomassa per energia" condotta a temperature controllate in laboratorio (Linea di ricerca 2), ha evidenziato l'esistenza di una variabilità genetica per la tolleranza alle basse temperature nel corso della germinazione, tra genotipi diversi di sorgo da biomassa attualmente disponibili. Diversi approcci sono stati adottati per ridurre l'impatto delle basse temperature sulla germinazione del seme. Un trattamento al seme che si è rivelato utile nel migliorare le performance germinative del seme in condizioni sub ottimali è l'osmoprimering, che consiste in una idratazione controllata del seme in una soluzione a ridotto potenziale idrico, che consente al seme di imbibirsi e dunque di attivare i processi metabolici pregerminativi, (Bradford, 1986). L'osmoprimering permette l'attivazione di un gran numero di enzimi ed una mobilitazione delle sostanze di riserva, che conduce ad una più rapida ed uniforme emergenza delle plantule allorchè il seme viene trasferito ad un potenziale idrico più elevato (Khan *et al.*, 1995). Tuttavia, i risultati dei test di germinazione condotti a temperature costanti in laboratorio non sempre riflettono la germinazione in campo. La rapida emergenza delle plantule è una caratteristica sotto il controllo genetico ma dipende anche da fattori ambientali quali il tipo di terreno, la temperatura, la profondità dei semina. Pertanto, la valutazione delle caratteristiche germinative del seme in ambiente controllato può fornire risultati non sempre attendibili poiché non sempre riproducibili in condizioni ambientali non controllate in pieno campo. Inoltre, gran parte degli studi sull'osmoprimering sono stati condotti in laboratorio. Negli ambienti caldo-aridi, tuttavia, la voce di spesa energetica di più rilevante entità per colture

estive, e non surrogabile, è rappresentata dalla captazione e adduzione dell'acqua per l'irrigazione, la quale incrementa il costo energetico di 3 o 4 volte rispetto a quanto si spenderebbe per una coltura non irrigua (Pimentel e Pimentel 1979; Franzluebbbers e Francis, 1995). Tuttavia, il sorgo, pur essendo dotato di spiccate caratteristiche di arido-resistenza, richiede apporti idrici durante la stagione colturale che coincide con il periodo estivo. In tali ambienti la gestione della irrigazione gioca un ruolo di primaria importanza nelle attività agricole, dove la disponibilità dell'acqua rappresenta la principale risorsa limitante. Pertanto, in tali aree si rende opportuno razionalizzare l'uso della risorsa idrica a fini irrigui, poiché il risparmio idrico implica un considerevole risparmio economico, ma soprattutto riduce l'impatto delle colture sull'ambiente. L'attività del dottorato in "Produttività delle Piante Coltivate" svolta dallo scrivente, si colloca nell'ambito di un più ampio programma sostenuto dal Ministero Italiano delle Politiche Agricole Alimentari e Forestali, sulle colture da biomassa per energia, denominati FAESI (Filiera Agroenergetica del Sud Italia) e BIOSEA (Ottimizzazione delle filiere bioenergetiche per una sostenibilità economica e ambientale), che vede impegnato il Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agrarie ed Alimentari (DISPA) dell'Università di Catania. Le suddette ricerche sono state condotte, in parte in pieno campo in un'area rappresentativa della pianura interna della Sicilia orientale, per studiare gli aspetti biologici, morfologici, agronomici, ambientali ed energetici del sorgo, ed in parte presso i laboratori del CNR ISAFoM di Catania sotto la supervisione della Dott.ssa Patanè Cristina, dove sono stati studiati gli aspetti fisiologici (germinazione a temperature ottimali e sub-ottimali, trattamenti al seme, osmopriming). Nell'ultimo anno di corso, mi è stata data la possibilità di svolgere un periodo di stage di circa sei mesi, presso la Guelph University in Canada, dove sono stati studiati gli effetti dell'investimento unitario sulla crescita e sulla produzione di zuccheri totali in genotipi di sorgo da biomassa. Lo studio durante il corso di dottorato, è stato articolato in 5 linee di ricerca; in ordine cronologico, la prima e la terza linea di ricerca hanno preso in esame lo studio della risposta allo stress idrico di differenti genotipi di sorgo da biomassa, valutando le caratteristiche produttive, ecofisiologiche ed agronomiche della coltura seminata in epoca ritardata (ottimali) e anticipata; la seconda linea di ricerca ha affrontato gli aspetti relativi allo screening genotipico per la resistenza alle basse temperature in fase di germinazione in cultivar di sorgo; la quarta linea di ricerca ha avuto lo scopo di valutare l'effetto dell'osmopriming sulle caratteristiche germinative del seme di sorgo da biomassa a differenti temperature in condizioni controllate e in pieno campo in epoche di semina

anticipate; infine la quinta linea di ricerca è stata svolta in Canada, dove si sono studiati effetti dell'investimento unitario sulla crescita e sulla produzione di zuccheri totali in genotipi di sorgo da biomassa. Il Collegio dei docenti del Dottorato di ricerca ha consentito allo scrivente, sotto la supervisione dei tutor Dott. Mario Marchese e Prof. Salvatore L. Cosentino, di seguire le suddette ricerche sperimentali inserite nei sopra citati progetti di ricerca (FAESI e BIOSEA), e di riferirne i risultati, quale oggetto della mia dissertazione, nell'ambito del dottorato di Ricerca in "Produttività delle Piante Coltivate", curriculum "Biologia delle specie mediterranee".

2. LINEE DI RICERCA

2.1 Linea di ricerca 1: Studio della risposta allo stress idrico di genotipi di sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) da biomassa per energia seminati in epoca ritardata in ambiente mediterraneo.

Obiettivo della ricerca

Nell'ambito del progetto FAESI (Filiera Agroenergetiche del Sud Italia), finanziato dal Ministero Italiano delle Politiche Agricole e Forestali (MIPAF), è stata condotta una prova sperimentale per lo studio di differenti varietà di sorgo da biomassa disponibili attualmente sul mercato in condizioni idriche differenziate, con l'obiettivo di valutare la produttività dei genotipi in termini di biomassa, quando coltivata in epoca ritardata.

Materiali e Metodi

La prova sperimentale è stata condotta nel 2009 nella Piana di Catania, in contrada "Jannarello" (34 m s.l.m., 37°25' 57''N, 14°51' 80''E). L'azienda ricade in un'area rappresentativa della pianura interna siciliana, su un terreno franco argilloso (Tabella 4).

Tabella 4. Caratteristiche del terreno che ha ospitato la prova 2009

Caratteristiche suolo	Valore
sabbia (%) metodo USDA	41,2
limo (%) metodo USDA	31,1
argilla (%) metodo USDA	28,7
pH (in soluzione acquosa)	8,60
Sostanza organica (%) (metodo Walkley e Black)	1,40
Capacità di campo a -0,3 MPa (%)	27,0
Punto d'appassimento a -1,5 MPa (%)	11,0

Schema sperimentale: per la prova è stato adottato un disegno sperimentale a blocchi randomizzati (split-plot) a parcella suddivisa replicato tre volte, attribuendo alla parcella principale la tesi irrigua e alla subparcella i genotipi. L'investimento unitario è stato di 12 piante m² sia per le varietà da zucchero che per quelle da fibra; la dimensione della parcella elementare è stata di 16 m² (4m x 4m). Il contenuto idrico del terreno è stato differenziato apportando periodicamente quantità di acqua commisurata al disponibilità idrica prefissata. Il testimone asciutto è stato coperto con un telo impermeabile per impedire che vi arrivasse acqua meteorica.

Fattori allo studio:

1. Genotipo: 20 genotipi di sorgo da biomassa (Tabella 5)
2. Disponibilità idrica:
 - fino all'insediamento delle plantule (I_0)
 - I_0 + restituzione del 50% dell'ETm (*Partial Root zone Drying*) PRD (I_{50})
 - I_0 + restituzione del 100% ETm (irrigazione a pieno soddisfacimento idrico) (I_{100}) .

Nella tesi I_{50} la somministrazione idrica è stata effettuata secondo lo schema previsto del “*Partial Root zone Drying*” (Dry *et al.*, 1995). In particolare, a partire dalla seconda irrigazione l'acqua è stata distribuita alternativamente ad un solo settore dell'apparato radicale. I lati asciutti e bagnati venivano scambiati nelle irrigazioni successive. L'irrigazione è stata effettuata mediante un sistema a micro portata di irrigazione utilizzando la manichetta forata. I turni irrigui ed i volumi di adacquamento sono stati determinati in funzione dell'ETm giornaliero, calcolato sulla base dell'evaporato da vasca evaporimetrica di classe “A” e dei coefficienti colturali (K_c) (Doorembos e Pruit, 1977).

Il volume di adacquamento è stato calcolato sulla base della seguente formula:

$$V = 2/3 (CC - PA) \times \Phi \times 0,4 \times 10.000$$

dove:

V = volume di acqua impiegata, espressa in mm;

CC = capacità di campo media per una profondità di 80 cm, (espressa in % del peso secco del terreno) e, in questo caso pari a 27,0;

PA = coefficiente di appassimento medio, (espresso in % del peso secco del terreno), in questo caso paria 11,0;

Φ = densità media apparente del terreno fino ad una profondità di 80 cm, pari a $1,2 \text{ g cm}^{-3}$;

0,4 = profondità del terreno da umettare;

10.000 = metri quadrati (1 ha)

Tabella 5: Germoplasma reperito presso Istituzioni di ricerca e ditte commerciali italiane ed estere.

Genotipo	tipo	provenienza
IS 21055	Z	Icrisat (INDIA)
ABZ rosso	Z	A. Biotec (ITA)
ABZ bianco	Z	A. Biotec (ITA)
M81-E	Z	Mississippi Univ. (USA)
Makueni Local 08	Z	Icrisat (INDIA)
Keller	Z	Mississippi Univ. (USA)
Makueni Local 06	Z	Icrisat (INDIA)
Padana 4	F	Padana Semente Elette (ITA)
H 133	F	Syngenta (ITA)
Sugargraze	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Nectar	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Padana 1	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Hay day	F	Padana Sementi Elette (ITA)
90-5-2 rosso	Z	Selez. Univ. Piacenza
90-5-2 bianco	Z	Selez. Univ. Piacenza
PR 140	F	Pioneer Seed (USA)
PR 811	F	Pioneer Seed (USA)
Sucro 506	Z	Syngenta (ITA)
PR 849	F	Pioneer Seed (USA)
Sorgo AUS	F	Pioneer Seed (USA)

*zuccherino, *fibra

Le due costanti idrologiche sono state misurate per mezzo di un estrattore a membrana porosa (Soilmosture Equipment Crop., S. Barbara, CA. USA). L'intervento irriguo veniva effettuato ogni qualvolta la sommatoria dell'evapotraspirazione massima giornaliera (ET_m), al netto delle piogge utili, raggiungeva i 2/3 dell'acqua disponibile nei primi quaranta centimetri di terreno. L'ET_m è stata calcolata sommando l'evaporato giornaliero da evaporimetro di classe "A", (CR21 Campbell., USA), corretto mediante il coefficiente di vasca pari a (0,8) e il coefficiente colturale gradualmente crescente, in relazione allo sviluppo della coltura, fino allo stadio di "botticella" e successivamente gradualmente decrescente (Doorembos e Pruit, 1977). Relativamente alla somministrazione idrica, tutte le tesi hanno beneficiato di interventi irrigui nel periodo precedente la semina e tra la semina e l'emergenza della coltura, pari ad un apporto complessivo di 90 mm, al fine di assicurare l'emergenza delle plantule e la riuscita della prova sperimentale. Il quantitativo

di acqua effettivamente somministrato nel totale delle tesi poste allo studio (I-0, I-50 PDR, I-100% ETm) in relazione alla durata del ciclo colturale (Luglio-Novembre) è stato di 900, 1400 e 1900 m³ ha⁻¹ (Tabella 6).

Tabella 6: Volume stagionale di irrigazione in relazione ai trattamenti allo studio (anno 2009).

	Restituzione ETm (mm)			Pioggia (mm)
	100% (I ₁₀₀)	50% (I ₅₀)	0% (I ₀)	
dal 16-7 al 30-7	90	90	90	
6/8	30	15	-	
18/8	26	13	-	
3/9	44	22	-	
11/9				2
13/9				22
16/9				4
20/9				80
22/9				5
1/10				15
16/10				22
Totale	190	140	90	150

Tecnica agronomica: nel terreno dove è stata effettuata la semina è stata eseguita una lavorazione profonda in modo da favorire l'espansione dell'apparato radicale, e molto curata in superficie in modo da creare un letto di semina ben affinato e ben strutturato. L'aratura è stata eseguita ad una profondità di 40 cm circa, per mezzo di un aratro bivomere (Nardi DPR 100). Successivamente si è intervenuti utilizzando un vibrocoltivatore (Kveneland serie VAT) a 30 cm circa di profondità e il successivo amminutamento è stato effettuato tramite l'utilizzo di una zappatrice (Rotavor Howard R 600 S-D). Operando in questo modo si ha la certezza che il terreno avrà una struttura ed un livello di umidità ottimale per accogliere il seme. La semina è stata eseguita in data 13 luglio 2009, a mano e a fila continua (con successivo diradamento allo stadio di terza foglia visibile), ad una profondità di 3 cm con una interfila distante 50 cm e una distanza tra le piante di 16 cm. La raccolta è avvenuta il 3 novembre 2009. Nel corso della prova non è stata effettuata alcuna concimazione minerale dal momento che in precedenza era stata coltivata una leguminosa (sulla, *Hedysarum coronarium* L.) alla quale era stato somministrato del fosforo (P₂O₅). In data 10 luglio è stato effettuato un trattamento antiparassitario finalizzato alla lotta contro imenotteri, elateridi, grillotalpa, larve di nottue,

insetti terricoli (Agriotes, etc..) utilizzando il formulato commerciale Direx 7.5 GR (p.a. clorpirifos 10 kg ha⁻¹) della Kollant. In pre-semina, è stato effettuato un trattamento diserbante con Roundop Plus (p.a glifosate puro 360 gr l⁻¹) della Monsanto . Inoltre, in post emergenza (3-4 foglia visibile) è stato effettuato un successivo trattamento diserbante (25 luglio), utilizzando come prodotto commerciale Primagram Gold (Syngenta seed, p.a. S-metorachlor 28,9% (312,5 g/l) + terbutilazina 17,4% (187,5 g/l), al fine di eliminare le infestanti presenti all'interno delle parcelle elementari.

Rilievi

Variabili meteorologiche: durante lo svolgimento della prova sono stati rilevati i principali parametri meteorologici a mezzo di centralina elettronica (ETG, Firenze Italia): temperatura dell'aria, radiazione solare, precipitazioni, evaporato da vasca evaporimetrica di classe A.

Caratteri biologici: durante l'intero ciclo colturale sono state rilevate le date delle principali fasi del ciclo fenologico secondo il codice proposto da Vanderlip *et al.*, (1972): emergenza, collare visibile della terza foglia, collare visibile della quinta foglia, differenziazione del punto di crescita, ultima foglia visibile all'apice, botticella, piena fioritura, maturazione lattea, maturazione cerosa, maturazione fisiologica.

Alla raccolta su una parcella utile di 9 m² (3m x 3m), sono stati rilevati i seguenti parametri:

Caratteri morfologici e produttivi: alla raccolta su un campione di tre piante rappresentative per genotipo e per ripetizione, sono stati rilevati i seguenti parametri:

- altezza delle piante;
- numero di foglie verdi;
- biomassa fresca e secca totale epigea;

Caratteri ecofisiologici:

- efficienza d'uso dell'acqua (WUE = water use efficiency);
- efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE = irrigation water use efficiency);
- biomassa totale epigea fresca e secca;
- area fogliare delle foglie verdi (dispiegate e non dispiegate LAI = leaf area index), mediante AT Delta Devices LTD (Cambridge England);

In laboratorio sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- grado rifrattometrico sul succo estratto dai campioni di culmo, mediante utilizzo di rifrattometro digitale HI 96811, secondo il metodo ICUMSA (Internationally recognized body for Sugar Analysis) HANNA Instruments, Padova, Italia).

I dati sono stati sottoposti all'analisi della varianza (ANOVA a due vie) in relazione allo schema sperimentale adottato; in presenza di significatività le medie sono state separate secondo il test di Student- Newman-Keuls (SNK) per $p \leq 0.05$. Il software utilizzato è stato il COSTAT (CoHort Software versione 6.003).

2.2. Linea di ricerca 2: Screening genotipico per la resistenza alle basse temperature in fase di germinazione in cultivar di sorgo da biomassa per energia.

Obiettivo della ricerca

Nell'ambito del progetto "BIOSEA" finanziato dal Ministero Italiano delle Politiche Agricole e Forestali (MIPAF), è stata condotta in laboratorio una test sperimentale con l'obiettivo di quantificare la variabilità di resistenza al freddo durante la germinazione in diverse cultivar di sorgo dolce e fibre, definendo i limiti alle semine anticipate in ambienti semi-aridi del Mezzogiorno d'Italia attraverso l'identificazione di una soglia termica minima per la germinazione dei semi. Le prove sono state condotte presso i laboratori del CNR ISAFoM, U.O.S di Catania.

Materiali e Metodi

Le prove di germinazione sono stati condotte nel corso del 2009 in laboratorio sui semi di 23 cultivar di sorgo da biomassa tra i tipi da fibra e zuccherino (Tabella 7). I semi sono stati tenuti per circa 12 mesi, a temperatura ambiente (10-20 °C) prima dell'inizio delle prove. I semi sono stati lasciati germinare a sette temperature costanti: 8, 10, 15, 20, 25 e 30 ° C, con 25°C (considerato come controllo), in letteratura considerato ottimale per la germinazione dei semi di sorgo (ISTA 1996). I test sono stati condotti in un incubatore a termostato (± 1 °C). Campioni di 200 semi (quattro repliche di 50 semi ciascuno) sono stati posti in capsule Petri contenenti un singolo foglio di carta bibula sterile, inumidita con 7 ml di acqua distillata. Le capsule Petri sono state ermeticamente sigillate con parafilm per prevenire le perdite di evaporazione e quindi randomizzati all'interno del germinatoio e

mantenute al buio. La germinazione dei semi è stata controllata giornalmente e registrata allorché la radichetta raggiungeva almeno 2 mm di lunghezza; i dati sono stati registrati sino a quando non veniva osservata alcuna ulteriore emissione di radichette per almeno 72 h. A conclusione dei test, sono stati calcolati, la percentuale finale dei semi germinati (%), il tempo medio di germinazione (MGT, giorni) e il t_{50} , cioè il tempo reale (giorni) necessario per il raggiungimento del 50% di semi germinati. I dati della percentuale di germinabilità finale, precedentemente trasformati in valori angolari, e quelli di MGT, sono stati elaborati statisticamente attraverso analisi della varianza (ANOVA) a due vie (CoStat 6.003, CoHort Software). La temperatura minima teorica di germinazione o temperatura di base (T_b) è stata calcolata per ciascuna cultivar con una regressione lineare dei valori dell'inverso di t_{50} ($1/t_{50}$ o GR_{50}) vs. temperatura, la cui la pendenza b rappresenta il tasso di germinazione all'aumentare della temperatura (più alto è il valore di b , maggiore è l'incremento della velocità di germinazione all'aumentare della temperatura). L'intercetta sull'asse delle ascisse è una stima della temperatura minima teorica di germinazione (T_b) (Scott *et al.*, 1984). La somma termica (θ_T) per raggiungere il 50% di semi germinati per ciascuna temperatura è stata calcolata utilizzando l'equazione:

$$\theta_T(50) = (T - T_b) t_{50}$$

dove:

$\theta_T(50)$ = somma termica ($^{\circ}\text{C d}^{-1}$),

T = temperatura di germinazione ($^{\circ}\text{C}$, costante in ambiente controllato),

T_b = temperatura base di germinazione,

t_{50} = tempo di risposta medio (Scott *et al.*, 1984).

I dati sono stati sottoposti all'analisi della varianza (ANOVA a due vie) in relazione allo schema sperimentale adottato; in presenza di significatività le medie sono state separate secondo il test di Student- Newman-Keuls (SNK) per $p \leq 0.05$. Il software utilizzato è stato il COSTAT (CoHort Software versione 6.003).

Tabella 7: Germoplasma reperito presso Istituzioni di ricerca e ditte commerciali italiane ed estere

Genotipo	tipo	provenienza
Jumbo	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PSE98456	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Padana 4	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PR811	F	Pioneer Seed (USA)
Sugargraze	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Nectar	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
PSE27677	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PSE23431	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Bulldozer	Z	KWS (GER)
PSE22053	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PSE24213	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PSE22043	F	Padana Sementi Elette (ITA)
PR849	F	Pioneer Seed (USA)
Maja	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Topper 76-6	Z	Mississippi University (USA)
Dale	Z	Mississippi Univ. (USA)
M81-E	Z	Mississippi Univ. (USA)
Padana 1	F	Padana Semente Elette (ITA)
HayDay	F	Padana Semente Elette (ITA)
Silage King	Z	KWS (GER)
Nicol	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
PR895	F	Pioneer Seed (USA)
H133	F	Syngenta seed (ITA)

*zuccherino,*fibra

2.3 Linea di ricerca 3: Studio della risposta allo stress idrico di genotipi di sorgo da biomassa per energia seminati in epoca anticipata in ambiente mediterraneo.

Obiettivo della ricerca

Nelle zone con scarsa disponibilità di acqua per l'irrigazione, come quelle del meridione d'Italia, la massimizzazione della produttività dell'acqua risulta più conveniente della massimizzazione della resa di una coltura (Pereira *et al.*, 2002). Fra le colture in grado di contribuire in ambiente semi arido mediterraneo alla produzione di biocarburanti e alla riduzione delle emissioni di CO₂ il sorgo da biomassa per energia desta interesse per la produzione di bioetanolo di prima e seconda generazione, in quanto in grado di svilupparsi e crescere anche in condizioni di deficit idrico del terreno, grazie ad alcune peculiari caratteristiche morfologiche e fisiologiche (Foti *et al.*, 1996; Cosentino, 1996). In queste

zone, strategie irrigue come la ‘*Partial Rootzone Drying*’, che consentano un risparmio idrico mantenendo livelli produttivi soddisfacenti, possono contribuire al miglioramento della efficienza d’uso dell’acqua (Dry, P.R., *et al.*, 2000). Nell’ambito di numerose ricerche è stato dimostrato la necessità di individuare numerosi genotipi resistenti allo stress idrico in ambiente caldo arido mediterraneo. In quest’ottica la presente ricerca sostenuta dal MiPAF con il progetto “Filiera Agro Energetiche nel Sud Italia” (FAESI), ha avuto come obiettivo lo studio della risposta produttiva all’irrigazione deficitaria in cultivar di sorgo da biomassa per energia.

La prova sperimentale è stata condotta nel 2010 nella Piana di Catania, in contrada “Jannarello” (34 m s.l.m., 37°25’ 57’’N, 14°51’ 80’’E). L’azienda ricade in un’area rappresentativa della pianura interna siciliana su un suolo franco argilloso (Tabella 8).

Tabella 8: Caratteristiche del terreno che ha ospitato la prova 2010

Caratteristiche suolo	Valore
sabbia (%) metodo USDA	41,2
limo (%) metodo USDA	31,1
argilla (%) metodo USDA	28,7
pH (in soluzione acquosa)	8,60
sostanza organica (%) metodo Walkley e Black)	1,40
capacità di campo a -0,3 Mpa (%)	25,6
punto d’appassimento a -1,5 Mpa (%)	9,80

Materiale e Metodi

Schema sperimentale: per la prova è stato adottato un disegno sperimentale a blocchi randomizzati (split-plot) a parcella suddivisa replicato tre volte, attribuendo alla parcella principale la tesi irrigua e alla subparcella i genotipi. L’investimento unitario è stato di 12 piante m² sia per le varietà da zucchero che per quelle da fibra; la dimensione della parcella elementare è stata di 16 m² (4 m x 4 m). Il contenuto idrico del terreno è stato differenziato apportando periodicamente quantità di acqua commisurata al disponibilità idrica prefissata. Il testimone asciutto è stato coperto con un telo impermeabile per impedire che vi arrivasse acqua meteorica.

Fattori allo studio:

1. Genotipo: 19 genotipi di sorgo da biomassa (**Tabella 9**)
2. Disponibilità idrica:
 - Fino all'insediamento delle plantule (I_0)
 - I_0 + restituzione del 50% dell'ETm: (Partial Root zone Drying) (I_{50})
 - I_0 + restituzione del 100% ETm (irrigazione a pieno soddisfacimento idrico) (I_{100})

Tabella 9: Germoplasma reperito presso Istituzioni di ricerca e ditte commerciali italiane ed estere

Genotipo	tipo	provenienza
M81-E	Z	Mississippi University (USA)
Topper76-6	Z	Mississippi Univ. (USA)
Dale	Z	Mississippi Univ. (USA)
Sugargraze	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Nectar	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Padana 4	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Nicol	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
Sucro 506	Z	Syngenta (ITA)
Bulldozer	Z	KWS (GER)
Silage King	F	KWS (GER)
Maja	F	KWS (GER)
Padana 1	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Hayday	F	Padana Sementi Elette (ITA)
Jumbo	Z	Padana Sementi Elette (ITA)
PR 849	F	Pioneer Seed (USA)
PR 811	F	Pioneer Seed (USA)
PR 895	F	Pioneer Seed (USA)
H 133	F	Syngenta (ITA)
Sucro 405	Z	Syngenta (ITA)

*zuccherino,*fibra

L'irrigazione è stata effettuata mediante un sistema a micro portata di irrigazione utilizzando la manichetta forata. I turni irrigui ed i volumi di adacquamento sono stati determinati in funzione dell'ETm giornaliero, calcolato sulla base dell'evaporato da vasca evaporimetrica di classe "A" e dei coefficienti culturali. Il volume di adacquamento è stato calcolato sulla base della formula descritta nella Linea di ricerca 1. Le due costanti idrologiche sono state misurate per mezzo di un estrattore a membrana porosa (Soilmoisture Equipment Crop., S. Barbara, CA. USA). L'intervento irriguo veniva effettuato ogni

qualvolta la sommatoria dell'evapotraspirazione massima giornaliera (ET_m), al netto delle piogge utili, raggiungeva la quantità V come calcolato in precedenza. L'ET_m è stata calcolata sommando l'evaporato giornaliero da evaporimetro di classe "A", (CR21 Campbell., USA), corretto mediante il coefficiente di vasca $K_p = 0,8$ in ambiente mediterraneo, e il coefficiente colturale (K_c) gradualmente crescente, in relazione allo sviluppo della coltura, fino allo stadio di "botticella" e successivamente gradualmente decrescente (Doorembos e Pruit, 1977). Relativamente alla somministrazione idrica, tutte le tesi hanno beneficiato di interventi irrigui nel periodo precedente la semina e tra la semina e l'emergenza della coltura, pari ad un apporto complessivo di 40 mm, al fine di assicurare l'emergenza delle plantule e la riuscita della prova sperimentale. La tesi che prevedeva la somministrazione del 50% dell'ET_m è stata irrigata secondo la tecnica del Partial Root zone Drying (PRD) (Dry *et al.*, 1995). Il PRD è una tecnica innovativa di irrigazione controllata che induce una parziale chiusura stomatica e aumenta l'efficienza nell'uso dell'acqua (WUE); essa consiste essenzialmente nella irrigazione di una metà dell'apparato radicale alternandola con l'altra in asciutto. In particolare, a partire dalla seconda irrigazione l'acqua è stata distribuita alternativamente ad un solo settore dell'apparato radicale somministrando alternativamente l'acqua, da un lato e dall'altro della fila in cui insistevano le piante. I lati asciutti e bagnati venivano scambiati nelle irrigazioni successive. Il quantitativo di acqua effettivamente somministrato nel totale delle tesi poste allo studio (I_0 , I_{50} , I_{100}) in relazione alla durata del ciclo colturale (Giugno-Novembre) è stato pari a 40, 192,5 e 345 mm rispettivamente, come riportato in **Tabella 10**.

Tabella 10: Volume stagionale di irrigazione e di pioggia caduta in relazione ai trattamenti allo studio (anno 2010).

	Restituzione ETm (mm)			Pioggia (mm)
	100% (I ₁₀₀)	50% (I ₅₀)	0% (I ₀)	
10/6	40	40	40	
26/6	37	18,5	-	
6/7	23	11,5		
20/7	36	18	-	
5/8	45	22,5	-	
11/8	33	16,5	-	
18/8	42	21	-	
24/8	41	20,5		
31/8	48	24	-	
3/9				45
15/9				16
10/10				35
25/10				12
Totale	345	192,5	40	108

Tecnica agronomica: la lavorazione del terreno è stata effettuata con un aratura leggera, seguita da una discissura a 10-15 cm, allo scopo da amminutare ulteriormente il terreno, seguita da una erpicatura prima della semina, a mano e a fila continua (con successivo diradamento), ad una profondità di 3 cm con una interfila distante 50 cm e una distanza sulla fila di 16 cm. In pre-semina, è stato effettuato un trattamento diserbante (25/05/2010) con Roundop Plus (p.a glifosate puro 380 gr/l) della Monsanto. In copertura si è intervenuti con un trattamento selettivo per la coltura del sorgo, utilizzando il formulato commerciale Primagram Gold della Syngenta, (p.a. S-metorachlor 28,9% (312,5 g/l) + terbutilazina 17,4% (187,5 g/l), al fine di eliminare le infestanti di graminacee presenti all'interno della parcella elementare. La semina è stata eseguita il 03/06/2010, mentre la raccolta è avvenuta 11 novembre 2010. Con riferimento alla concimazione sono stati distribuiti in presemina (19/05/2010) 100 kg ha⁻¹ N (solfato ammonico 21%) e 100 Kg ha⁻¹ di P₂O₅ (perfosfato semplice 19%). La concimazione in copertura è stata effettuata il 10/08/2010, dove sono stati apportati 100 kg ha⁻¹ N (nitrato ammonico 27%).

Rilievi

Variabili meteorologiche: durante lo svolgimento della prova sono stati rilevati i principali parametri meteorologici a mezzo di centralina elettronica (ETG, Firenze Italia):

temperatura dell'aria, radiazione solare, precipitazioni, evaporato da vasca evaporimetrica di classe A.

Caratteri biologici: durante l'intero ciclo colturale sono state rilevate le date delle principali fasi del ciclo fenologico secondo il codice proposto da Vanderlip *et al.*, (1972), mostrato nella Linea di ricerca 1. Alla raccolta su una parcella utile di 9 m² (3m x 3m), sono stati rilevati i seguenti parametri:

Caratteri morfologici e produttivi: su un campione di tre piante rappresentative per genotipo e per ripetizione, sono stati rilevati i seguenti parametri:

- altezza delle piante
- numero di foglie verdi
- biomassa totale epigea fresca e secca

Caratteri ecofisiologici:

- efficienza d'uso dell'acqua (WUE);
- efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE);
- area fogliare delle foglie verdi (dispiegate e non dispiegate (LAI), mediante AT Delta Devices LTD (Cambridge England);
- durata dell'area fogliare (LAD = Leaf area duration);

In laboratorio sono state effettuate le seguenti determinazioni:

- grado rifrattometrico sul succo estratto dai campioni di culmo, mediante rifrattometro digitale HI 96811, secondo il metodo proposto nella Linea di ricerca 1.

I dati sono stati sottoposti all'analisi della varianza (ANOVA a due vie) in relazione allo schema sperimentale adottato, in presenza di significatività le medie sono state separate con il metodo di Student-Newman-Keuls (SNK) per mezzo del software CoStat (version 6.0).

2.4 Linea di ricerca 4: Effetto dell'osmoprimum sulle caratteristiche germinative del seme di sorgo da biomassa a differenti temperature in condizioni controllate e in pieno campo in epoche di semina anticipate.

Obiettivo della ricerca

Nell'ambito del progetto "BIOSEA" finanziato dal Ministero Italiano delle Politiche Agricole e Forestali (MIPAF), la presente prova ha avuto lo scopo di valutare il comportamento germinativo del seme di quattro cultivar di sorgo da biomassa per energia,

a temperature sub ottimali costanti in laboratorio o a temperature fluttuanti in ambiente non controllato in semina precoce in un ambiente tipicamente mediterraneo, e valutare l'effetto dell'osmopriming del seme sulla risposta germinativa a temperature sub ottimali sia in ambiente controllato che in campo. Le prove sono state condotte nel 2010 presso il CNR ISAFoM , U.O.S di Catania.

Materiale e Metodi

Test di germinazione in laboratorio: I semi di quattro cultivar di sorgo da biomassa (**Tabella 11**) sono stati posti a germinare a temperature costanti di 8°, 10°, 15°, 20° e 25°C (testimone, ISTA 1996). Semi non trattati (UP) sono stati posti a confronto con semi sottoposti a precondizionamento osmotico o osmopriming (P). Quest'ultimo è stato effettuato su sub campioni di seme per ciascuna cultivar, posti in beute da 250 ml contenenti 100 ml di una soluzione di PEG 6000 (250 g/l), corrispondente ad un potenziale idrico di -0.86 MPa a 15°C (Michel e Kaufmann, 1973) per 72 h. Il trattamento di osmopriming è stato scelto sulla base dei risultati di una precedente ricerca condotta sulla germinazione del sorgo (Foti *et al.* 2002). I semi sono stati immersi nella soluzione PEG continuamente aerata per consentire i normali processi respiratori del seme, e mantenuti al buio (Bujalski e Nienow 1991). Dopo il trattamento, i semi sono stati ripetutamente sciacquati con acqua corrente e successivamente con acqua distillata, quindi sono lasciati asciugare a temperatura ambiente per tutta la notte, sino a raggiungimento di un contenuto di umidità simile a quello dei semi non trattati. I semi sono stati dunque sterilizzati in ipoclorito di sodio. Sia per UP che per P, campioni di 400 semi (4 repliche di 100 semi l'una) sono stati posti in scatole Petri (9 cm) su substrato cartaceo inumidito con 7 ml di acqua distillata. Le scatole Petri sono state chiuse ermeticamente con parafilm per prevenire le perdite di acqua per evaporazione, quindi randomizzate all'interno di ciascuna temperatura al buio. La germinazione è stata registrata giornalmente sui semi che avevano differenziato una radichetta di almeno 2 mm di lunghezza, sino a quando non si osservavano più nuove radichette emerse. A fine prova, sono stati calcolati la percentuale di semi germinati ed il tempo medio di germinazione (MGT, giorni).

Tabella 11: Germoplasma reperito presso Istituzioni di Ricerca e ditte commerciali italiane ed estere

Genotipo	tipo	provenienza
Padana 4	F	Padana Semente Elette (ITA)
PR811F	F	Pioneer Seed (USA)
Jumbo	F	Padana Semente Elette (ITA)
PSE24213	F	Padana Semente Elette (ITA)

*da fibra

Prova epoca di semina in ambiente non controllato: la prova è stata condotta nell'anno 2010 in un'area pianeggiante della Sicilia orientale (10 m s.l.m., 37°26' Lat N, 15°03' Long E), adottando le stesse cultivar 'Padana 4', 'PR811F', 'Jumbo' e 'PSE24213' di sorgo da fibra utilizzate nella precedente prova di laboratorio, degli stessi lotti di seme. Sono stati esaminati gli effetti di quattro epoche di semine sulla emergenza delle plantule: 10 e 28 Marzo, 15 Aprile, 25 Maggio. Quest'ultima data è stata adottata come testimone, essendo il periodo più appropriato per la semina del sorgo in ambiente caldo-arido. Per ciascuna cultivar ed epoca di semina, sono stati adottati semi UP e semi P. I semi P sono stati osmocondizionati seguendo la stessa procedura sopra descritta per le prove di germinazione in laboratorio. Per ciascun trattamento, campioni di 150 semi (tre repliche di 50 semi) sono stati posti in fitocelle di circa 2L di volume, contenenti una miscela di terriccio e terreno (1:1 v/v), ad una profondità di ≈ 2 cm. L'umidità del substrato è stata mantenuta a livelli ottimali tramite irrigazione (circa 200 mL per fitocella per ciascun intervento irriguo), affinché la disponibilità idrica non rappresentasse un fattore limitante per la germinazione del seme e l'emergenza delle plantule. Quest'ultima è stata registrata sulle piantine emerse di ≈ 1 cm di lunghezza, sino a quando non si evidenziavano più nuove plantule emerse. Nel corso della prova, sono state registrate le temperature minime e massime del terreno ad una profondità di 2 cm, attraverso un data logger (Escort iLog, Escort data loggers Inc., Buchanan, VA, USA) (Figura 12). A fine prova, sono stati calcolati la percentuale di plantule emerse ed il tempo medio di emergenza (MET, giorni). Infine, è stato determinate il peso secco delle plantule (mg) per ciascuna epoca di semina, cultivar e trattamento al seme, a 20 giorni dalla semina, su sei plantule per replica tra quelle prima emerse, dopo essiccazione in stufa termoventilata a 65°C per 48h.

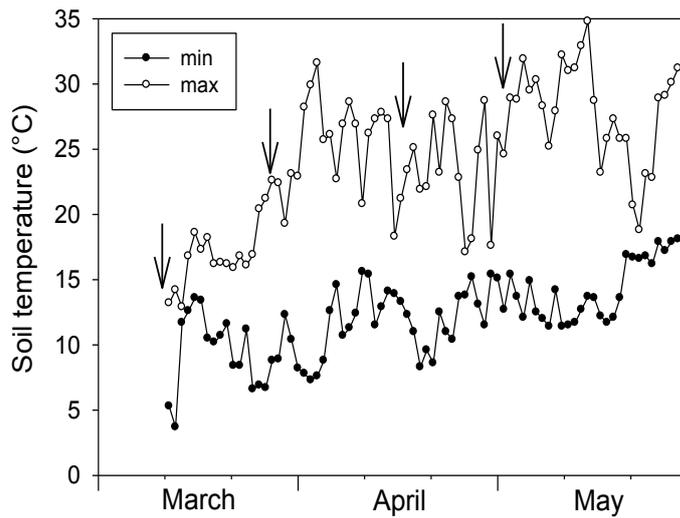


Figura 12: Temperatura minima e massima giornaliera del terreno registrata nel corso della prova in campo. Le frecce indicano le date di semina

Elaborazione statistica

L'andamento nel tempo (espresso in termini di somme termiche) della germinazione cumulata del seme, separatamente per UP e P, è stata descritto da una regressione non lineare, utilizzando un modello sigmoideale a tre parametri:

$$y = \frac{a}{1 + \left(\frac{x}{x_0}\right)^b}$$

dove:

a è il valore massimo di y (cioè il valore massimo di germinabilità),

x è il tempo espresso in gradi giorno ($^{\circ}\text{Cd}$) dall'inizio della imbibizione del seme,

x_0 è la somma termica ($^{\circ}\text{Cd}$) necessaria per raggiungere il 50% della germinazione massima,

b è un parametro di adattamento della curva.

Le somme termiche (θ_T) cumulate nel corso della germinazione sono state utilizzate per normalizzare i risultati ottenuti alle diverse temperature di germinazione. Queste sono state calcolate cumulando progressivamente i valori della differenza tra ciascuna temperatura di

germinazione (T) e la temperatura base (T_b) per la germinazione. Sono state adottate le seguenti T_b : 6.6°C (Padana 4), 6.2°C (PR 811F), 7.4°C (Jumbo) e 6.1°C (PSE 24213), come calcolate nella precedente prova (Linea di ricerca 4) di germinazione in laboratorio ad un ampio range di temperature. Sono state calcolate anche le somme termiche (θ_T , °Cd) necessarie per l'emergenza della prima plantula nel terreno, per ciascuna cultivar ed epoca di semina, dalla somma delle unità termiche, in accordo con la seguente formula (Singh *et al.*, 1984):

$$\theta_T = \sum_{i=1}^n (T_i - T_b)$$

dove:

T_i è la temperature media giornaliera del terreno (°C) al giorno i misurata in campo;

T_b è la temperature base per la germinazione e n è il numero totale di giorni sino alla prima plantula emersa.

Il T_b utilizzato per il calcolo di θ_T è quello sopra riportato per i test di germinazione in laboratorio. I dati di germinabilità finale (prove di laboratorio) e di emergenza in campo (prove in ambiente non controllato), previa trasformazione in valori angolari, e quelli del MGT e MET, sono stati elaborati statisticamente attraverso analisi della varianza (ANOVA) a due vie (CoStat 6.003, CoHort Software). L'analisi statistica è stata condotta separatamente per ciascuna temperatura, considerando la cultivar ed il trattamento al seme come fattori fissi. In presenza di 'F' significativo, le medie sono state separate mediante il test di Student-Newman-Keuls (SNK) ($p \leq 0.05$) (Snedecor and Cochran, 1989).

2.5 Linea di ricerca 5: effetto della densità di semina sulla crescita e sulla produzione di zuccheri totali in genotipi di sorgo da biomassa per energia in ambiente continentale nell'Est del Canada.

Obiettivo della ricerca

La prova effettuata in campo, ha avuto lo scopo di valutare come l'aumento di densità può compensare il decremento produttivo legato a stress abiotici di natura termica (basse temperature), garantendo livelli produttivi in termini di biomassa comparabili a quelli

raggiunti in ambienti più adatti alla coltura del sorgo da biomassa. La prova sperimentale è stata condotta nel 2011 presso la Guelph University Kemptville Campus Research Station, Canada, (99m. s.l.m. 45°00'59.53" N., 75°38'44.70" E.), su un suolo franco sabbioso (Tabella 12).

Tabella 12: Caratteristiche del terreno che ha ospitato la prova 2011

Caratteristiche suolo	Valore	Range
sabbia (%) metodo USDA	73,6	
limo (%) metodo USDA	15,6	
argilla (%) metodo USDA	10,9	
pH (in soluzione acquosa)	6,90	
sostanza organica (%) metodo Walkley e Black)	3,11	
Fosforo P (ppm)	38,0	10-60 (ppm)
Potassio K (ppm)	87,0	80-250 (ppm)
Magnesio Mg (ppm)	241	100-300 (ppm)
K/Mg Ratio	0,4	
Conduttività elettrica EC (mmhos/cm)	0,35	0- >1,00 (mmhos/cm)

Materiali e Metodi

Schema sperimentale: per la prova è stato adottato un disegno sperimentale a blocchi randomizzato replicato quattro volte, attribuendo alla parcella principale la densità di semina e alla subparcella i genotipi. La dimensione della parcella elementare è stata di 9,75 m².

Fattori allo studio:

- Genotipo: sono stati posti allo studio tre genotipi di sorgo zuccherino, reperiti in parte presso istituti di ricerca e ditte commerciali disponibili in Italia e nel mondo, così come riportate in Tabella 13;
- Investimento unitario: 10, 20, 30 e 40 piante m⁻², denominate I10, I20, I30 e I40, rispettivamente.

Tabella 13: Germoplasma reperito presso ditte commerciali italiane ed estere.

Genotipo	tipo	provenienza
Bulldozer	Z	KWS (GER)
CSSH45	Z	Agriculture Environmental Renewal (CAD)
Sugargraze	Z	Padana Sementi Elette (ITA)

*zuccherino

Tecnica agronomica: la lavorazione principale del terreno è stata effettuata il 01 maggio con un aratura leggera, ad una profondità di circa 30 cm, per consentire l'espansione dell'apparato radicale, seguita da una discissura a 10-15 cm, allo scopo di amminuire ulteriormente il terreno. La semina è stata eseguita il 21 maggio, utilizzando una seminatrice idraulica di precisione ad una profondità di 3 cm con una interfila distante 50 cm, e una distanza tra le piante di 16 cm, mentre la raccolta è stata effettuata il 10 settembre 2011. Con riferimento alla concimazione sono stati distribuiti:

- 120 kg ha⁻¹ N (60 kg ha⁻¹ alla semina solfato ammonico 21%) e 60 kg ha⁻¹ in copertura (nitrato ammonico 26%);
- 100 kg ha⁻¹ P₂O₅ (perfosfato ammonico 19% alla semina);
- 70 kg ha⁻¹ K₂O (ossido di potassio alla semina).

In pre-semina, (10 maggio 2011) è stato effettuato un trattamento diserbante con Roundop Ultra 2 plus (p.a glifosate puro 1,68 L/ha) della Monsanto, utilizzando una irroratrice semovente (Hardi TZY 2400). In copertura si è intervenuti con un trattamento selettivo, utilizzando Frontline 2,4 D (p.a. dinitrofenolo 2,0 L/ha), al fine di eliminare le infestanti presenti all'interno della parcella elementare. Non è stato effettuato nessun turno d'irrigazione durante il ciclo biologico a causa dei continui eventi piovosi, tuttavia è stato necessario intervenire con un trattamento irriguo di soccorso subito dopo la semina, per facilitare l'insediamento del seme. In quella occasione sono stati forniti 90 mm di acqua utilizzando una irroratrice semovente (Hardi 6600 APK) trainata da una trattoria John Deere 8220 TD.

Rilievi

Variabili meteorologiche: durante lo svolgimento della prova sono stati rilevati i principali parametri meteorologici: temperatura (massima e minima) dell'aria, radiazione solare, precipitazioni.

Caratteri biologici: durante l'intero ciclo colturale sono state rilevate le date delle principali fasi del ciclo biologico secondo il codice riportato da Vanderlip et al., 1972.

A partire dalla emergenza delle piante, a intervalli periodici (25-30 giorni), su un campione di 3 piante rappresentative per singola parcella elementare sono stati rilevati:

- area fogliare delle foglie verdi (dispiegate e non dispiegate), mediante AccuPAR LP-80 (Decagon Devices USA)

Caratteri morfologici e produttivi alla raccolta: alla raccolta su un campione di tre piante rappresentative per genotipo e per ripetizione sono stati rilevati i seguenti parametri:

- altezza delle piante;
- numero di foglie verdi;
- biomassa totale epigea fresca e secca;
- circonferenza fusto (basale, mediano apicale);

In laboratorio è stato misurato il grado rifrattometrico sul succo estratto da tre campioni di culmo mediante rifrattometro digitale HI 96811 (HANNA Instruments, Montreal Canada).

La raccolta è stata eseguita il 10/09/2011 su una parcella utile di 4 m² (2m x 2m). I dati ottenuti sono stati soggetti all'ANOVA per mezzo del software CoStat (version 6.0) e le medie sono state separate secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

3. RISULTATI

3.1. Linea di ricerca 1: Studio della risposta allo stress idrico di genotipi di sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench da biomassa per energia seminati in epoca ritardata in ambiente mediterraneo

3.1.1 Andamento Meteorologico

L'andamento termo-pluviometrico ha fatto registrare i caratteri tipici dell'ambiente mediterraneo: nel corso del ciclo colturale (luglio-ottobre) i valori della temperatura minima dell'aria hanno oscillato tra 27°C e 8°C rispettivamente, mentre quelli della temperatura massima tra 48 e 27°C, rispettivamente (Figura 13). Durante lo stesso periodo l'evaporato rilevato mediante evaporimetro di classe "A", è stato di notevole entità; dalla seconda decade di luglio fino alla fine del mese di agosto sono stati registrati valori intorno 8 mm d⁻¹; il valore più alto si è registrato nella terza decade del mese di agosto, di contro il valore più basso si è registrato nella seconda decade di settembre (13,9 e 3,0 mm d⁻¹ rispettivamente). E' opportuno sottolineare, per il significato che questo può rivestire sulla produzione del sorgo, che la piovosità, assente durante il periodo compreso tra l'inizio del mese di luglio e la prima decade del mese di settembre, ha fatto rilevare nel corso del ciclo colturale piogge intense e di rilevante entità nel periodo tra la seconda decade del mese di settembre e la prima decade del mese di ottobre con 126 mm di acqua al suolo. Per lo più il

67,4% della pioggia totale si è registrata nel mese di settembre.

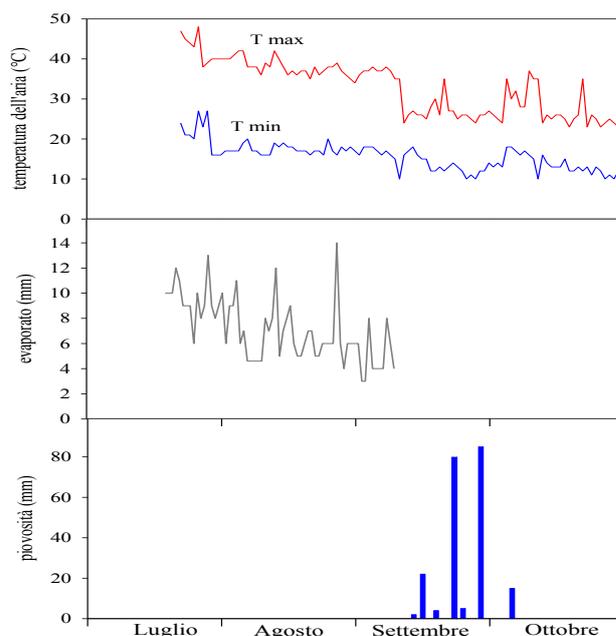


Figura 13: Andamento termopluviometrico durante la stagione colturale nel 2009

3.1.2 Ciclo biologico

Espressione e durata degli stadi fenologici sono stati influenzati significativamente dai due fattori allo studio, ovvero il genotipo e l'apporto idrico. Nella media dei fattori allo studio, il ciclo biologico ha avuto una durata di 101 giorni (Figura 14). La semina estiva effettuata tardivamente ha loro consentito di raggiungere soltanto la fase di maturazione lattea. L'emergenza per i genotipi allo studio è stata registrata, nelle tesi I_0 - 0% ET_m in media dopo 7-8 giorni dalla semina, mentre nella tesi I_{50} - 50% (PRD) ET_m, e I_{100} - 100% ET_m, l'emergenza è avvenuta in media dopo 8,3 giorni dalla semina. La lunghezza della stagione di crescita nelle piante completamente irrigati (I_{100}) variava da 93 GDS (giorni dopo la semina) a 102 GDS. Tuttavia, la semina in ritardo ha determinato uno spostamento della fase fenologica e le piante non hanno raggiunto fase di maturazione fisiologica, (Vanderlip R.L., e Reeves H.S. 1972). Pertanto, la coltura è stata raccolta quando le piante erano ancora in fase di maturazione lattea, a prescindere dal regime idrico e dalla cultivar adottata. Nella tesi che prevedeva la completa restituzione dell'evapotraspirazione massima (ET_m = I_{100}) la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nella cultivar Sugargraze (103 giorni) rispetto alla varietà Hayday (93 giorni); nella tesi I_{50} (PRD) la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nella varietà M81-E (103 giorni) rispetto alla varietà Hayday (88 giorni); infine nella tesi che non prevedeva la restituzione dell'evapotraspirazione massima (ET_m = I_0), la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nelle varietà Makueni Local 08 (108 giorni) rispetto alla varietà Hayday (94 giorni).

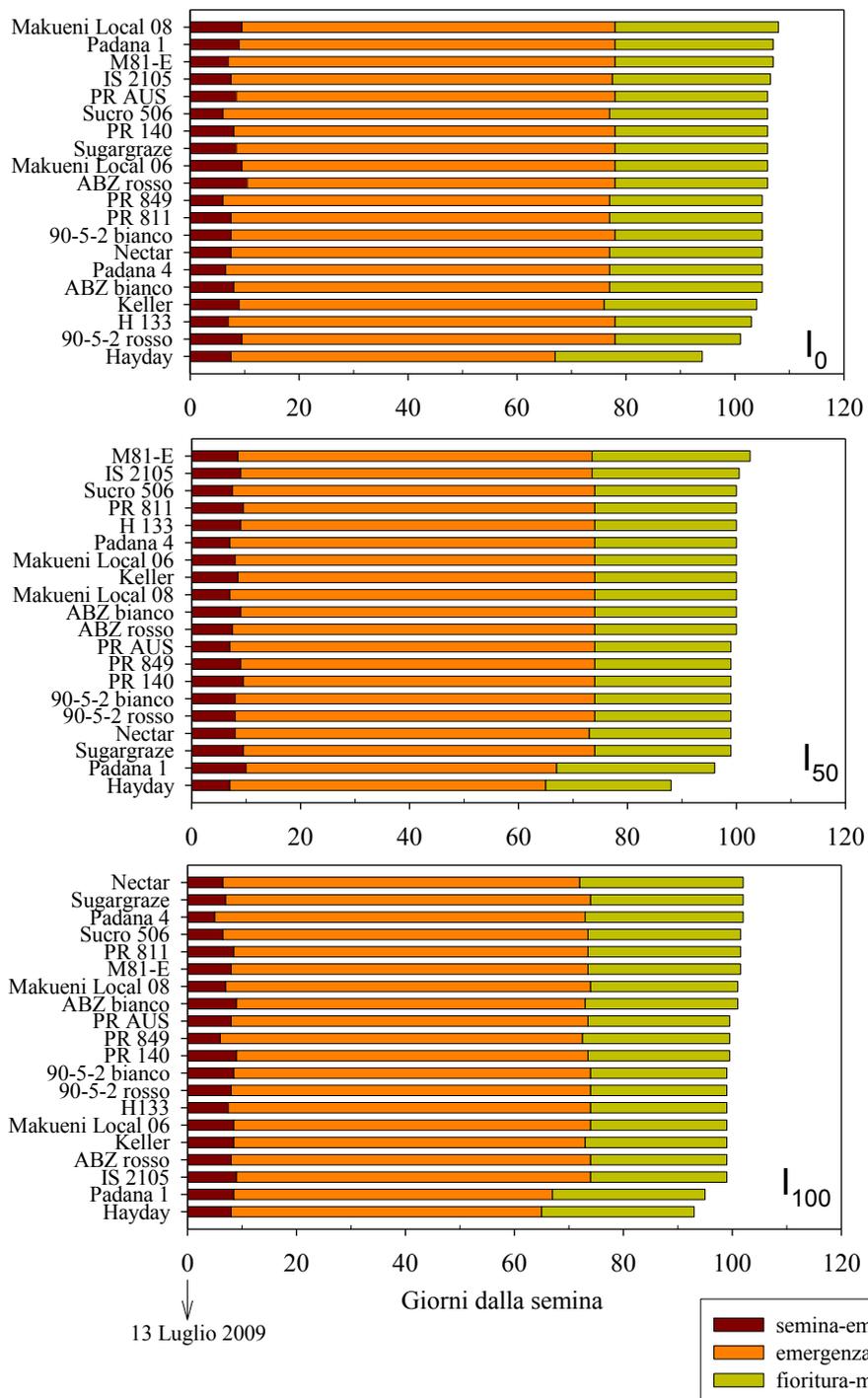


Figura 14: Andamento del ciclo biologico in funzione della cultivar e del trattamento irriguo.

3.1.3 Altezza delle piante

L'altezza delle piante alla raccolta è significativamente variata in rapporto sia al genotipo che al trattamento irriguo (Tabella 14). Tra i genotipi si sono statisticamente distinti le

cultivar PR 140, e H133, che hanno fatto registrare i valori più elevati dell'altezza pianta 371,6 e 368,1 cm rispettivamente. Per contro il valore più basso (≤ 250 cm) è stato corrisposto dalla cv. PR 840. Nella media delle tesi irrigue i valori più elevati 402, 370 e 360,5 cm si sono registrati nelle cultivar H 133 e PR 140 rispettivamente. Infine nella media delle tesi irrigue (I_{100} ed I_{50}) non si sono registrate differenze statisticamente significative.

Tabella14: Altezza (cm) della pianta in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Altezza (cm)			Media
	I_{100}	I_{50}	I_0	
IS 21055	306,0	302,0	252,5	286,83 c-e
ABZ rosso	284,0	293,5	282,0	286,5 c-e
ABZ bianco	310,5	297,5	271,5	293,1 c-e
M81-E	320,5	304,5	308,0	311,0 bc
Makueni Local 08	311,5	289,5	253,0	284,6 de
Keller	278,0	299,0	262,5	279,8 e
Makueni Local 06	306,0	306,5	264,5	292,3 c-e
Padana 4	285,5	279,5	279,5	281,5 e
H 133	402,0	370,0	332,5	368,1 a
Sugargraze	297,0	275,5	284,0	285,5 c-e
Nectar	283,5	328,5	275,5	295,8 c-e
Padana 1	277,0	305,0	258,5	280,1 e
Hay day	301,5	278,0	268,5	282,6 e
90-5-2 rosso	323,0	331,0	318,0	324,0 b
90-5-2 bianco	322,5	324,5	288,0	311,8 bc
PR 140	389,0	365,5	360,5	371,6 a
PR 811	350,5	298,5	281,0	310,0 b-d
Sucro 506	329,0	313,5	294,0	312,1 bc
PR 849	272,5	256,0	194,0	240,8 f
Sorgo AUS	295,0	302,5	280,0	292,5 c-e
media	312,2 a	306,0 b	280,4 b	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	***		

*** significativo per $p \leq 0,001$, secondo S.N.K

3.1.4 Numero di foglie verdi

Il numero di foglie verdi alla raccolta è significativamente variato in rapporto al genotipo (Tabella 15). Tra i genotipi si sono statisticamente distinti la cv. PR 140 che ha fatto

registrare i valori più elevati del numero di foglie verdi ($\geq 15,9$). Per contro il valore più ridotto è corrisposto alla cv. PR 849 ($\leq 13,5$). Nella media del trattamento irriguo la tesi I₅₀ si è statisticamente distinta rispetto alle tesi I₁₀₀ e I₀, facendo registrando un numero di foglie pari a 15,1.

Tabella 15: Numero di foglie totali alla raccolta sul culmo principale, nei genotipi allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	n° foglie			media
	I ₁₀₀	I ₅₀	I ₀	
IS 21055	15,3	16,1	13,4	14,9 a-c
ABZ rosso	13,4	13,9	14,5	13,9 a-c
ABZ bianco	13,8	14,8	14,4	14,2 a-c
M81-E	15,3	13,5	14,5	14,4 a-c
Makueni Local 08	13,9	14,5	12,8	13,7 bc
Keller	14,3	14,4	14,4	14,3 a-c
Makueni Local 06	14,4	16,0	13,6	14,6 a-c
Padana 4	14,0	17,8	14,0	15,2 a-c
H 133	17,3	15,3	13,3	15,2 a-c
Sugargraze	13,0	14,9	15,3	14,3 a-c
Nectar	14,5	15,5	13,9	14,6 a-c
Padana 1	13,9	15,4	14,6	14,6 a-c
Hay day	13,5	14,4	15,5	14,4 a-c
90-5-2 rosso	14,6	15,8	14,3	14,8 a-c
90-5-2 bianco	14,3	15,8	13,4	14,4 a-c
PR 140	15,4	16,5	16,0	15,9 a
PR 811	14,6	16,0	16,9	15,8 ab
Sucro 506	16,3	14,9	14,4	15,1 a-c
PR 849	13,6	14,1	12,8	13,5 c
Sorgo AUS	14,8	14,1	13,4	14,1 a-c
media	14,5 b	15,1 a	14,2 b	
Significatività	Cv	***		
	tesi irrigua	**		
	cv x tesi irrigua	*		

*, **, *** significativo per $p \leq 0,05, 0,01$ e $0,001$, rispettivamente secondo S.N.K

3.1.5 Indice di area fogliare (LAI)

L'indice di area fogliare alla raccolta è stato influenzato dai due fattori allo studio (Tabella 16). Nella media dei genotipi allo studio i valori massimi del LAI sono stati raggiunti nella tesi che prevedeva il 50% di restituzione dell'ET_m registrando un valore pari 5,26. Nella media dei due fattori allo studio (genotipo e trattamento. irriguo) i genotipi che si sono

statisticamente distinti, sono risultati essere le cultivar H133 e sorgo AUS, i quali hanno raggiunto valori di LAI di 7,34 e 6,00 rispettivamente.

Tabella 16: Andamento dell'area fogliare (LAI) in relazione al trattamento idrico allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	LAI			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
IS 21055	2,74	3,26	4,6	3,52 bc
ABZ rosso	4,46	5,36	5,0	4,95 bc
ABZ bianco	4,14	5,70	3,2	4,54 bc
M81-E	4,73	3,86	4,3	4,28 bc
Makueni Local 08	3,47	3,61	2,8	3,30 c
Keller	4,47	4,07	4,6	4,39 bc
Makueni Local 06	4,52	4,26	4,3	4,16 bc
Padana 4	5,29	4,84	5,0	5,04 bc
H 133	7,52	8,94	5,6	7,34 a
Sugargraze	4,78	5,33	4,0	4,69 bc
Nectar	3,69	4,03	3,5	3,74 bc
Padana 1	5,40	6,80	5,0	5,73 ac
Hay day	4,84	5,12	1,5	3,80 bc
90-5-2 rosso	6,40	5,63	5,4	5,80 a-c
90-5-2 bianco	3,37	5,42	4,2	4,33 bc
PR 140	4,69	7,16	4,6	4,83 bc
PR 811	4,57	5,03	5,2	4,93 bc
Sucro 506	3,58	6,00	4,5	4,69 bc
PR 849	3,85	5,84	4,8	4,84 bc
Sorgo AUS	5,64	7,02	5,4	6,00 a
media	4,60 b	5,26 a	4,37 b	
Significatività	cv	**		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	ns		

** , *** significativo per $p \leq 0,01$ e $0,001$, rispettivamente; ns: non significativo secondo S.N.K

3.1.6 Produzione di biomassa fresca epigea

La produzione totale di biomassa fresca alla raccolta è risultata influenzata significativamente dal livello di trattamento irriguo impiegato (Tabella 17).

Tabella 17: Resa in biomassa fresca del sorgo da biomassa in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Biomassa fresca (t ha⁻¹)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
IS 21055	53,7	36,6	29,5	39,9 cg
ABZ rosso	48,7	38,3	36,1	41,0 cg
ABZ bianco	50,5	41,1	37,3	43,0 cg
M81-E	56,0	66,5	36,3	52,9 ac
Makueni Local 08	53,2	36,5	38,2	42,6 cg
Keller	63,1	57,6	30,3	50,3 ad
Makueni Local 06	84,3	71,2	26,7	60,8 a
Padana 4	56,7	42,8	46,9	48,8 be
H 133	51,9	56,5	23,2	43,9 cg
Sugargraze	78,3	61,7	35,5	58,5 ab
Nectar	49,8	31,5	33,9	38,4 dg
Padana 1	58,6	47,7	26,8	44,4 cg
Hay day	39,6	29,7	26,8	32,0 g
90-5-2 rosso	60,2	42,2	36,7	46,4 cf
90-5-2 bianco	45,5	38,4	46,3	43,4 cg
PR 140	41,0	45,1	27,6	37,9 dg
PR 811	44,9	40,1	32,6	39,2 cg
Sucro 506	54,0	46,5	30,0	43,5 cg
PR 849	47,5	34,8	20,4	34,2 fg
Sorgo AUS	44,0	30,3	31,4	35,2 eg
media	54,1 a	44,8 b	32,6 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	***		

*** significativo per $p \leq 0,001$; secondo S.N.K

Nella media dei due fattori (genotipo e trattamento irriguo) sperimentali allo studio, la produzione media di biomassa fresca ha registrato valori pari a $43,8 \text{ t ha}^{-1}$. La biomassa fresca è aumentata significativamente con la fornitura di acqua di irrigazione, passando da $32,6 \text{ t ha}^{-1}$ (tesi I₀) a $44,8$ e $54,1 \text{ t ha}^{-1}$ (tesi I₅₀ e I₁₀₀, rispettivamente). Tra i genotipi, le più alte rese si sono registrate per le cultivar Makueni Local 06 e Sugargraze, la cui biomassa fresca ha superato $58,5 \text{ t ha}^{-1}$, nella media dei regimi idrici. La più bassa resa di biomassa fresca si è registrata, come era lecito attenderci nella cultivar a ciclo breve Hayday, registrando un valore pari a $32,0 \text{ kg ha}^{-1}$. Tuttavia, alcuni genotipi hanno risposto diversamente al regime idrico adottato. Le cultivar Padana 4 e Hayday hanno mostrato una

grande tolleranza per il limitato regime di irrigazione, mantenendo costante la loro resa finale di biomassa fresca in tutti e tre i regimi irrigui allo studio, mentre le cultivar Makueni Local 06 e H133 hanno ben risposto all' irrigazione, aumentando più di due volte la loro produttività in I_{50} rispetto alla I_0 . Nella media dei due fattori allo studio si è statisticamente distinta la cultivar Makueni Local 06 che ha fatto registrare il valore più elevato pari a $60,8 \text{ kg ha}^{-1}$.

3.1.7 Produzione di biomassa secca epigea

Il totale della produzione di biomassa secca epigea, nella media dei due fattori allo studio è stata pari a $11,4 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabella 18).

La biomassa secca è aumentata significativamente con la fornitura di acqua di irrigazione, passando da $8,6 \text{ t ha}^{-1}$ (tesi I_0) a $12,0 \text{ t ha}^{-1}$ e $13,7 \text{ t ha}^{-1}$ (tesi I_{50} e I_{100} , rispettivamente). Nella media dei regimi irrigui le cultivar che si sono significativamente distinti facendo registrare le più alte rese pari a $15,5 \text{ t ha}^{-1}$ sono risultati essere Makueni Local 06 e Sugargraze. Per contro il valore più basso di resa pari a $8,7 \text{ t ha}^{-1}$ si è registrato nella cultivar sorgo AUS. Molti genotipi hanno risposto in maniera significativa ai differenti trattamenti irrigui allo studio. Le cultivar Hayday e sorgo AUS hanno mostrato una grande tolleranza alla restrizione idrica, per contro Makueni Local 06 e H133 hanno risposto molto bene all'irrigazione incrementando più di due volte la resa in biomassa secca in I_{50} rispetto a I_0 .

Tabella 18: Resa in biomassa secca del sorgo da biomassa in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Biomassa secca (t ha⁻¹)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
IS 21055	14,0	10,6	6,4	10,3 bc
ABZ rosso	12,4	10,7	8,6	10,6 bc
ABZ bianco	13,5	10,4	9,3	11,1 bc
M81-E	13,8	14,6	8,8	12,4 ac
Makueni Local 08	12,2	8,6	7,7	9,5 bc
Keller	14,2	15,3	8,5	12,7 ac
Makueni Local 06	20,4	19,1	6,9	15,5 a
Padana 4	12,3	10,3	11,2	11,3 bc
H 133	15,7	17,7	7,4	13,6 ab
Sugargraze	21,1	15,3	10,2	15,5 a
Nectar	10,0	8,1	10,3	9,5 bc
Padana 1	14,8	11,7	8,4	11,6 bc
Hay day	10,4	9,7	8,0	9,3 bc
90-5-2 rosso	12,5	11,6	9,3	11,1 bc
90-5-2 bianco	12,3	10,3	12,1	11,6 bc
PR 140	13,1	12,7	8,2	11,3 bc
PR 811	11,8	11,2	8,5	10,5 bc
Sucro 506	14,2	13,8	8,1	12,0 ac
PR 849	14,9	10,4	6,2	10,5 bc
Sorgo AUS	10,7	7,7	7,6	8,7 c
media	13,7 a	12,0 b	8,6 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	**		

** , *** significativo per $p \leq 0,01$ e $0,001$, rispettivamente secondo S.N.K

3.1.8 Efficienza d'uso dell'acqua (WUE)

L'efficienza d'uso dell'acqua (WUE) (Pereira *et al.*, 2002), è stata ottenuta dividendo la produzione aerea di sostanza secca per l'acqua di irrigazione più le piogge (g l^{-1}), la quale ha fatto accertare nella media dei fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo), differenze significative da attribuire alle differenti capacità dei genotipi di valorizzare questo input (Tabella 19). Nel corso del ciclo colturale, il contenuto idrico complessivo (irrigazione + pioggia) nelle tre tesi allo studio è risultato pari a 240, 290 e 340 mm rispettivamente per le tesi I₀, I₅₀ e I₁₀₀. I valori più elevati si sono registrati nella cultivar Sugargraze a ciclo più lungo rispetto alla varietà Sorgo AUS (5,50 contro 3,21 g l^{-1}). La

WUE, nella media dei genotipi trattati, ha raggiunto valori pari a (3,96 g l⁻¹). Tuttavia i valori più elevati di WUE si sono registrati nella tesi I₅₀ (4,35 g l⁻¹) la quale non si è statisticamente distinta rispetto alla tesi I₁₀₀ la quale ha registrato un valore di 4,04 g l⁻¹. Le cultivar più produttive in termini di biomassa prodotta (Sugargraze e Makueni Local 06) nella media dei fattori allo studio, hanno fatto registrare anche i valori più elevati di WUE pari a 5,50 e 4,78 g l⁻¹ rispettivamente.

Tabella 19: Efficienza d'uso dell'acqua (WUE) dei genotipi di sorgo da biomassa posti allo studio in relazione alla biomassa secca. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	WUE (g l ⁻¹)			Media
	I ₁₀₀	I ₅₀	I ₀	
IS 21055	4,1	3,4	2,7	3,41 bc
ABZ rosso	3,7	4,1	3,5	3,76 bc
ABZ bianco	4,0	4,3	3,7	4,00 bc
M81-E	4,1	4,7	3,6	4,11 bc
Makueni Local 08	3,6	3,1	3,1	3,26 c
Keller	4,2	5,9	3,5	4,54 a-c
Makueni Local 06	6,0	5,6	2,8	4,78 ab
Padana 4	3,6	4,1	4,5	4,06 bc
H 133	4,6	5,9	3,0	4,49 a-c
Sugargraze	6,2	6,0	4,3	5,50 a
Nectar	3,0	3,9	4,2	3,70 bc
Padana 1	4,4	4,3	3,5	4,04 bc
Hay day	3,1	3,7	3,2	3,34 bc
90-5-2 rosso	3,7	4,1	3,7	3,85 bc
90-5-2 bianco	3,6	3,5	4,8	3,98 bc
PR 140	3,8	4,2	3,3	3,76 bc
PR 811	3,5	4,6	3,5	3,85 bc
Sucro 506	4,2	4,6	3,2	4,00 bc
PR 849	4,4	3,6	2,5	3,48 bc
Sorgo AUS	3,2	3,4	3,1	3,21 c
media	4,04 a	4,35 a	3,49 b	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	*		

*, *** significativo per $p \leq 0,05$ e $0,001$, rispettivamente secondo S.N.K

3.1.9 Efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE)

L'efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (Irrigation Water Use Efficiency, IWUE) è stata calcolata come rapporto tra la produzione di sostanza secca e l'acqua di irrigazione

apportata ai diversi genotipi rispetto ai diversi volumi d'adacquamento forniti alla coltura. Nel corso del ciclo colturale, l'umidità apportata è risultata pari a 90, 140 e 190 mm rispettivamente per I₀, I₅₀ e I₁₀₀. La IWUE, nella media dei genotipi è migliorata con la tecnica irrigua PRD (I₅₀) rispetto alla tesi I₁₀₀ (Tabella 20), mostrando un certo grado di validità di questa tecnica innovativa di risparmio idrico per la specie oggetto di studio.

Tabella 20: Efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE) dei genotipi di sorgo da biomassa posti allo studio in relazione alla biomassa secca. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	IWUE (g l⁻¹)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
IS 21055	7,4	7,0	7,3	7,21 b
ABZ rosso	6,5	8,4	9,4	8,11 b
ABZ bianco	7,1	8,9	9,9	8,65 ab
M81-E	7,3	9,7	9,6	8,86 ab
Makueni Local 08	6,4	6,5	8,2	7,04 b
Keller	7,5	12,3	9,4	9,72 ab
Makueni Local 06	10,7	11,5	7,6	9,93 ab
Padana 4	6,5	8,5	12,0	9,00 ab
H 133	8,3	12,2	7,9	9,45 ab
Sugargraze	11,1	12,4	11,4	11,63 a
Nectar	5,3	8,2	11,2	8,24 b
Padana 1	7,8	8,9	9,3	8,66 ab
Hay day	5,5	7,8	8,7	7,31 b
90-5-2 rosso	6,6	8,6	10,0	8,38 b
90-5-2 bianco	6,5	7,3	12,8	8,87 ab
PR 140	6,9	8,7	8,8	8,13 b
PR 811	6,2	9,5	9,4	8,35 b
Sucro 506	7,5	9,6	8,4	8,50 ab
PR 849	7,9	7,4	6,7	7,30 b
Sorgo AUS	5,6	7,0	8,3	6,96 b
media	7,22 b	9,02 a	9,31 b	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	ns		

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

L'effetto della PRD è stato particolarmente evidente nella cultivar H 133, dove IWUE è aumentata di oltre il 40% rispetto alla tesi I₀. La cultivar Sugargraze una delle più produttive si è significativamente distinta da tutti gli altri genotipi, facendo registrare il valore più alto pari a 11,6 g l⁻¹ nella media dei fattori allo studio.

3.1.10 Indice rifrattometrico (°Brix)

Il sorgo zuccherino è considerato una fonte potenzialmente utile per la produzione di biocarburanti (Reddy B.V.S *et al.*, 2005). Alla raccolta la percentuale (%) dei carboidrati solubili nel succo è stata ottenuta sezionando una sezione di fusto tratto dal quarto internodo sotto il panicolo di tre piante rappresentative di ogni parcella. La misura dei carboidrati solubili totali (glucosio + fruttosio + saccarosio) nel succo è stata determinata tramite l'utilizzo di un rifrattometro digitale Hanna HI 96811 Brix 0-50%. Come era logico attendersi le varietà zuccherine hanno fatto registrare nella media dei fattori allo studio valori °Brix più alti rispetto ai tipi da fibra (Tabella 21). Tra i genotipi si sono statisticamente distinti le cultivar Sugargraze, M81-E, Keller e Sucro 506 che hanno registrato valori pari a 19,6, 18,9 e 18,2 rispettivamente. Nella media dei trattamenti irrigui allo studio la tesi con il pieno soddisfacimento idrico (I₁₀₀) ha registrato il valore più elevato pari a 16,8, statisticamente significativo rispetto alle tesi I₅₀ e I₀.

Tabella 21: Contenuto in zuccheri (°Brix) alla raccolta in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Indice rifrattometrico			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
IS 21055	14,3	14,5	13,5	14,1 j
ABZ rosso	16,8	16,9	16,2	16,6 ef
ABZ bianco	17,3	17,0	16,5	16,9 e
M81-E	22,6	19,2	14,9	18,9 b
Makueni Local 08	17,5	17,7	17,5	17,6 d
Keller	18,7	18,9	17,2	18,2 c
Makueni Local 06	16,9	17,3	16,5	16,9 e
Padana 4	16,3	15,2	13,5	15,0 j
H 133	13,9	16,0	12,0	14,1 j
Sugargraze	20,0	20,3	18,3	19,6 a
Nectar	18,4	15,4	15,0	16,3 f
Padana 1	17,1	16,2	18,9	17,3 d
Hay day	16,0	15,7	12,9	14,8 i
90-5-2 rosso	15,7	15,8	15,0	15,4 h
90-5-2 bianco	16,2	16,2	15,8	16,0 g
PR 140	13,0	11,7	11,2	11,9 l
PR 811	15,2	14,8	10,9	13,6 k
Sucro 506	18,4	18,5	17,5	18,2 c
PR 849	17,5	16,6	15,7	16,5 ef
Sorgo AUS	12,5	12,6	11,6	12,2 l
media	16,8 a	16,3 b	14,9 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	***		

*** significativo per $p \leq 0,001$ secondo S.N.K

3.1.11 Discussioni

I risultati di questa ricerca hanno evidenziato una discreta capacità produttiva del sorgo, sia da fibra che zuccherino, come coltura da biomassa per energia seminata in epoca ritardata nell'ambiente mediterraneo. I regimi irrigui allo studio hanno influenzato in maniera significativa la produzione di biomassa epigea. La semina ritardata (Luglio) ed il repentino calo delle temperature avvenuto nella stagione autunnale, prima della fase di raccolta, non hanno consentito alla coltura il raggiungimento della completa maturazione

fisiologica bloccando il ciclo alla maturazione lattea. Le raccolte sono state effettuate alla data di maturazione lattea delle tesi irrigue. Le rese in biomassa secca oscillavano nella media dei genotipi, tra 13,7 t ha⁻¹ della tesi I₁₀₀ e 8,6 t ha⁻¹ registrati nella tesi I₀. Per contro la tesi I₅₀ ha fatto registrare una resa di 12,0 t ha⁻¹, confermando la validità di questa tecnica nel risparmiare la risorsa idrica senza penalizzare significativamente le rese finali di sostanza secca. L'efficienza d'uso dell'acqua (WUE = water use efficiency) calcolata dal rapporto tra la biomassa secca prodotta ed i volumi idrici effettivamente utilizzati, è risultata differenziata in relazione ai fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo). La tesi I₅₀ ha fatto registrare nella media dei genotipi allo studio il valore più elevato (4,35 g l⁻¹), seguito dalla tesi I₁₀₀ (4,04 g l⁻¹). L'efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE = irrigation water use efficiency), è migliorata con la tecnica irrigua PRD rispetto alla tesi I₁₀₀ mostrando un certo grado di validità di questa tecnica innovativa di risparmio idrico per la specie oggetto di studio. Date le caratteristiche biologiche e fisiologiche di arido-resistenza che le consentono alla coltura del sorgo di poter superare periodi di carenza idrica, arrestando momentaneamente accrescimento e sviluppo, è possibile risparmiare notevoli quantità di acqua ad uso irriguo, sfruttando la tecnica della Partial Rootzone Drying (PRD), la quale consente un consistente risparmio idrico, senza penalizzare significativamente le produzioni.

3.2 Linea di ricerca 2: Screening genotipico per la resistenza alle basse temperature in fase di germinazione in cultivar di sorgo da biomassa per energia.

3.2.1 Germinazione finale a temperatura controllata

La germinazione dei semi di sorgo è stata significativamente influenzata dalla temperatura, che è diminuita con l'abbassarsi delle temperature, da 92,9% a 25 ° C e 55,9% a 8 ° C (Tabella 22). I risultati confermano la temperatura di 25 °C, ottimale per la germinazione del sorgo. Tuttavia, alcune cultivar si comportavano in modo diverso a temperature subottimali (temperatura x cultivar significativa a p <0,001, (Tabella 23). Infatti, la variabilità genetica è aumentata con l'abbassamento della temperatura di germinazione. A 15 °C la germinazione ha superato 80% in tutti i genotipi ad eccezione di Padana 1 e HayDay. A questa temperatura, la germinazione dei semi era stata piena (100%) in Jumbo,

e pressoché piena (> 98,5%) in PSE98456, Padana 4 e PR811F, tutti sorghi fibra. A 10 °C, la variabilità per la germinazione tra sorghi è stata più alta (CV = 25,4%). A questa temperatura, in sette cultivar, per lo più tipi di fibra, la germinazione è stata > 90%, mentre le cultivar HayDay, H133 e Nectar non hanno raggiunto il 50% di semi germinati. A 8°C la variabilità è apparsa più ampia (>38%) a causa della drastica riduzione della capacità germinativa di molte cultivar. A questa temperatura otto cultivar sono germinate per oltre il 70%, e in ‘Padana 4’ ‘PR811F’, ‘PSE23431’, ‘PSE24213’ e ‘PR849’, tutti tipi da fibra, la germinabilità ha superato l’80%. Tra questi, ‘Padana 4’ è apparsa la più tollerante al freddo (germinabilità >90% a 8°C). Per contro, otto cultivar non ha raggiunto il 50% di semi germinati, risultate pertanto poco tolleranti allo stress termico da basse temperature in fase di germinazione e, quindi, poco adatte alle semine molto anticipate. In generale, i tipi zuccherini sono apparsi più sensibili dai tipi da fibra alle basse temperatura durante la germinazione.

Tabella 22: Effetti della temperature sulla germinazione finale di 23 genotipi di sorgo

Cultivar	Germinazione (%)						Media
	8°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	
Jumbo	74,7	97,8	100,0	100,0	98,7	97,8	94,8 a
PSE98456	60,0	97,3	98,7	98,3	98,7	93,5	91,1 a-c
Padana 4	90,1	95,3	98,6	97,6	97,3	97,3	96,0 ab
PR811F	84,4	93,3	98,7	100,0	98,7	92,2	94,5 a-c
Sugargraze	61,8	92,0	92,0	92,2	94,7	92,2	87,4 d-f
PSE27677	62,7	92,0	96,0	96,0	100,0	100,0	91,1 a-c
PSE23431	59,5	90,9	93,3	100,0	98,7	97,3	89,9 b-d
Bulldozer	50,7	86,7	92,0	95,6	92,1	91,1	84,7 e-h
PSE22053	64,6	86,7	92,0	90,0	94,7	90,9	86,5 e-g
PSE24213	80,6	85,4	89,3	95,1	93,3	98,7	90,4 c-e
PSE22043	66,6	82,3	85,3	92,6	96,0	90,8	85,6 e-g
PR849	82,0	82,2	93,4	92,2	90,7	87,8	88,1 e-g
Maja	70,0	81,1	81,3	91,3	92,0	89,1	84,1 f-h
Topper 76-6	72,2	80,0	93,3	92,1	92,0	87,8	86,2 e-g
Dale	61,1	77,8	93,3	94,4	92,0	88,9	84,6 e-h
M81-E	42,2	77,8	92,2	92,2	96,0	92,2	82,1 f-h
Padana 1	34,9	68,0	67,8	73,3	90,0	85,9	69,9 i
Silage King	23,3	60,0	81,3	85,6	89,3	85,1	70,7 i
Nicol	41,3	58,9	90,8	88,9	96,0	92,2	78,0 gh
PR895	12,0	56,7	81,9	86,7	84,3	80,0	66,9 ij
HayDay	41,3	49,3	61,3	86,7	68,0	61,3	61,3 j
H133	27,4	34,2	82,7	80,1	82,7	63,1	61,7 j
Nectar	23,6	30,7	81,7	94,7	100,0	97,3	71,3 h
Media	55,9 d	76,4 c	88,6 b	92,0 a	92,9 a	89,2 b	
Σ	21,7	19,4	9,7	6,5	7,1	9,8	
CV (%)	38,8	25,4	10,9	7,0	7,7	11,0	

DMS (CV x T) $p < 0,05 = 2,12$ **Tabella 23:** Analisi della varianza a due vie dei dati di germinazione finale di 23 genotipi di sorgo ad un range di temperature costanti

Fonte di variazione	Df	SS	MS	F	P
Replica	3	163,5	81,7	2,20	.11 ns
Cultivar (c)	22	31406,5	1427,6	38,3	.000***
Temperatura (T)	5	41342,1	8268,4	222,1	.000***
C x T	110	14902,2	135,5	3,64	.000***
Errore	411	10200,1	37,2		
Totale	551	98014,4			

3.2.2 Tempo medio di germinazione (MGT) a temperatura controllata

Il tempo medio di germinazione (MGT) è variato con la temperatura e le cultivar (Tabelle 24, 25). La germinazione è stata più veloce a più alte temperature, e a 30 °C tutte le cultivar sono germinate in meno di 2 giorni. L'abbassamento delle temperature da quelle ottimali ha determinato un progressivo aumento del tempo di germinazione.

Tabella 24: Effetto delle temperature sul tempo medio di germinazione di 23 genotipi di sorgo da biomassa.

Cultivar	MGT (gg)						Media
	8°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	
Jumbo	19,1	6,3	4,1	2,5	1,8	1,2	5,8 jk
PSE98456	16,4	11,4	5,3	2,8	2,0	1,0	6,5 g-i
Padana 4	15,5	11,6	5,0	2,4	2,0	1,0	6,2 h-j
PR811F	14,7	5,5	3,5	2,5	1,9	1,3	4,9 l
Sugargraze	14,6	13,5	5,1	2,6	2,1	1,1	6,5 g-i
PSE27677	16,3	11,8	6,5	2,6	2,4	1,2	6,8 e-g
PSE23431	18,6	12,5	5,1	2,8	2,1	1,1	7,0 d-f
Bulldozer	18,5	6,9	4,2	2,1	2,0	1,2	5,8 jk
PSE22053	15,7	10,2	4,8	2,4	1,7	1,1	5,9 i-k
PSE24213	16,4	11,9	6,0	3,1	2,5	1,3	6,8 e-g
PSE22043	20,0	12,6	5,6	3,0	2,3	1,1	7,4 d
PR849	18,3	8,3	4,6	2,7	2,0	1,4	6,2 h-j
Maja	17,0	7,0	4,1	3,0	1,4	1,2	5,6 k
Topper 76-6	15,0	8,7	3,8	2,7	2,0	1,3	5,6 k
Dale	15,8	7,7	3,6	2,8	2,0	1,2	5,5 k
M81-E	18,2	8,5	3,9	2,7	2,3	1,2	6,1 h-j
Padana 1	19,4	13,7	6,1	3,8	2,3	1,5	7,8 c
Silage King	19,2	10,1	4,9	3,5	2,1	1,5	6,8 e-g
Nicol	19,5	9,6	4,3	2,8	1,8	1,6	6,6 f-h
PR895	25,4	16,2	5,8	3,4	2,1	1,7	9,1 a
HayDay	17,4	12,8	6,3	2,7	2,5	1,5	7,2 de
H133	21,5	15,3	6,2	3,9	2,5	1,2	8,4 b
Nectar	23,1	17,5	6,8	2,7	2,3	1,2	8,9 a
Media	18,1 a	10,9 b	5,0 c	2,9 d	2,1 e	1,3 f	
Σ	2,7	3,2	1,0	0,4	0,3	0,2	
CV (%)	15,0	29,8	19,7	15,4	12,9	15,0	

DMS (CV x T) $p < 0,05 = 22,3$

Tabella 25: Analisi della varianza a due vie per MGT in 23 genotipi di sorgo ad un range di temperature costante

Fonte di variazione	df	SS	MS	F	P
Replica	3	0,21	0,10	0,31	.74 ns
Cultivar (c)	22	3867,1	175,8	523,6	.000***
Temperatura (T)	5	14999,7	2999,9	8935,9	.000***
C x T	110	19229,0	174,8	520,7	.000***
Errore	411	92,0	0,34		
Totale	551	38188,0			

3.2.3 MGT in funzione alla germinazione finale

E' stato studiato il rapporto tra il tempo medio di germinazione (MGT) in funzione dei valori di germinazione finale, ad una temperatura di 8°C (Figura 15). L'andamento della relazione, descritta da una funzione esponenziale ($R^2 = 0,70$), evidenzia come le cultivar tolleranti al freddo tendono a germinare più velocemente rispetto a quelle sensibili.

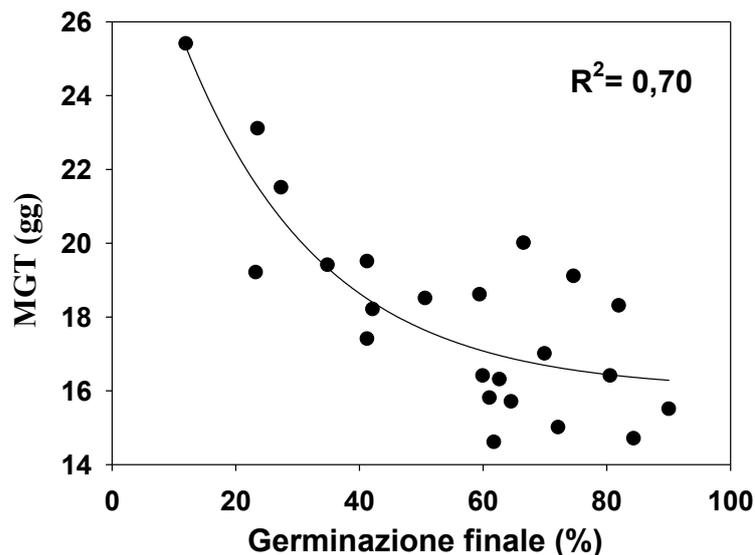


Figura 15: Relazione tra i valori di germinazione finale vs. MGT registrati a 8°C.

3.2.4 Somme termiche e temperatura base (T_b)

Nella media delle cultivar la temperatura minima o di base che permette la germinazione, è stata di 7,87 °C (Tabella 26).

Tabella 26: Valori del coefficiente b , temperatura base (T_b) e somme termiche di germinazione (θ_T) calcolate per 23 genotipi di sorgo da biomassa.

Cultivar	MGT (gg)		
	b ($d^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	T_b ($^\circ\text{C}$)	θ_T ($^\circ\text{C d}^{-1}$)
Jumbo	0,039	7,40	23,65
PSE98456	0,034	7,51	27,42
Padana 4	0,028	6,55	35,02
PR811F	0,040	6,16	24,72
Sugargraze	0,023	6,45	43,03
PSE27677	0,023	6,67	41,89
PSE23431	0,026	7,00	36,62
Bulldozer	0,042	7,60	21,68
PSE22053	0,039	7,58	26,71
PSE24213	0,022	6,08	43,57
PSE22043	0,027	7,82	38,42
PR849	0,033	6,87	29,10
Maja	0,038	7,64	23,75
Topper 76-6	0,040	6,88	23,59
Dale	0,034	7,20	27,74
M81-E	0,039	8,54	25,25
Padana 1	0,027	9,17	40,42
Silage King	0,040	9,23	24,68
Nicol	0,041	9,22	23,73
PR895	0,039	9,35	25,30
HayDay	0,030	9,26	36,81
H133	0,026	10,15	38,66
Nectar	0,039	7,40	23,65
Media	0,033	7,87	31,24
σ	0,007	1,32	7,47
CV (%)	20,61	16,80	23,91

La temperatura di base è variata con le cultivar da 6,08 °C a 10,68 °C. Basse temperature di base (<7 °C) sono stati calcolati per PSE24213, Padana 4, PR811F, Sugargraze, PSE27677, PR849 e Topper 76-6. Al contrario un'alta somma termica per la germinazione (>10°C) è stata registrata per le cultivar Nectar e H133. Nessuna differenza in termini di

tolleranza al freddo è stata osservata tra i tipi da fibra e da zucchero. Molte cultivar con una T_b simile, hanno mostrato differente velocità di germinazione (pendenza b della regressione lineare del GR_{50} vs. temperatura di germinazione). Tuttavia, oltre alla tolleranza alle basse temperature, un rapido tasso di germinazione all'aumentare della temperatura è ugualmente importante per il sorgo, al quale si richiede una pronta emergenza, nei terreni che si asciugano rapidamente nelle condizioni climatiche dell'Europa meridionale. Il 50% della somma termica raggiunta, cambiava con le cultivar, in un range compreso tra $21,68 \text{ °Cd}^{-1}$ (Bulldozer) e $43,57 \text{ °Cd}^{-1}$ (PSE24213). Quest'ultima cultivar aveva la più bassa temperatura di base, rivelando così una tolleranza al freddo, ma una lenta velocità di germinazione. Un comportamento simile è stato osservato in Sugargraze, con una bassa temperatura di base ($6,45 \text{ °C}$), ma un'alta somma termica ($43,03 \text{ °Cd}^{-1}$). Basse somme termiche ($<24 \text{ °Cd}^{-1}$) sono state calcolate per Jumbo, Maja, Topper 76-6, Nicol; alte somme termiche ($> 40 \text{ °Cd}^{-1}$) sono state corrisposte a PSE 27677 e Padana 1.

3.2.5 Discussione

Differenze significative per la resistenza al freddo sono state riscontrate in tipi di sorgo da fibra e da zucchero in laboratorio a temperatura controllata. Precedenti studi sul sorgo (J. Yu, M.R. Tuinstra, *et al.*, 2004), hanno dimostrato correlazioni significative tra tratti di tolleranza al freddo, come la velocità e la percentuale di germinazione, misurata in laboratorio e test di campo per la tolleranza a freddo, ad indicare che il test di laboratorio potrebbe essere usato con successo come metodo di screening preliminare per la valutazione della tolleranza al freddo in sorgo. Questa variazione genetica nella risposta germinativa a basse temperature durante la germinazione è utile per l'identificazione di genotipi di sorghi adatti per la semina precoce in zone semiaride. In particolare, criteri per la selezione sono una bassa soglia termica e somme termiche ridotte (come osservato nelle cultivar PR 811F e PR 849, entrambe da fibra) che, se associate, possono assicurare un adeguato insediamento della coltura allorchè vengono adottate semine anticipate (Marzo-Aprile) in ambiente Mediterraneo.

3.3. Linea di ricerca 3: Studio della risposta allo stress idrico di genotipi di sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench da biomassa per energia seminati in epoca anticipata in ambiente mediterraneo.

3.3.1 Andamento Meteorologico

Nel corso del ciclo colturale i valori della temperatura massima dell'aria hanno oscillato tra 44 °C (Luglio), 27 °C (Ottobre) mentre quelli della temperatura minima tra 7 (Ottobre) e 27 °C, (Giugno). Il mese più caldo è stato, come tipico dell'ambiente mediterraneo il mese di Agosto, successivamente le temperature si sono mantenute nel mese di Settembre intorno ai 29,2 °C di media, per poi decrescere durante il mese di Ottobre a causa delle continue piogge (Figura 16). L'evaporato medio giornaliero è progressivamente cresciuto da 8,2 mm di giugno ai 11,9 mm di Agosto, per poi drasticamente decrescere fino a raggiungere i 3 mm nel mese di Ottobre. Piogge intense si sono verificate nel mese di Settembre, dove nel complesso la pioggia caduta è stata di 61 mm, mentre 47 mm sono stati misurati tra la prima e la seconda decade del mese di Ottobre.

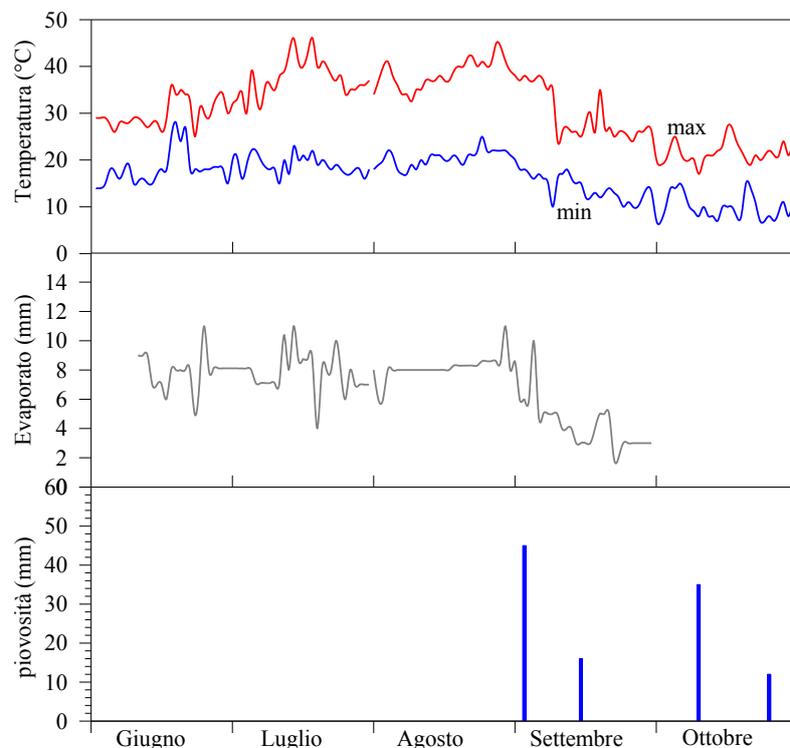


Figura 16: Andamento termopluviometrico durante la stagione colturale nel 2010

3.3.2 Ciclo biologico

Nella manifestazione degli eventi fenologici è stata rilevata una interazione significativa tra i fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo) (Figura17).

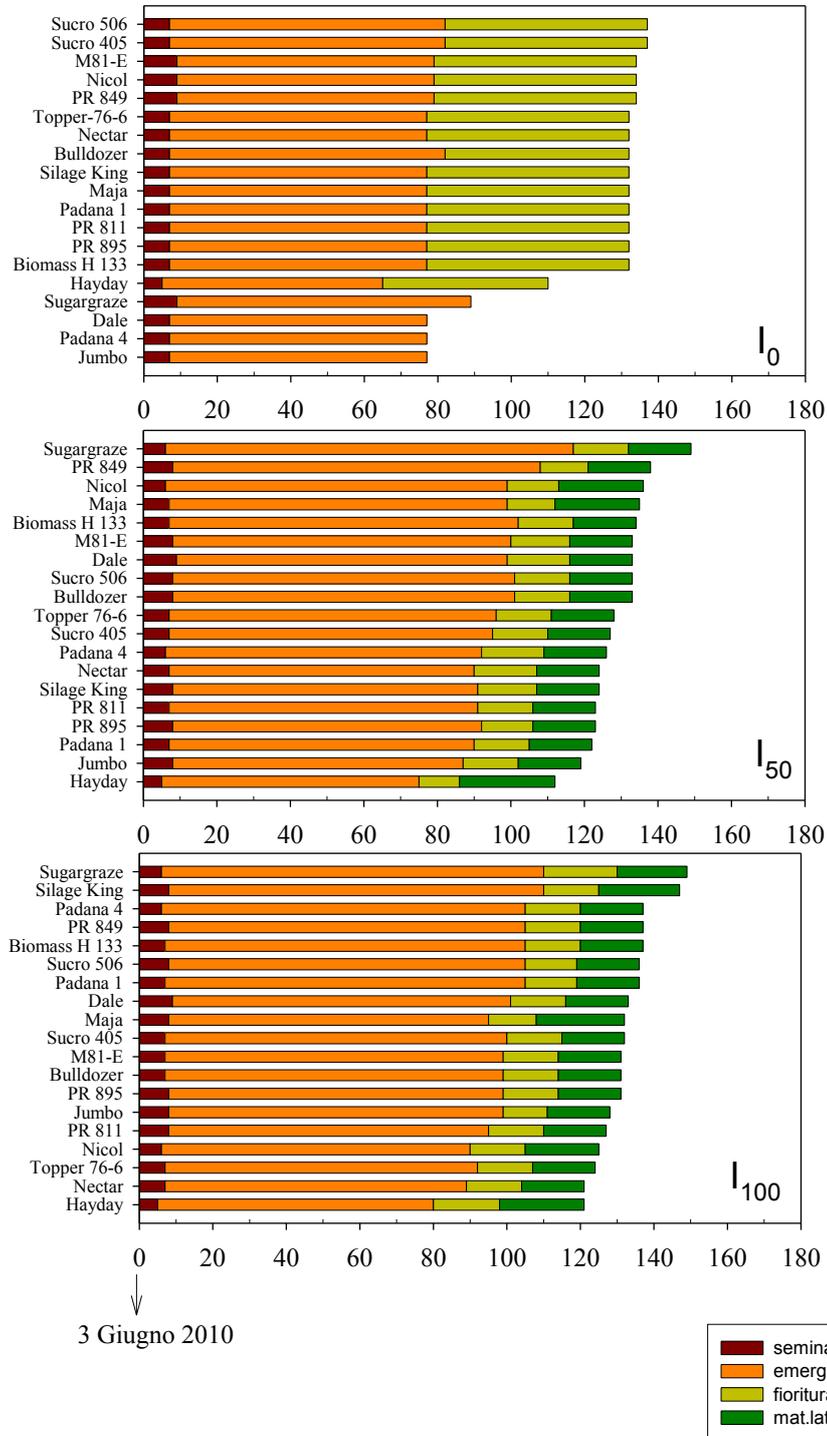


Figura 17: Lunghezza del ciclo biologico e di alcune fenofasi in funzione delle cultivar e del trattamento irriguo

In particolare nella tesi I_0 , dove l'irrigazione è stata effettuata fino all'insediamento delle plantule, le piante non hanno raggiunto la maturazione fisiologica, ma sono rimaste nella fase di maturazione lattea; nella tesi I_{50} a cui è stata restituito il 50% dell'ET_m utilizzando la tecnica del PRD, le piante hanno raggiunto la maturazione fisiologica a circa 129 giorni dalla semina. Nella tesi I_{100} , per contro, la maturazione fisiologica è stata raggiunta in media, a 125 giorni dalla semina. Nel complesso, in condizioni di stress idrico, la coltura ritarda la manifestazione degli eventi fenologici in misura più o meno accentuata in relazione all'entità dello stress. Nella tesi che prevedeva la completa restituzione dell'evapotraspirazione massima (ET_m = 100) la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nella cultivar Sugargraze (149 giorni), pianta estremamente equilibrata dove la fase di sviluppo vegetativo è molto prolungata, con tendenza a non emettere il panicolo, rispetto alla cultivar Hayday a ciclo breve (121 giorni); nella tesi I_{50} la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nella cultivar Sugargraze (146 giorni) rispetto alla cultivar Hayday (112 giorni); infine nella tesi I_0 che non prevedeva la restituzione dell'evapotraspirazione massima (ET_m), la durata del ciclo colturale è risultata maggiore nelle cultivar Sucro 405 e 506 (137 giorni) rispetto alla cultivar Hayday (110 giorni), la quale è risultata essere la più precoce in tutte e tre le tesi allo studio.

3.3.3 Altezza della pianta

I fattori allo studio hanno influito significativamente anche sull'accrescimento in altezza delle piante (Tabella 27). L'effetto più marcato è statisticamente significativo è risultato in questo caso, solo quello del contenuto idrico del terreno. Alla raccolta nella tesi I_0 le piante anno raggiunto appena superato il metro di altezza (105,4 cm); nella tesi I_{50} si sono attestate intorno ad una media di 208,3 cm, mentre nella tesi I_{100} hanno superato in media i 250,0 cm. Anche in questo caso l'effetto del differente regime irriguo è apparso preponderante rispetto al genotipo. Nella media dei due fattori allo studio la cultivar che si è distinta significativamente, facendo segnare il valore più elevato pari a 247,1 è risultata H133. Nelle tesi I_{100} e I_{50} la cultivar H133 ha segnato i valori più elevati di altezza 346,9 e 274,9 rispettivamente; per contro i valori più bassi si sono registrati nelle cultivar Jumbo e Padana 4 rispettivamente.

Tabella 27: Altezza (cm) della pianta in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test)

Cultivar	Altezza (cm)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	280,9	228,7	106,3	205,3 bc
Topper76-6	267,7	192,3	82,5	180,8 cd
Dale	250,1	240,9	99,3	196,8 bd
Sugargraze	275,3	181,4	96,6	184,4 cd
Nectar	233,8	179,1	98,6	170,5 cd
Padana 4	260,6	164,5	84,9	170,0 cd
Nicol	273,3	221,0	139,4	211,2 bc
Sucro 506	252,3	256,8	136,6	215,2 bc
Bulldozer	322,9	252,9	146,5	240,7 ab
Silage King	255,6	210,4	77,7	181,2 cd
Maja	239,3	265,7	119,4	208,1 bc
Padana 1	232,9	191,7	95,4	173,3 cd
Hayday	229,8	246,9	177,0	217,9 bc
Jumbo	191,0	179,3	89,1	153,1 d
PR 849	227,5	191,7	84,6	168,0 cd
PR 811	229,9	193,1	67,8	163,6 cd
PR 895	219,4	214,2	84,4	172,7 cd
H 133	346,9	274,9	119,5	247,1 a
Sucro 405	259,5	261,6	97,9	206,3 bc
media	255,2 a	218,3 b	105,4 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	ns		

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

3.3.4 Numero di foglie verdi

Alla raccolta il numero di foglie è variato significativamente in rapporto al trattamento irriguo adottato (Tabella 28). Nella media dei trattamenti irrigui si sono registrati valori pari a 13,8, 13,3 e 11,8 nelle tesi I₁₀₀ I₅₀ e I₀ rispettivamente. Tuttavia tra le tesi I₁₀₀ ed I₅₀ non si sono registrati valori statisticamente differenti. Questo dimostra come utilizzando la metà della risorsa idrica si può avere la stessa copertura vegetale (canopy), senza penalizzare le produzioni.

Tabella 28: Numero di foglie totali alla raccolta sul culmo principale, nei genotipi allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	n° foglie			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	14,0	15,0	11,7	13,6 ac
Topper76-6	13,5	14,5	13,1	13,7 ac
Dale	13,1	12,1	11,5	12,2 bc
Sugargraze	13,8	13,2	10,7	12,5 bc
Nectar	13,9	13,8	11,7	13,1 ac
Padana 4	14,5	12,2	11,9	12,8 bc
Nicol	15,3	12,9	9,8	12,7 ac
Sucro 506	13,1	12,8	12,9	12,9 bc
Bulldozer	15,0	14,8	12,3	14,0 ab
Silage King	11,7	13,5	13,1	12,8 bc
Maja	11,6	12,4	11,6	11,9 bc
Padana 1	13,9	12,5	11,0	12,4 bc
Hayday	13,5	12,9	11,5	12,6 ac
Jumbo	15,0	13,2	13,9	14,1 ac
PR 849	11,6	9,8	11,8	11,1 c
PR 811	18,0	17,3	12,0	15,8 a
PR 895	15,2	15,3	11,9	14,1 ac
H 133	13,1	13,3	11,4	12,6 bc
Sucro 405	13,4	11,7	11,9	11,9 bc
media	13,8 a	13,3 a	11,8 b	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	ns		

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

3.3.5 Indice di Area fogliare (LAI)

Alla raccolta dai dati ottenuti della superficie fogliare è stato calcolato l'indice dell'area fogliare (Leaf Area Index LAI), rapportando la superficie fogliare sull'unità di superficie del terreno. Il LAI nella media dei genotipi allo studio, ha fatto registrare il valore più alto pari a 0,64 nella tesi che prevedeva il 100% di restituzione dell'ET_m, (Tabella 29), pur tuttavia non si è dimostrato statisticamente significativo nei confronti della tesi I₅₀. Invece, il maggior volume d'adacquamento (tesi I₁₀₀) ha fatto osservare, nella cultivar PR811 il valore maggiore del LAI (1,11).

Tabella 29: Andamento dell'area fogliare (LAI) in relazione al trattamento idrico allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	LAI			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	0,74	0,81	0,39	0,65 ab
Topper76-6	0,63	0,49	0,36	0,50 ab
Dale	0,43	0,54	0,37	0,44 b
Sugargraze	1,07	0,59	0,42	0,69 ab
Nectar	0,48	0,64	0,29	0,47 ab
Padana 4	1,03	0,61	0,39	0,68 ab
Nicol	0,38	0,27	0,33	0,33 b
Sucro 506	0,74	0,55	0,39	0,56 ab
Bulldozer	0,74	0,56	0,39	0,56 ab
Silage King	0,43	0,51	0,30	0,41 b
Maja	0,29	0,31	0,47	0,36 b
Padana 1	0,87	0,40	0,32	0,53 ab
Hayday	0,29	0,66	0,31	0,42 ab
Jumbo	0,66	0,55	0,28	0,50 ab
PR 849	0,40	0,27	0,34	0,34 b
PR 811	1,11	1,16	0,35	0,87 a
PR 895	0,67	0,75	0,38	0,60 ab
H 133	0,62	0,52	0,39	0,51 ab
Sucro 405	0,64	0,35	0,28	0,43 b
media	0,64 a	0,56 a	0,36 b	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	**		
	cv x tesi irrigua	ns		

******, ******* significativo per $p \leq 0,01$ e $0,001$, rispettivamente; ns: non significativo secondo S.N.K

3.3.6 Durata dell'Area fogliare (LAD)

Il LAD, che esprime la durata dell' efficienza dell'apparato fogliare fotosintetizzante, è risultato più prolungato nel regime irriguo che prevedeva la piena restituzione dell'ETm (tesi I₁₀₀), facendo segnare un valore pari a 183,2 giorni (Figura 18). In particolare, tale regime irriguo ha garantito un LAI maggiore durante le prime fasi del ciclo colturale (sino alla fioritura), prolungando altresì l'attività fotosintetica dell'apparato fogliare. Il basso LAD corrisposto dal trattamento irriguo I₀ pari a 34,2 giorni, ha comportato un ridotto ritmo di accrescimento della coltura e, conseguentemente la ridotta biomassa secca cumulata sull'unità di superficie alla raccolta.

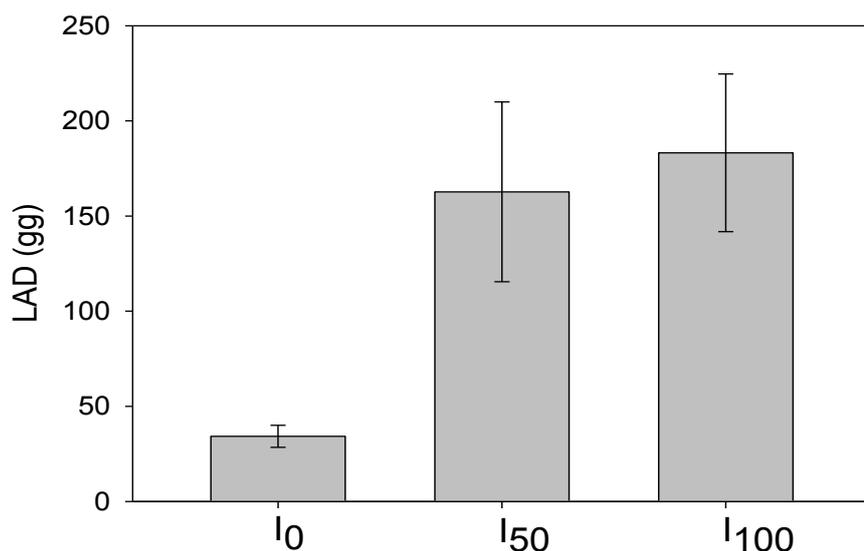


Figura 18: Andamento della durata dell'area fogliare (LAD) nei trattamenti allo studio

3.3.7 Produzione di biomassa fresca epigea

La produzione di biomassa fresca alla raccolta, ha mostrato valori più elevati in corrispondenza della tesi che prevedeva la completa restituzione dell'evapotraspirazione massima ($ET_m = 100$) pari a $76,4 \text{ t ha}^{-1}$ (Tabella 30); buona è risultata anche la produzione registrata nella tesi I_{50} ($59,6 \text{ t ha}^{-1}$); per contro, la carenza idrica, mostrata nella tesi I_0 ha compromesso significativamente le rese unitarie facendo registrare valori al di sotto del 50 e 75% nelle tesi I_{50} e I_{100} rispettivamente. Tra i genotipi, le più alte rese si sono registrate per le cultivar Sugargraze e PR 811 la cui biomassa fresca ha superato $70,0 \text{ t ha}^{-1}$, nella media dei regimi idrici, per contro la più bassa resa in biomassa fresca si è registrata, come era lecito attenderci nella cultivar a ciclo breve Hayday, registrando un valore pari a $34,7 \text{ kg ha}^{-1}$. Tuttavia, alcuni genotipi hanno risposto diversamente al regime idrico adottato. In modo particolare le cultivar Nicol, Maja e Hayday hanno mostrato una grande tolleranza per il limitato regime di irrigazione, mantenendo costante la loro resa finale di biomassa fresca in tutti e tre i regimi irrigui allo studio, mentre le cultivar Sugargraze e PR 811 hanno ben risposto all'irrigazione, aumentando più di tre volte la loro produttività in I_{50} rispetto alla I_0 .

Tabella 30: Resa in biomassa fresca del sorgo da biomassa in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test)

Cultivar	Biomassa fresca ($t\ ha^{-1}$)			media
	I ₁₀₀	I ₅₀	I ₀	
M81-E	82,3	96,6	26,5	68,4 ab
Topper76-6	80,8	51,3	22,7	51,6 ab
Dale	88,4	66,4	26,3	60,4 ab
Sugargraze	151,7	67,5	28,9	82,7 a
Nectar	84,1	72,4	23,3	59,9 ab
Padana 4	96,8	48,7	22,2	55,9 ab
Nicol	48,3	35,9	25,8	36,7 b
Sucro 506	95,7	73,7	39,4	69,6 ab
Bulldozer	86,3	60,4	29,2	58,6 ab
Silage King	67,8	63,2	19,4	50,1 ab
Maja	34,6	48,9	23,1	35,5 b
Padana 1	78,2	66,3	19,9	54,8 ab
Hayday	40,4	38,5	25,2	34,7 b
Jumbo	52,9	32,1	20,4	35,1 b
PR 849	50,5	34,0	21,5	35,3 b
PR 811	109,6	86,1	19,5	71,7 ab
PR 895	57,4	65,3	20,6	47,8 ab
H 133	83,7	68,7	29,6	60,6 ab
Sucro 405	62,7	57,0	21,1	46,9 ab
media	76,4 a	59,6 b	24,4 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	ns		

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

3.3.8 Produzione di biomassa secca epigea

La biomassa secca totale epigea alla raccolta è risultata, nella media dei trattamenti e dei genotipi, pari a $14,4\ t\ ha^{-1}$ variando significativamente tra i due fattori allo studio come riportato nella Tabella 31. Nelle migliori condizioni idriche (tesi I₁₀₀) è stata registrata la resa più elevata, pari a $44,9\ t\ ha^{-1}$ per la cultivar Sugargraze, per contro la cultivar che ha mostrato il valore più basso di resa è stata Hayday con $11,8\ t\ ha^{-1}$. Nella tesi che prevedeva l'irrigazione solo fino all'insediamento delle plantule (tesi I₀), è stata registrata la resa più elevata nella cultivar Sucro 506 pari a $9,5\ t\ ha^{-1}$; per contro la resa più bassa è stata osservata nella cultivar PR 895 ($3,7\ t\ ha^{-1}$); infine nella tesi che prevedeva il 50% di

restituzione dell'ETm, la resa più elevata 21,9 t ha⁻¹ è stata registrata per cultivar M81-E, mentre la resa più bassa, pari a 7,7 t ha⁻¹ appartiene alla cultivar Jumbo.

Tabella 31: Resa in biomassa secca del sorgo da biomassa in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test)

Cultivar	Biomassa secca (t ha⁻¹)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	22,8	21,9	5,7	16,8 ab
Topper76-6	22,5	13,5	5,5	13,8 ab
Dale	22,9	15,8	5,7	14,8 ab
Sugargraze	44,9	19,1	6,5	23,5 a
Nectar	17,8	19,2	5,9	14,3 ab
Padana 4	23,2	11,9	5,2	13,4 ab
Nicol	15,2	10,3	7,5	11,0 b
Sucro 506	24,3	19,2	9,5	17,7 ab
Bulldozer	22,4	19,4	7,1	16,3 ab
Silage King	22,8	19,4	5,8	16,0 ab
Maja	10,8	17,9	7,4	12,1 b
Padana 1	22,3	18,3	5,6	15,4 ab
Hayday	11,8	11,8	6,8	10,1 b
Jumbo	13,0	7,7	4,9	8,5 b
PR 849	12,3	9,9	6,5	9,5 b
PR 811	30,6	21,1	4,9	18,8 ab
PR 895	13,6	16,2	3,7	11,2 b
H 133	21,6	20,1	7,7	16,5 ab
Sucro 405	19,9	15,4	6,0	13,8 ab
Media	20,8 a	16,2 b	6,2 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	**		
	cv x tesi irrigua	ns		

******, ******* significativo per $p \leq 0,01$ e $0,001$, rispettivamente; **ns**: non significativo secondo S.N.K

La cultivar Hayday ha mostrato una grande tolleranza alla restrizione idrica, mantenendo costante la produzione finale nelle tre tesi irrigue; per contro le cultivar Sugargraze e PR 811 hanno risposto molto bene all'irrigazione incrementato più di due volte la loro resa in biomassa secca nella tesi I₅₀ rispetto alla tesi I₀. Nessuna interazione statisticamente significativa si è avuta tra i due fattori allo studio. La biomassa secca totale, nella media dei fattori allo studio, è risultata significativamente più elevata nella cultivar Sugargraze che ha fatto registrare valori pari a 23,5 t ha⁻¹, rispetto alla cultivar Jumbo che ha fatto registrare i valori più bassi pari a 8,5 t ha⁻¹.

3.3.9 Efficienza d'uso dell'acqua (WUE)

Al fine di stimare l'efficienza d'uso dell'acqua, è stato determinato il consumo idrico della coltura che ha tenuto conto dell'acqua di irrigazione e dell'acqua apportata naturalmente (piogge). Nel corso del ciclo colturale, il consumo idrico complessivo nelle tre tesi allo studio è risultato pari a 148, 300,5 e 453 mm rispettivamente per I₀, I₅₀ e I₁₀₀. L'efficienza d'uso dell'acqua è stata ottenuta dividendo la produzione aerea di sostanza secca per le quantità di acqua sopra riportate (Tabella. 32).

Tabella 32: Efficienza d'uso dell'acqua (WUE) dei genotipi di sorgo da biomassa posti allo studio in relazione alla biomassa secca. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	WUE (g l⁻¹)			
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	media
M81-E	5,2	7,6	6,7	6,5
Topper76-6	5,5	5,3	6,4	5,8
Dale	5,2	5,5	6,8	5,8
Sugargraze	9,9	6,4	7,6	8,0
Nectar	4,4	7,6	7,0	6,3
Padana 4	5,3	4,7	6,1	5,4
Nicol	3,7	3,6	8,8	5,4
Sucro 506	5,5	6,7	11,2	7,8
Bulldozer	5,1	6,7	7,0	6,3
Silage King	5,0	6,7	6,9	6,2
Maja	2,5	7,1	8,8	6,1
Padana 1	5,1	6,3	6,6	6,0
Hayday	2,9	4,6	8,0	5,2
Jumbo	3,0	3,0	5,8	3,9
PR 849	2,8	3,4	6,4	4,2
PR 811	7,5	8,3	5,7	7,2
PR 895	3,1	6,4	4,4	4,6
H 133	4,9	7,0	8,0	6,6
Sucro 405	4,5	6,1	7,1	5,9
media	4,8 c	5,9 b	7,1 a	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	*		
	cv x tesi irrigua	ns		

*, *** significativo per $p \leq 0,05$ e $0,001$, rispettivamente; ns: non significativo secondo S.N.K

L'efficienza d'uso dell'acqua ha fatto accertare, nella media dei fattori allo studio (genotipo e trattamento. irriguo), differenze significative da attribuire alle differenti capacità dei genotipi di valorizzare questo input. I valori più elevati si sono registrati nelle cultivar Sugargraze a ciclo tardivo, rispetto alla cultivar Jumbo (8,0 contro 3,9 g l⁻¹). Nella media dei tre trattamenti irrigui allo studio si è registrato un valore pari a 5,9 g l⁻¹.

3.3.10 Efficienza d'uso dell'acqua d' irrigazione (IWUE)

L'efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (irrigation water use efficiency), la quale rappresenta un indice economico dell'utilizzazione dell'acqua di irrigazione, è stata

calcolata come rapporto tra la produzione di sostanza secca ottenuta e l'acqua di irrigazione apportata ai diversi genotipi e rispetto ai volumi d'adacquamento apportati (Tabella 33).

Tabella 33: Efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE) dei genotipi di sorgo da biomassa in relazione alla biomassa secca. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	WUE (g l⁻¹)			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	6,6	11,4	14,2	10,7 ac
Topper76-6	6,5	7,0	13,7	9,1 ac
Dale	6,6	8,2	14,3	9,7 ac
Sugargraze	13,0	9,9	16,2	13,1 ac
Nectar	5,1	10,0	14,8	10,0 ac
Padana 4	6,7	6,2	13,0	8,6 ac
Nicol	4,4	5,4	18,6	9,5 ac
Sucro 506	7,0	10,0	23,8	13,6 ab
Bulldozer	6,5	10,1	17,7	11,4 ac
Silage King	6,6	10,1	14,6	10,4 ac
Maja	3,1	9,3	18,6	10,3 ac
Padana 1	6,5	9,5	14,1	10,0 ac
Hayday	3,4	6,1	17,1	8,9 ac
Jumbo	3,8	4,0	12,3	6,7 c
PR 849	3,6	5,1	16,2	8,3 ac
PR 811	8,9	11,0	12,2	10,7 ac
PR 895	4,0	8,4	9,3	7,2 bc
H 133	6,3	10,5	19,2	12,0 a
Sucro 405	5,8	8,0	15,1	9,6 ac
Media	6,0	8,4	15,5	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	**		
	cv x tesi irrigua	ns		

******, ******* significativo per $p \leq 0,01$ e $0,001$, rispettivamente; **ns**: non significativo secondo S.N.K

Nel corso del ciclo colturale, l'umidità apportata è risultata pari a 40, 192,5 e 345 mm rispettivamente per I₀, I₅₀ e I₁₀₀. Nella media dei fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo) il valore più elevato pari a 23,8 g l⁻¹ si è osservato nella cultivar Sucro 506 (tesi I₀), per contro i valori più bassi si sono osservati nelle cultivar Maja e Hayday (tesi I₁₀₀) pari a 3,1 e 3,4 g l⁻¹ rispettivamente.

3.3.11 Indice rifrattometrico (Brix°)

Alla raccolta, al fine di stimare il contenuto di zuccheri totali nel culmo dei genotipi allo studio, sono state prelevate tre piante campione rappresentative per ogni parcella. Lo stelo di ogni campione è stato diviso in tre sezioni di uguale lunghezza, poi, le sezioni sono stati tenuti in un congelatore a -20 °C fino al momento dell'analisi. Infine, la produzione di zucchero in termini °Brix, è stato determinato dalla media dei risultati del campionamento. La misura di carboidrati solubili nel succo è stata ottenuta mediante rifrattometro digitale portatile HANNA (HI 96811 Brix 0-50%). Nella media dei fattori allo studio la tesi che prevedeva la parziale restituzione dell'evapotraspirazione massima ($ET_m = 50$), si è significativamente distinta dalle altre due tesi, facendo registrare un valore pari a 17,0 °Brix (Tabella 34).

Tabella 34: Contenuto in zuccheri (°Brix) alla raccolta in relazione ai trattamenti allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Indice rifrattometrico			media
	I₁₀₀	I₅₀	I₀	
M81-E	21,8	21,0	11,4	18,1 b
Topper76-6	16,8	16,9	15,3	16,3 e
Dale	19,8	19,6	10,0	16,5 e
Sugargraze	22,2	21,3	15,8	19,8 a
Nectar	14,0	20,8	15,0	16,6 de
Padana 4	16,3	11,1	13,0	13,4 h
Nicol	13,9	17,5	13,3	14,9 f
Sucro 506	17,9	20,6	16,3	18,2 b
Bulldozer	16,0	16,3	13,0	15,1 f
Silage King	17,3	17,2	17,2	17,2 c
Maja	16,8	18,0	16,8	17,2 c
Padana 1	17,7	15,0	18,5	17,0 cd
Hayday	14,0	15,8	13,2	14,3 g
Jumbo	9,1	10,8	13,5	11,1 i
PR 849	15,6	16,6	18,2	16,8 ce
PR 811	17,7	16,9	11,1	15,2 f
PR 895	13,0	11,1	7,8	10,6 j
H 133	14,1	16,2	10,1	13,4 g
Sucro 405	21,2	20,5	16,6	19,4 a
media	16,6 b	17,0 a	10,9 c	
Significatività	cv	***		
	tesi irrigua	***		
	cv x tesi irrigua	***		

*** significativo per $p \leq 0,001$, secondo S.N.K

Inoltre si è avuta un'interazione significativa tra i fattori allo studio, dove i tipi zuccherini hanno mostrato come era logico attendersi più alti valori di °Brix rispetto ai tipi da fibra. In modo particolare, nella tesi che ha beneficiato del pieno soddisfacimento idrico (I₁₀₀) la cultivar Sugargraze ha fatto registrare il valore più alto seguita da M81-E con valori pari a 22,2 e 21,8 °Brix.

3.3.12 Discussione

I risultati di questa ricerca hanno confermato una buona capacità produttiva del sorgo da biomassa per energia in epoca anticipata nell' ambiente mediterraneo. Il ciclo colturale, sia per le varietà a ciclo lungo che per quelle a ciclo breve, è stato influenzato dalle tesi irrigue. La produzione di biomassa fresca nella media dei genotipi e dei trattamenti ($53,63 \text{ t ha}^{-1}$) è variata significativamente tra i due fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo). Nelle migliori condizioni di irrigazione (I_{100}) è stata registrata una resa pari a $76,4 \text{ t ha}^{-1}$, mentre nelle tesi 50% e 0% si sono registrati valori pari a $59,6$ e $24,4 \text{ t ha}^{-1}$ rispettivamente; mentre i valori di biomassa secca sono stati pari a $20,8$, $16,2$ e $6,2 \text{ t ha}^{-1}$ rispettivamente per le tesi 100%, 50% e 0%. La cultivar più produttiva si è dimostrata essere Sugargraze per la tesi I_{100} registrando un valore in biomassa fresca di $151,7 \text{ t ha}^{-1}$, seguita da PR 811 con $109,6 \text{ t ha}^{-1}$ e M81-E con $96,6 \text{ t ha}^{-1}$ per I_{100} ed I_{50} , rispettivamente. La tesi I_0 come era lecito attendersi ha fatto registrare valori più bassi rispetto alle altre due tesi irrigue, pur tuttavia si è distinta significativamente dalle altre due tesi irrigue, valorizzando la risorsa idrica apportata naturalmente con le piogge, facendo registrare un valore di WUE pari a $7,1 \text{ g l}^{-1}$, statisticamente significativo. La tecnica della *Partial rootzone drying* (PRD) che ha per messo di risparmiare circa il 35% di acqua rispetto alla tesi I_{100} la quale prevedeva una restituzione del 100% dell'ETm, ha determinato valori più elevati di WUE. Nella media dei genotipi, la tesi I_0 ha fatto registrare il valore più elevato ($7,1 \text{ g l}^{-1}$), sfruttando al massimo le piogge durante il ciclo colturale. La tesi I_0 ha confermato il valore più elevato ($15,5 \text{ g l}^{-1}$) anche nella IWUE (Irrigation water use efficiency). In conclusione questi risultati, in termini di sostanza fresca, sono soddisfacenti se si pensa ad un possibile impianto di biogas aziendale, in quanto le alte produzioni ottenute, sia con i diversi genotipi che con i diversi volumi irrigui, ed il contenuto di umidità alla raccolta (circa il 70%), ne fanno una sua idonea utilizzazione per andare incontro a digestione anaerobica. In conclusione possiamo affermare come l'ambiente mediterraneo si conferma adeguato alla coltivazione del sorgo da biomassa.

3.4. Linea di ricerca 4: Effetto dell'osmoprimum sulle caratteristiche germinative del seme di sorgo da biomassa a differenti temperature in condizioni controllate e in pieno campo in epoche di semina anticipate.

3.4.1 Effetti della temperatura sulla germinazione del seme

I risultati della percentuale di semi germinati in laboratorio alle diverse temperature sono riportati in Tabella 35. In condizioni termiche ottimali (25°C) la germinabilità finale dei semi UP ha superato il 93% in tutte le cultivar e in 'Jumbo' e 'PR811F' essa ha raggiunto il 99%. L'abbassamento della temperatura a 20° e 15°C non ha influenzato negativamente la germinazione dei semi, pari a 98.2 and 96.7%, rispettivamente, nella media delle cultivar. I semi esposti a 10°C sono germinati per oltre il 90% (media delle cultivar), ma a 8°C essa si è ridotta a 82.4%. Questi dati confermano la elevata tolleranza alle basse temperature delle cultivar selezionate per la prova. Sono emerse differenze genetiche relativamente alla germinabilità finale solo a 15°C. A questa temperatura, i semi di 'PSE24123' sono germinate significativamente meno di quelli delle restanti cultivar in esame. Le differenze di germinabilità dovute al precondizionamento dei semi sono state pronunciate ($p \leq 0.01$) solo alla temperatura più bassa (8°C), in corrispondenza della quale il trattamento al seme ha determinato un aumento della germinabilità del 14%. Infatti, l'osmoprimum non ha esercitato alcun effetto benefico sulla germinazione dei semi, in termini di percentuale di semi germinati, poiché a temperature superiori a 8°C la germinabilità è stata massima (o quasi) anche nei semi non trattati. La germinazione è progressivamente rallentata con l'abbassamento della temperatura da 25°C e i semi UP a 8°C hanno impiegato un MGT di 17 giorni per germinare (Tabella 36). In accordo con quanto riportato da Dunbabin *et al.* (1994), l'optimum termico per un basso MGT è più elevato dell'optimum termico per la germinazione. Infatti, a temperature comprese tra 8° e 15°C la germinazione dei semi ha superato l'80% nei semi UP, ma essa è progressivamente rallentata all'abbassarsi della temperatura dal quella ottimale (25°C). A differenza della germinabilità, sono emerse differenze significative per il MGT tra le cultivar esaminate, a tutte le temperature. I semi di 'PR811F' sono germinati più velocemente rispetto a quelli delle restanti cultivar. Il trattamento al seme si è rivelato efficace sul MGT a tutte le temperature. Allo scopo di meglio descrivere la efficacia dell'osmoprimum sulla germinabilità del seme, i dati percentuali di germinazione cumulata a tutte le temperature sono stati riportati in grafico su una scala comune di somme termiche (Figura 19. L'andamento della germinazione nel tempo, considerando i dati separatamente

all'interno di ciascun trattamento (UP e P), è stato più o meno adeguatamente rappresentato ($0.71 \leq R^2 \leq 98$) da un modello di regressione sigmoideale che descrive un comportamento comune alle diverse temperature (Tabella 37). L'osmopriming ha determinato un evidente abbassamento delle somme termiche necessarie per il raggiungimento del 50% di semi germinati (valori più bassi del coefficiente x_0 in P rispetto a UP) in tutte le cultivar, mentre la germinabilità massima (coefficiente a della curva) non si è modificato a seguito del trattamento al seme, dimostrando un effetto più marcato dell'osmopriming sul tasso di germinazione che sulla percentuale di semi germinati.

Tabella 35: Effetti della temperatura e del trattamento al seme sulla germinabilità del seme in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	Germinabilità (%)														
	8°C			10°C			15°C			20°C			25°C		
	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media
Padana 4	90,1	97,5	93,8	95,3	97,8	96,6	98,6	97,3	98,0 a	97,6	98,9	98,3	97,3	95,6	96,4
PR 811F	84,4	90,0	87,2	93,3	94,4	93,9	98,7	98,8	98,7 a	100,0	96,7	98,3	98,7	97,3	98,0
Jumbo	74,7	96,0	85,3	97,8	98,9	98,3	100,0	100,0	100,0 a	100,0	100,0	100,0	98,7	100,0	99,3
PSE 24213	80,6	91,1	85,8	85,4	89,3	87,4	89,3	91,8	90,5 b	95,1	98,7	96,9	93,3	95,6	94,5
Media	82,4 b	93,6 a		93,0	95,1		96,7	97,0		98,2	98,6		97,0	97,1	
Significatività cultivar (cv)	ns			ns			*			ns			ns		
tratt, seme (t)	***			ns			ns			ns			ns		
cv x t	ns			ns			ns			ns			ns		

*, ***significativo per ≤ 0.05 e 0.001 , rispettivamente; ns: non significativo. Lettere diverse, quando presenti, indicano differenze significative per ≤ 0.05 , secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

Tabella 36: Effetti della temperatura e del trattamento al seme sul tempo medio di germinazione (MGT) in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	MGT (giorni)														
	8°C			10°C			15°C			20°C			25°C		
	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media
Padana 4	15,5	8,3	11,9 c	11,6	6,9	9,3 a	5,0	2,1	3,5 b	2,4	1,6	2,0 b	2,0	1,1	1,5 b
PR 811F	14,7	5,8	10,2 d	7,2	4,0	5,6 b	3,5	2,1	2,8 c	2,5	1,3	1,9 b	1,9	1,0	1,4 b
Jumbo	22,3	13,3	17,8 a	7,3	4,5	5,9 b	4,1	2,7	3,4 b	2,5	1,5	2,0 b	1,8	1,1	1,5 b
PSE 24213	14,4	9,8	13,1 b	11,9	7,8	9,8 a	6,0	3,4	4,7 a	3,1	2,1	2,6 a	2,5	1,1	1,8 a
Media	17,2 a	9,3 b		9,5 a	5,8 b		4,6 a	2,6 b		2,6 a	1,6 b		2,1 a	1,1 b	
Significatività cultivar (cv)	***			***			***			***			**		
tratt, seme (t)	***			***			***			**			***		
cv x t	ns			ns			***			*			**		

*, **, *** significativo per ≤ 0.05 , 0.01 e 0.001, rispettivamente; ns: non significativo. Lettere diverse, quando presenti, indicano differenze significative per ≤ 0.05 , secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

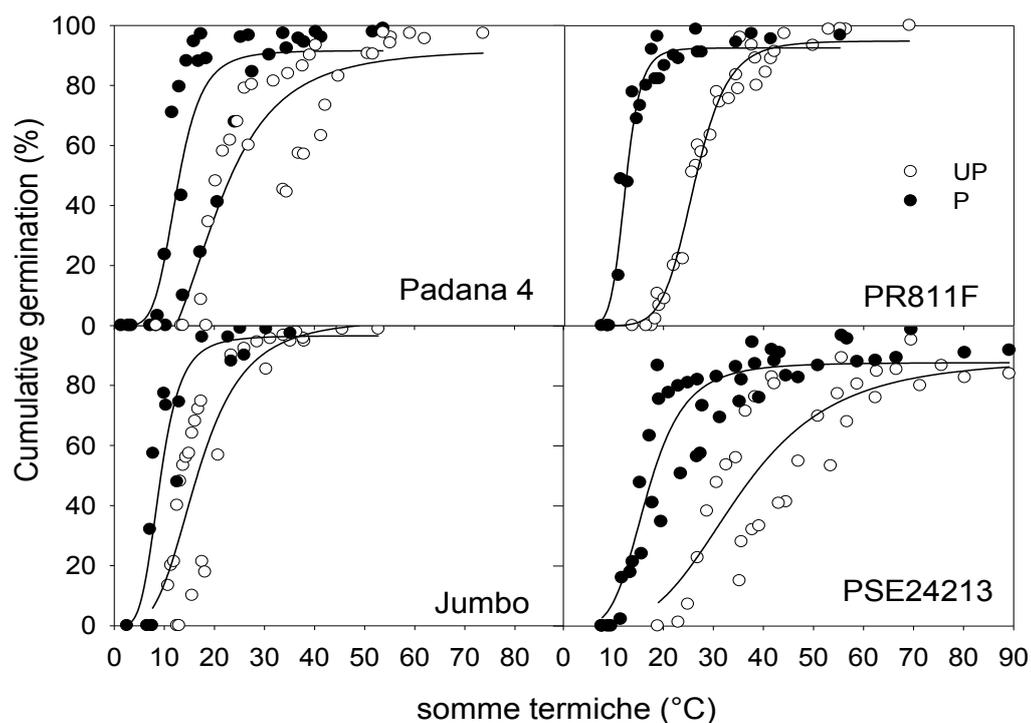


Figura 19: Percentuali cumulate dei valori di germinazione, riportati su una scala di somme termiche, in semi non trattati (UP) e semi osmocondizionati (P) di quattro cultivar di sorgo da fibra a 8°-25°C. I simboli rappresentano le percentuali osservate a ciascuna temperatura.

Tabella 37: Parametri dell'analisi di regressione dei valori di germinazione cumulata vs. θ_T (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	UP			P		
	A	x_0	R^2	a	x_0	R^2
Padana 4	109,1	20,4	0,79	91,6	12,6	0,75
PR811F	94,9	26,2	0,98	92,6	12,4	0,96
Jumbo	102,1	16,8	0,77	96,5	9,2	0,85
PSE24213	89,1	35,5	0,71	87,8	16,8	0,88

3.4.2 Effetti dell'epoca di semina sulla emergenza delle plantule

I risultati delle prove di epoca di semina sono riportati nelle tabelle 38, 39, 40 e 41. Con l'epoca più precoce, le temperature minime del terreno nel corso dei primi 10 giorni dalla semina, sebbene sub ottimali (16,0°C la massima, 10,3°C la minima, in media) non sono

mai scese al disotto di 10,2°C, consentendo una emergenza finale che ha raggiunto il 79,2% dopo 4 settimane (Tabella 38). Le basse temperature hanno tuttavia rallentato la germinazione del seme, determinando un MET di 17 giorni nei semi UP (Tabella 39). L'emergenza delle plantule ha avuto inizio 13 giorni dopo la semina. Con la seconda epoca di semina (fine Marzo) le temperature massime del terreno nei primi 10 giorni successivi alla semina si sono attestate al di sopra di 20°C ma quelle minime sono scese al disotto di 10°C, penalizzando in parte la germinazione dei semi UP (76,3% nella media delle cultivar). Infatti, sebbene i semi abbiano raggiunto le somme termiche per la germinazione in meno tempo (MET di 10,4 giorni) rispetto a quelli della prima semina, questi sono stati in parte inibiti da un breve periodo (3 giorni) di temperature minime piuttosto basse (7,3-7,8°C) che hanno influenzato negativamente la germinazione di semi. Con le semine di metà Aprile e inizi di Maggio, le temperature minime del terreno hanno sempre superato la soglia minima per la germinazione del sorgo, consentendo una regolare germinazione anche nei semi UP. In particolare, con la semina di Maggio, le plantule sono emerse dopo 4 giorni, e si è raggiunta una percentuale finale di plantule emerse pari a 82,7% (media delle cultivar) in UP, in condizioni termiche del terreno prossime a quelle ottimali, percentuale tuttavia del 15% più bassa rispetto alla germinabilità finale registrata in laboratorio a 25°C. L'osmoprimum ha migliorato la germinabilità dei semi anche in condizioni ambientali non controllate, sebbene in minor misura rispetto a quanto accertato in laboratorio in condizioni controllate. L'effetto benefico del trattamento sulla emergenza delle plantule è apparso significativo nelle condizioni termiche relativamente limitanti di Marzo (prima e seconda semina). In particolare, nella seconda epoca l'osmoprimum ha compensato l'effetto negativo delle basse temperature del terreno, determinando un incremento di plantule emerse del 13% in P rispetto a UP. L'osmoprimum ha poi aumentato la velocità di germinazione in campo in tutte le epoche di semina. L'osmoprimum ha anche ridotto le somme termiche necessarie per l'emergenza della prima plantula in campo, in tutte le cultivar (Tabella 40). Esso ha inoltre ridotto lievemente la variabilità accertata tra le epoche di semina (CV di circa 3% più basso in P rispetto a UP) per le somme termiche. Le basse temperature corrisposte alle semine precoci hanno comportato un rallentamento della crescita delle plantule (Tabella 41).

Tabella 38: Effetti dell'epoca di semina e del trattamento al seme sulla percentuale di plantule emerse in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	Emergenza (%)											
	1 ^a semina (10 Marzo)			2 ^a semina (28 Marzo)			3 ^a semina (15 Aprile)			4 ^a semina (2 Maggio)		
	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media
Padana 4	72,7	81,3	77,0 c	80,7	86,0	83,3 b	78,0	83,3	80,7 b	83,3	86,0	84,7 b
PR 811F	72,7	72,7	72,7 c	66,0	81,3	73,7 b	85,3	86,0	85,7 b	78,7	76,0	77,3 b
Jumbo	88,7	92,0	90,3 a	86,0	96,0	91,0 a	94,0	96,7	95,3 a	88,0	95,3	91,7 a
PSE 24213	82,7	88,0	85,3 b	72,7	80,7	76,7 b	78,0	82,7	80,3 b	80,7	79,3	80,0 b
Media	79,2 b	83,5 a		76,3 b	86,0 a		83,8	87,2		82,7	84,2	
Significatività cultivar (cv)	***			***			**			**		
tratt, seme (t)	*			**			ns			ns		
cv x t	ns			ns			ns			ns		

*, **, ***significativo per ≤ 0.05 , 0.01 e 0.001 , rispettivamente; ns: non significativo. Lettere diverse, quando presenti, indicano differenze significative per ≤ 0.05 , secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

Tabella 39: Effetti dell'epoca di semina e del trattamento al seme sul tempo medio di emergenza delle plantule emerse (MET) in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	MET (giorni)											
	1 ^a semina (10 Marzo)			2 ^a semina (28 Marzo)			3 ^a semina (15 Aprile)			4 ^a semina (2 Maggio)		
	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media
Padana 4	18,5	14,4	16,5 a	10,9	7,1	9,0	9,9	5,7	7,8	7,0	5,7	6,4 a
PR 811F	17,2	13,4	15,3 ab	10,1	7,6	8,8	9,3	6,9	8,1	7,3	5,3	6,3 a
Jumbo	16,4	13,3	14,8 b	10,3	7,2	8,7	9,9	6,3	8,1	6,2	5,6	5,9 b
PSE 24213	15,7	13,2	14,5 b	10,5	7,1	8,8	9,6	5,6	7,6	7,2	5,1	6,2 ab
Media	17,0 a	13,6 b		10,4 a	7,2 b		9,7 a	6,1 b		6,9 a	5,5 b	
Significatività cultivar (cv)	*			ns			ns			*		
tratt, seme (t)	***			***			***			***		
cv x t	ns			ns			ns			***		

*, ***significativo per ≤ 0.05 e 0.001 , rispettivamente; ns: non significativo. Lettere diverse, quando presenti, indicano differenze significative per ≤ 0.05 , secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

Tabella 40: Effetti del trattamento al seme sulla somma termica (θ_T) (media delle epoche di semina) calcolate sino alla comparsa della prima plantula, in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati).

Cultivar	θ_T ($^{\circ}\text{Cd}\pm\sigma$)	
	UP	P
Padana 4	74,2 \pm 9,7	52,1 \pm 5,4
PR 811F	77,2 \pm 11,1	54,2 \pm 6,3
Jumbo	67,3 \pm 6,8	47,4 \pm 3,3
PSE 24213	77,9 \pm 11,4	54,7 \pm 6,5

Tabella 41: Effetti dell'epoca di semina e del trattamento al seme sul peso secco delle plantule in quattro cultivar di sorgo da fibra (UP= semi non trattati; P= semi osmocondizionati)

Cultivar	Peso secco plantula (mg)											
	1 ^a semina (10 Marzo)			2 ^a semina (28 Marzo)			3 ^a semina (15 Aprile)			4 ^a semina (2 Maggio)		
	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media	UP	P	media
Padana 4	9,5	10,3	9,9	25,9	31,1	28,5 a	29,8	33,3	31,5	52,5	56,5	54,5 b
PR 811F	9,7	12,6	11,1	25,0	28,3	26,6 a	32,7	35,2	34,0	55,9	58,6	57,3 ab
Jumbo	8,6	10,3	9,5	21,0	23,4	22,2 b	30,3	33,4	31,9	47,7	49,4	48,6 c
PSE 24213	8,8	11,3	10,1	26,9	30,6	28,8 a	31,2	39,4	35,3	56,6	66,5	61,6 a
Media	9,2 b	11,1a		24,7 b	28,4 a		31,0 b	35,3 a		53,2 b	57,8 a	
Significatività cultivar (cv)	ns			***			ns			***		
tratt, seme (t)	***			***			**			**		
cv x t	ns			ns			ns			ns		

, *significativo per ≤ 0.01 e 0.001 , rispettivamente; ns: non significativo. Lettere diverse, quando presenti, indicano differenze significative per ≤ 0.05 , secondo il test di Student-Newman-Keuls (SNK).

3.4.3 Discussione

Nelle prove effettuate in laboratorio il trattamento dell'osmopriming ha determinato un evidente abbassamento delle somme termiche necessarie per il raggiungimento del 50% di semi germinati (valori più bassi del coefficiente x_0 in P rispetto a UP) in tutte le cultivar, mentre la germinabilità massima (coefficiente a della curva) non si è modificata a seguito del trattamento al seme, dimostrando un effetto più marcato dell'osmopriming sul tasso di germinazione che sulla percentuale di semi germinati. Diversamente dai risultati di laboratorio, le differenze tra le cultivar per l'emergenza delle plantule sono risultate sempre significative. Tali differenze potrebbero essere ascrivibili ad un più ridotto vigore del seme osservato in alcune cultivar in condizioni ambientali non controllate (es. 'PR811F'), in particolar modo nelle semine anticipate, che ha determinato una germinazione e dunque un numero di plantule emerse più contenuta rispetto a quanto accertato in laboratorio. Tra le cultivar è emersa 'Jumbo', caratterizzata da un più basso θ_T , e da una percentuale di plantule emerse (>85% in UP e >90% in P) più elevata in corrispondenza di tutte le epoche di semina. L'osmopriming ha determinato un significativo incremento del peso delle piantine in tutte le cultivar ed epoche di semina (interazione $cv \times t$ non significativa). La cultivar 'Jumbo', sebbene caratterizzata da una più alta emergenza in campo, ha prodotto piantine più piccole in tutte le epoche. L'emergenza e la crescita delle piantine di sorgo in condizioni termiche sub ottimali sembra siano sotto un diverso controllo genetico (Yu *et al.*, 2004), dimostrando come sia possibile combinare caratteri diversi nei programmi di miglioramento genetico per la tolleranza al freddo nel sorgo.

3.5. Linea di ricerca 5: Effetto della densità di semina sulla crescita e sulla produzione di zuccheri totali in genotipi di sorgo da biomassa per energia in ambiente continentale nell'Est del Canada

3.5.1 Andamento meteorologico

Nel corso del ciclo colturale (maggio-settembre) i valori della temperatura massima dell'aria hanno oscillato tra 28,7 °C (Luglio), 22,8 °C (Settembre) mentre quelli della temperatura minima tra 8,7 (Maggio) e 15,5 °C, (Luglio). Il mese più caldo è stato, come tipico dell'ambiente continentale il mese di Luglio (Figura 20). Durante l'intero ciclo colturale si sono registrate una media di 24,3 e 12,3 °C di temperatura massima e minima rispettivamente. Piogge intense si sono verificate nel mese di Agosto dove nel complesso la pioggia caduta è stata di 95,9 mm. Le piogge cadute sono

stata abbondanti durante tutto il ciclo colturale, tanto da fare registrare un valore medio mensile di 53,4 mm.

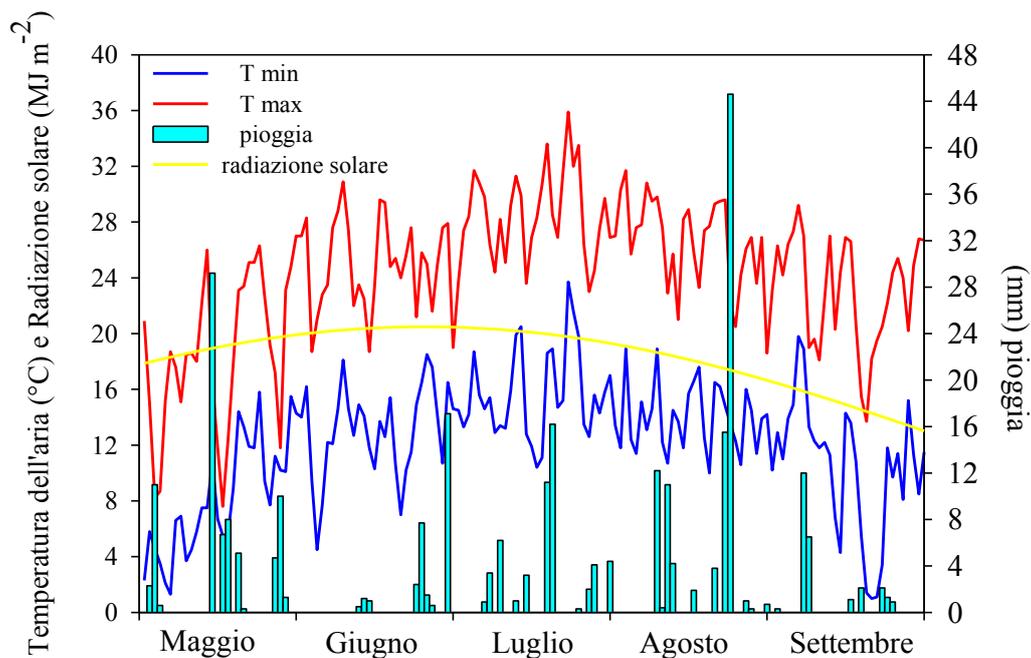


Figura 20: Andamento termopluviometrico durante la stagione colturale nel 2011

3.5.2 Ciclo biologico

L'epoca di semina ha modificato significativamente la durata degli stadi fenologici. Indipendentemente dall'investimento unitario, differenze significative sono state riscontrate anche in relazione al genotipo. Le semine effettuate nel mese di maggio hanno consentito di raggiungere la fase di maturazione lattea solo nella cultivar CSSH45 (Figura 21). L'emergenza per i genotipi allo studio è stata registrata, in media dopo 6, 9 e 12 giorni dopo la semina (GDS), nella cultivar Bulldozer, CSSH45 e Sugargraze, rispettivamente. La lunghezza della stagione di crescita nei tre genotipi allo studio è variata notevolmente, riscontrando differenze significative tra i genotipi allo studio. La cultivar più precoce è risultata CSSH45, raggiungendo la fioritura in 93 giorni dalla semina, per contro la cultivar più tardiva (106 giorni) è risultata Bulldozer. le avverse condizioni climatiche, sopraggiunte durante il ciclo colturale hanno determinato uno spostamento della fase fenologica e le piante non hanno raggiunto fase di maturazione fisiologica, (Vanderlip R.L., e Reeves H.S. 1972), pertanto, la coltura è stata raccolta quando le piante erano ancora in fase di fioritura, (solo la cultivar CSSH45 ha raggiunto la fase di maturazione lattea).

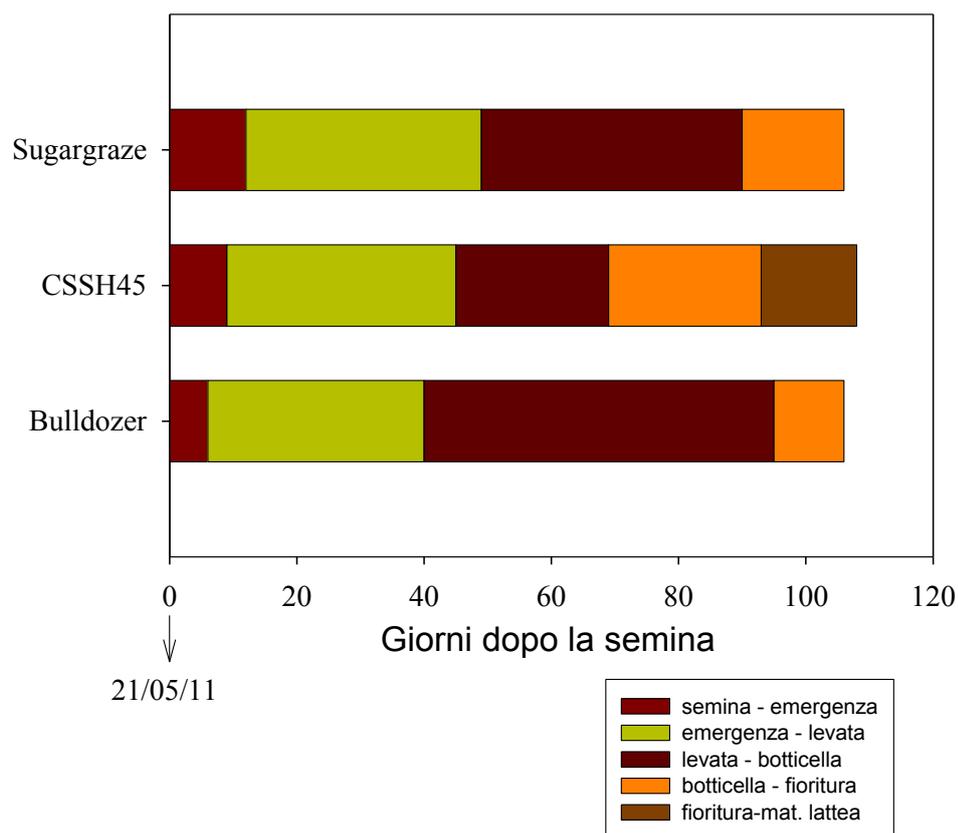


Figura 21: Andamento del ciclo biologico in funzione delle cultivar allo studio

3.5.3 Altezza della pianta

L'effetto più marcato è statisticamente significativo è risultato in questo caso, solo quello del genotipo. Alla raccolta la tesi che prevedeva una maggiore densità di semina ($I_{40}=40$ piante/m²) nella media dei genotipi ha fatto registrare il valore più elevato pari 218,06 cm (Tabella 42); per contro il valore più basso è stato registrato per la tesi che prevedeva la più bassa densità di semina ($I_{10}=10$ piante/m²) pari a 187,9. Anche in questo caso l'effetto genotipo è apparso preponderante rispetto alla densità di semina. Tra i genotipi allo studio la cv. Bulldozer si è distinta statisticamente facendo registrare il valore più alto pari a 246,17 cm. Nelle densità d'impianto minori le piante si sono sviluppate meno in altezza.

Tabella 42: Altezza (cm) della pianta in relazione alle densità di semina allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Altezza (cm)				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	245,67	222,58	258,83	257,58	246,17 a
CSSH45	157,92	176,75	173,50	179,17	171,83 b
Sugargraze	162,08	170,17	177,50	204,58	178,58 b
Media	188,56	189,83	203,28	213,78	
Significatività	cv			***	
	investimento unitario			ns	
	cv x invest. unitario			ns	

*** significativo per $p \leq 0,001$, rispettivamente; ns: non significativo secondo S.N.K

3.5.4 Diametro basale, mediano e apicale del culmo

Il diametro basale dei culmi alla raccolta è variato significativamente in rapporto ai genotipi ma non all'investimento unitario. Il diametro basale dei culmi nella media degli investimenti ha registrato valori pari a 20,17, 20,11 e 13,22 mm, in Sugargraze, Bulldozer e CSSH45, rispettivamente (Tabella 43-45), mentre i valori del diametro apicale sono risultati pari a 12,86, 12,10 e 6,42 mm in Bulldozer, Sugargraze e CSSH45, rispettivamente con un *range* compreso tra 8,36 e 11,38 mm; il diametro mediano nella media dei fattori allo studio ha registrato un valore di 14,79 mm nella tesi I40. Tra i genotipi la Bulldozer nella media degli investimenti allo studio ha registrato il valore più alto (16,77 mm).

Tabella 43: Misura del diametro basale sul culmo principale alla raccolta in relazione alle densità di semina allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Diametro basale (mm)				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	19,73	20,84	20,23	19,64	20,11 a
CSSH45	11,93	15,17	14,13	11,65	13,22 b
Sugargraze	18,11	19,10	21,43	22,06	20,17 a
Media	16,59	18,37	18,59	17,78	
Significatività	cv			***	
	investimento unitario			ns	
	cv x invest. unitario			ns	

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

Tabella 44: Misura del diametro apicale sul culmo principale alla raccolta in relazione alle densità di semina allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Diametro apicale (mm)				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	12,64	12,55	12,12	14,14	12,86 a
CSSH45	5,81	7,92	6,41	5,54	6,42 b
Sugargraze	11,59	12,34	10,83	13,62	12,10 a
Media	8,36	11,52	10,58	11,38	
Significatività	cv			***	
	investimento unitario			ns	
	cv x invest. unitario			ns	

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

Tabella 45: Misura del diametro mediano sul culmo principale alla raccolta in relazione alle densità di semina allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	Diametro mediano (mm)				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	16,39	16,77	15,97	17,95	16,77 a
CSSH45	8,71	12,47	10,24	9,37	10,20 b
Sugargraze	14,42	14,89	15,13	17,04	15,37 a
Media	13,17	14,71	13,78	14,79	
Significatività	cv			***	
	investimento unitario			ns	
	cv x invest. unitario			ns	

*** significativo per $p \leq 0,001$; ns: non significativo secondo S.N.K

3.5.5 Numero di foglie verdi

Il numero di foglie verdi alla raccolta è significativamente variato in rapporto al genotipo (Tabella 46). Tra i genotipi si sono statisticamente distinti la cv. Bulldozer che ha fatto registrare i valori più elevati del numero di foglie verdi ($\geq 11,7$). Per contro il valore più ridotto è corrisposto alla cv. CSSH45 ($\leq 9,5$). Nella media delle densità di semina allo studio, la tesi (I30=30 piante/m²) si è statisticamente distinta rispetto alle tesi I10, I20 e I40 facendo registrando un numero di foglie pari a 11,5.

Tabella 46: Numero di foglie totali alla raccolta sul culmo principale, nei genotipi allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	n° foglie				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	11,75	11,00	10,83	12,08	11,42 a
CSSH45	9,83	8,92	9,75	9,58	9,52 b
Sugargraze	10,08	8,83	9,25	9,92	9,52 b
Media	9,69	9,64	11,53	11,19	
Significatività	cv			*	
	investimento unitario			ns	
	cv x invest. unitario			ns	

*, significativo per $p \leq 0,05$; ns: non significativo secondo S.N.K

3.5.6 Indice dell'area fogliare (LAI)

Alla raccolta dai dati ottenuti della superficie fogliare è stato calcolato l'indice dell'area fogliare (Leaf Area Index LAI), rapportando la superficie fogliare sull'unità di superficie del terreno. Nella media dei fattori allo studio (genotipo e investimento unitario), il LAI ha registrato il valore più alto nella cv. Bulldozer pari 2,30 seguito da Sugargraze e CSSH45 con 2,25 e 2,07, rispettivamente (Tabella 47). L'indice dell'area fogliare è aumentato all'aumentare dell'investimento unitario, confermando l'incremento di biomassa prodotta alla raccolta dai genotipi oggetto di studio.

Tabella 47: Andamento dell'area fogliare (LAI) in relazione ai fattori allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Cultivar	LAI				Media
	I10	I20	I30	I40	
Bulldozer	2,33	2,03	2,35	2,51	2,30
CSSH45	1,91	2,04	2,13	2,22	2,07
Sugargraze	1,71	2,28	2,46	2,56	2,25
Media	1,98 b	2,11 ab	2,31 ab	2,43 a	
Significatività	cv			ns	
	investimento unitario			*	
	cv x invest. unitario			ns	

*, significativo per $p \leq 0,05$; ns: non significativo secondo S.N.K.

3.5.7 Produzione di biomassa fresca epigea

Alla raccolta i risultati riguardanti la resa totale in biomassa fresca hanno mostrato variazioni di rilievo rispetto alla densità d'impianto. Nella media dei fattori allo studio (genotipo e investimento unitario) la biomassa fresca epigea, è stata pari a $42,53 \text{ t ha}^{-1}$. Essa è aumentata con l'aumentare della densità di semina adottata (Tabella 48). Nella media delle densità di semina la cultivar Bulldozer si è distinta significativamente ($54,43 \text{ t ha}^{-1}$) dalle altre due cultivar allo studio, $47,72$ e $25,44 \text{ t ha}^{-1}$ in Sugargraze e CSSH45, rispettivamente. La densità di semina che meglio si è distinta, è risultata essere quella che prevedeva un investimento unitario pari a 30 piante m^{-2} , facendo registrare una produzione pari a $48,66 \text{ t ha}^{-1}$, tuttavia non si sono verificate differenze significative nelle tesi I10 e I20 le quali hanno fatto registrare valori simili di biomassa fresca alla raccolta pari a $36,86$ e $36,58 \text{ t ha}^{-1}$ rispettivamente.

Tabella 48: Resa in biomassa fresca del sorgo zuccherino in relazione ai fattori allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Biomassa fresca (t ha⁻¹)					
Cultivar	I10	I20	I30	I40	Media
Bulldozer	48,62	44,75	71,96	52,40	54,43 a
CSSH45	20,22	27,32	25,99	28,22	25,44 b
Sugargraze	41,75	37,69	48,04	63,41	47,72 a
Media	36,86	36,58	48,66	48,03	
Significatività	cv			***	
	investimento unitario			*	
	cv x invest. unitario			ns	

*,*** significativo per $p \leq 0,05$ e $0,001$, rispettivamente; ns: non significativo secondo S.N.K

3.5.8 Produzione di biomassa secca epigea

La densità di semina, nella media dei genotipi, ha influenzato positivamente la resa in biomassa secca. I valori più elevati si sono registrati nell'investimento unitario I30 e I40 che prevedevano 30 e 40 piante/m², rispettivamente (Tabella 49), facendo registrare valori pari a 11,11 e 11,28 t ha⁻¹, rispettivamente. La cultivar Bulldozer nella media delle densità di semina, si è significativamente distinta facendo registrare il valore più alto pari a 10,77 t ha⁻¹.

Tabella 49: Resa in biomassa secca del sorgo zuccherino in relazione ai fattori allo studio. Lettere diverse indicano differenze significative per $p \leq 0,05$ (SNK test).

Biomassa secca (t ha⁻¹)					
Cultivar	I10	I20	I30	I40	Media
Bulldozer	8,83	7,72	15,89	10,64	10,77 a
CSSH45	5,20	7,99	7,78	8,33	7,35 b
Sugargraze	8,69	7,00	9,54	14,86	10,02 ab
Media	7,57	7,57	11,11	11,28	
Significatività	cv			*	
	investimento unitario			*	
	cv x invest. unitario			ns	

*, significativo per $p \leq 0,05$; ns, non significativo secondo S.N.K

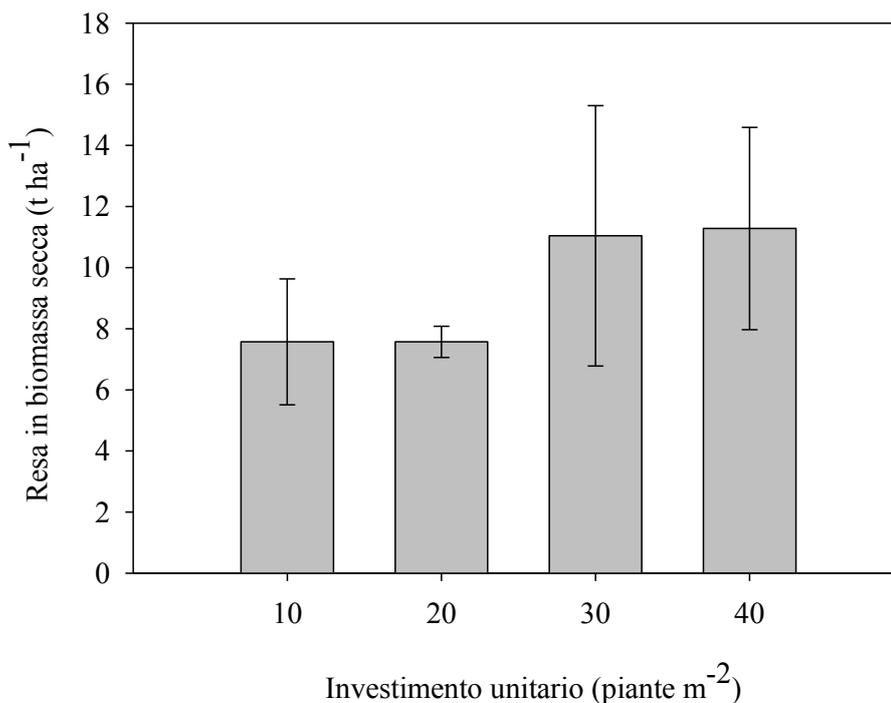


Figura 22: Resa in biomassa secca in relazione all'investimento unitario (media delle cultivar)

3.5.9 Indice rifrattometrico (°Brix)

Durante le principali fasi del ciclo biologico della coltura, biologico (levata, botticella e fioritura), in un campione rappresentativo di tre piante per parcella elementare, si è provveduto alla valutazione del contenuto zuccherino del succo dei culmi principali ed è stato valutato attraverso la rilevazione dell'indice rifrattometrico in tre momenti successivi del ciclo biologico utilizzando il protocollo di estrazione precedentemente discusso alla Linea di ricerca 3. I fattori allo studio (genotipo e investimento unitario), hanno influenzato significativamente il contenuto zuccherino (Figura 22). Le fasi fenologiche della coltura sembrano influire sensibilmente sul contenuto zuccherino dei genotipi allo studio, in modo particolare la cultivar Sugargraze, si è distinta dalle altre, incrementando più del doppio l'indice rifrattometrico in tutte e quattro le densità di semina allo studio, passando da 6,5 della I10 (10 piante/m²) a 22,3 °Brix registrati nella tesi I40 (40 piante/m²); per contro la cultivar Bulldozer non ha evidenziato incrementi significativi durante il ciclo biologico, confermando tuttavia valori di °Brix elevati alla raccolta (11,1 °Brix), nella tesi che prevedeva il maggior investimento unitario (I40 = 40 piante/m²). I fattori allo studio (genotipo e investimento unitario) hanno modificato significativamente il contenuto di zuccheri durante il ciclo colturale della pianta. Indipendentemente dall'investimento unitario, il contenuto più elevato si è registrato nelle cultivar Sugargraze e CSSH45, con 19,6 e 16,1 °Brix, rispettivamente.

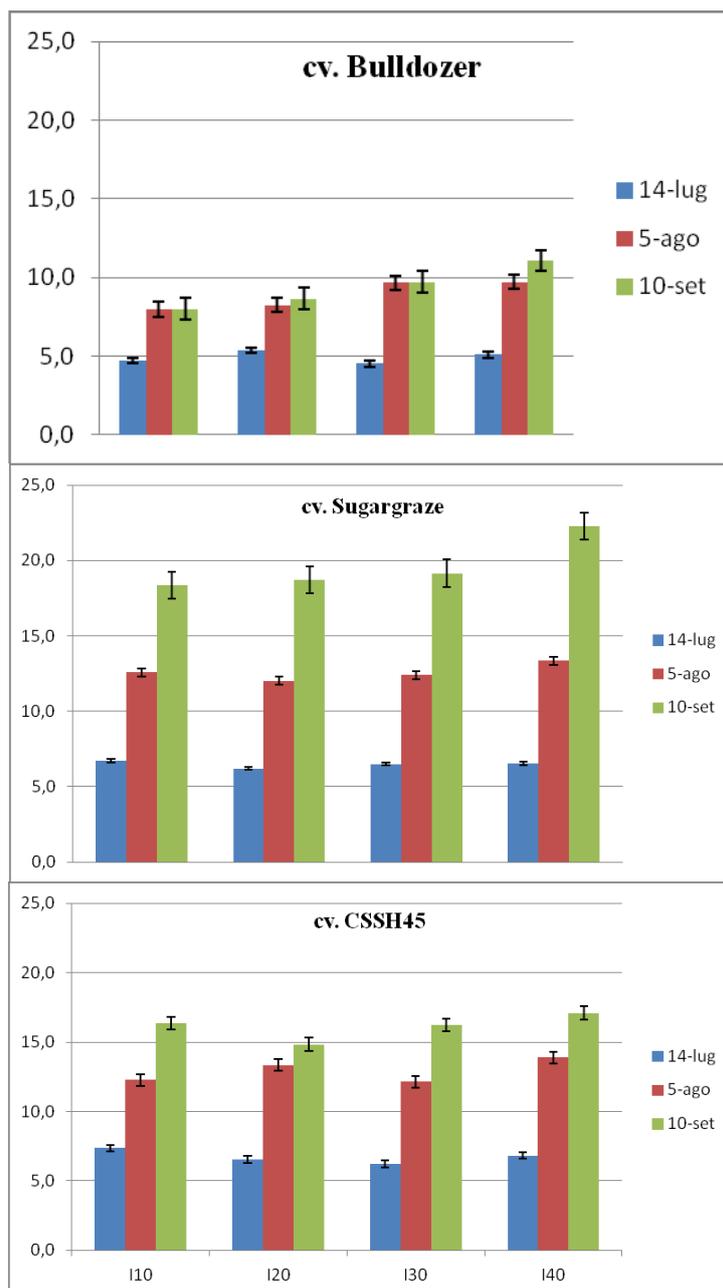


Figura 23: Contenuto zuccherino negli stocchi nelle tre cv. allo studio, a tre diverse date del ciclo biologico in relazione all'investimento unitario ($p\ m^{-2}$)

3.5.10 Discussione

Questa ricerca ha confermato la scarsa potenzialità produttiva del sorgo da biomassa allorchè coltivato in ambiente a clima rigido quale quello canadese, specie quando messa a confronto con quella accertata in ambiente caldo-arido quale quello del Meridione d'Italia. Alle basse rese

ottenute ha tuttavia contribuito anche il verificarsi di un evento meteorico di rilevante intensità quale può considerarsi una tempesta di origine tropicale, che per effetto di venti e piogge particolarmente violenti ha determinato un considerevole allettamento delle piante appena pochi giorni prima della raccolta.

Tuttavia, è stato dimostrato come l'aumento della densità di impianto della coltura di sorgo in ambiente a clima continentale può in parte compensare per le minori rese in biomassa secca ottenute in questo ambiente, sebbene i livelli produttivi accertati in corrispondenza degli investimenti più elevati (30 e 40 piante m⁻²) non raggiungano mai quelli ottenuti in ambienti più favorevoli dal punto di vista climatico, e densità di semina più elevate comportino comunque spese di impianto maggiorate. Le differenze produttive accertate tra le cultivar ai diversi investimenti indicano come sia possibile discriminare tra queste e indirizzare la scelta varietale verso le cultivar con le quali sia possibile garantire rese soddisfacenti anche alle densità comunemente suggerite per la coltura di sorgo. Poiché sono emerse differenze significative sia tra le cultivar che tra gli investimenti unitari anche nel contenuto di zucchero del culmo, questo carattere è da attenzionare allorchè si procede con la scelta della varietà e della relativa densità di semina.

4. RELAZIONI TRA RADIAZIONE INTERCETTATA E PRODUZIONE DI BIOMASSA

E' stata valutata la relazione tra la radiazione intercettata e la produzione di biomassa secca del sorgo zuccherino nei due ambienti dove sono state condotte le prove (Catania e Kemptville), che si trovano in condizioni molto diverse di condizioni di radiazione solare. Questo calcolo è stato condotto per le due varietà comuni ai due ambienti: Sugargraze e Bulldozer. La radiazione intercettata è stata calcolata utilizzando la seguente relazione:

$$\sum_{i=1}^n PAR_i * (1 - e^{-k*LAI_i})$$

dove:

PAR = radiazione globale espressa in MJ m⁻²;

k = coefficiente di estinzione per la radiazione solare pari, in questo caso, a 0,65 (Ripa, 1992);

LAI_i = indice dell'area fogliare (leaf area index);

n = intervallo di tempo tra l'emergenza e la raccolta.

Nelle figure 24 e 25 sono riportate le radiazioni solari globali nelle due località durante il periodo di prova, il 2010 a Catania ed il 2011 a Kemptville. E' possibile notare come la radiazione solare a Catania è, come lecito attendersi, più elevata a Catania che a Kemptville. I valori di quest'ultima località infatti risultano a Giugno pari a 2/3 di quella registrata a Catania. Ciò ha comportato una quantità di radiazione intercettata pari a circa 1100 MJ m⁻² nella località canadese contro 2500 MJ m⁻² nella località siciliana. La quota di radiazione intercettata è risultata più elevata nella varietà Sugargraze rispetto alla varietà Bulldozer. Le cultivar allo studio hanno intercettato, durante il ciclo colturale quantità di radiazione solare globale differenziata in funzione della durata del ciclo biologico. Pertanto la quantità di radiazione intercettata è apparsa strettamente correlata alla durata del ciclo biologico. Nelle cultivar Sugargraze e Bulldozer coltivate in ambiente mediterraneo sono stati cumulati rispettivamente circa 2500 e 1700 MJ m⁻², mentre in ambiente continentale sono stati cumulati per entrambi circa 1100 MJ m⁻². Questi valori sono stati messi in relazione alla produzione di biomassa totale (Figura 26). La relazione tra la radiazione intercettata e a produzione di biomassa secca totale è risultata interpolata da una regressione lineare (y = a + bx). Il coefficiente b di questa equazione rappresenta l'efficienza d'uso della radiazione solare (RUE) ed è espressa in g di sostanza secca per MJ di radiazione intercettata.

La relazione è risultata positiva ed altamente significativa ($R^2 = 0,96$). Il coefficiente biologico di trasformazione della RUE, espresso in grammi di sostanza secca per MJ di radiazione globale intercettata, indice dell'efficienza fotosintetica è risultata pari a $1,6 \text{ g MJ}^{-1}$, un valore elevato giustificato dal fatto che il sorgo zuccherino ha un ciclo foto sintetico di tipo C4.

Le cultivar allo studio hanno intercettato, durante il ciclo colturale quantità di radiazione solare globale differenziata in funzione della durata del ciclo biologico. Pertanto la quantità di radiazione intercettata è apparsa strettamente correlata alla durata del ciclo biologico. Nelle cultivar Sugargraze e Bulldozer coltivate in ambiente mediterraneo sono stati cumulati circa 2400 MJ m^{-2} , mentre in ambiente continentale circa 1100 MJ m^{-2} , con una relazione positiva altamente significativa con la durata del ciclo ($R^2 = 0,96$). Il coefficiente biologico di trasformazione della RUE, espresso in grammi di sostanza secca per MJ di radiazione globale intercettata, indice dell'efficienza foto sintetica è risultata nella media delle cultivar e delle località allo studio pari a $1,6 \text{ g MJ}^{-1}$.

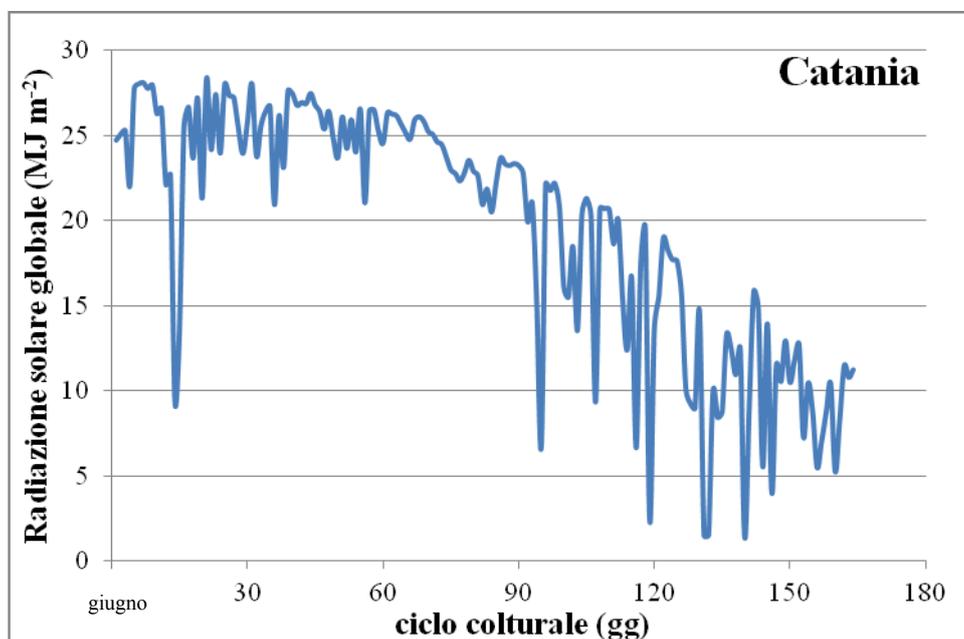


Figura 24: Radiazione solare globale registrata durante il ciclo colturale

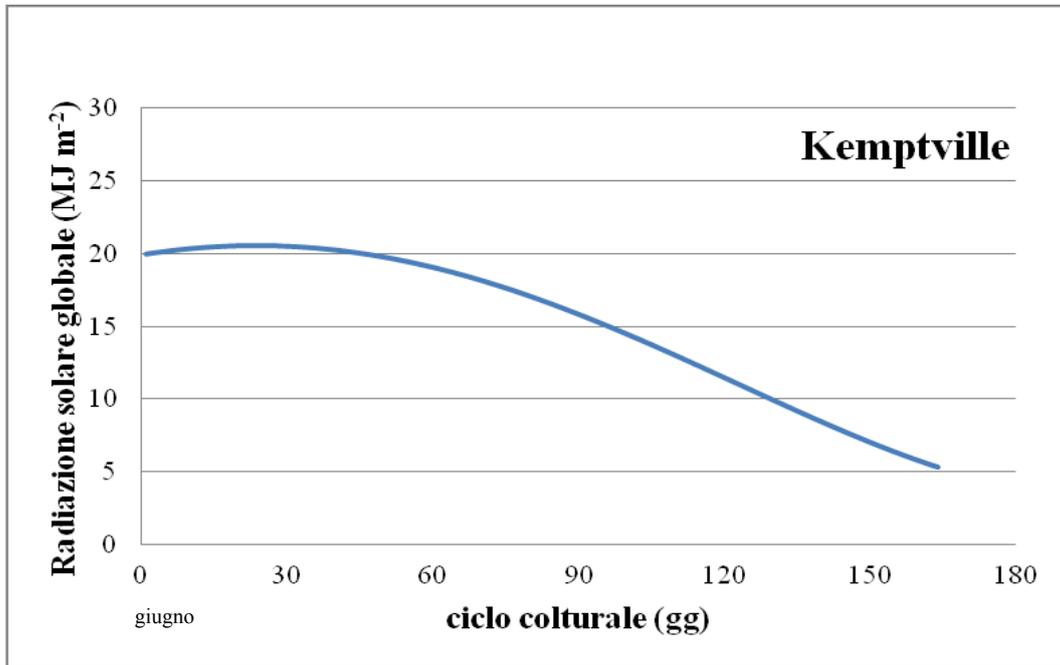


Figura 25: Radiazione solare globale registrata durante il ciclo colturale

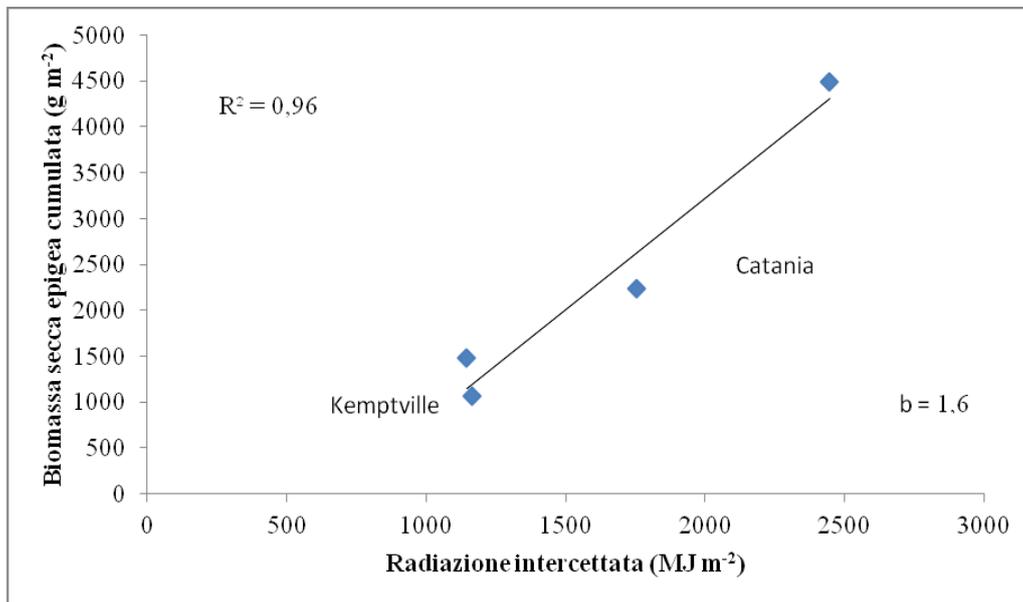


Figura 26: Relazione tra la radiazione solare intercettata e biomassa secca epigea accumulata.

5. CONCLUSIONI

I risultati della linea di ricerca 1 hanno evidenziato una discreta capacità produttiva del sorgo, sia da fibra che zuccherino, come coltura da biomassa per energia seminata in epoca ritardata nell'ambiente mediterraneo. I regimi irrigui allo studio hanno influenzato in maniera significativa la produzione di biomassa epigea. La semina ritardata (Luglio) ed il repentino calo delle temperature avvenuto nella stagione autunnale, prima della fase di raccolta, non hanno consentito alla coltura il raggiungimento della completa maturazione fisiologica bloccando il ciclo alla maturazione lattea. Le rese in biomassa secca oscillavano nella media dei genotipi, tra 13,7 t ha⁻¹ della tesi I₁₀₀ e 8,6 t ha⁻¹ registrati nella tesi I₀. Per contro la tesi I₅₀ PRD, ha fatto registrare una resa di 12,0 t ha⁻¹, confermando la validità di questa tecnica nel risparmiare la risorsa idrica senza penalizzare significativamente le rese finali di sostanza secca. L'efficienza d'uso dell'acqua di irrigazione (IWUE = irrigation water use efficiency), è migliorata con la tecnica irrigua PRD rispetto alla tesi I₁₀₀ mostrando un certo grado di validità di questa tecnica ai fini del risparmio idrico. I risultati della linea di ricerca 2, hanno evidenziato differenze significative per la resistenza al freddo riscontrate in tipi di sorgo da fibra e da zucchero in laboratorio a temperatura controllata. In particolare, criteri per la selezione sono una bassa soglia termica e somme termiche ridotte (come osservato nelle cultivar PR 811F e PR 849, entrambe da fibra) che, se associate, possono assicurare un adeguato insediamento della coltura allorchè vengono adottate semine anticipate in ambiente Mediterraneo. I risultati della linea di ricerca 3, hanno confermato una buona capacità produttiva del sorgo da biomassa per energia in epoca anticipata nell' ambiente mediterraneo. Il ciclo colturale, sia per le varietà a ciclo lungo che per quelle a ciclo breve, è stato influenzato dalle tesi irrigue. La produzione di biomassa fresca nella media dei genotipi e dei trattamenti (53,63 t ha⁻¹) è variata significativamente tra i due fattori allo studio (genotipo e trattamento irriguo). Nelle migliori condizioni di irrigazione (I₁₀₀) è stata registrata una resa pari a 76,4 t ha⁻¹, mentre nelle tesi 50% e 0% si sono registrati valori pari a 59,6 e 24,4 t ha⁻¹ rispettivamente; mentre i valori di biomassa secca sono stati pari a 20,8, 16,2 e 6,2 t ha⁻¹ rispettivamente per le tesi 100%, 50% e 0%. La cultivar più produttiva si è dimostrata essere Sugargraze per la tesi I₁₀₀ con una produzione di biomassa fresca di 151,7 t ha⁻¹, seguita da PR 811 con 109,6 t ha⁻¹ e M81-E con 96,6 t ha⁻¹ per I₁₀₀. La tecnica della *Partial rootzone drying* (PRD) che ha per messo di risparmiare circa il 35% di acqua rispetto alla tesi I₁₀₀ la quale prevedeva una restituzione del 100% dell'ET_m, ha determinato valori più

elevati di WUE. Questi risultati, in termini di sostanza fresca, sono soddisfacenti se si pensa ad un possibile impianto di biogas aziendale, in quanto le alte produzioni ottenute, sia con i diversi genotipi che con i diversi regimi irrigui, ed il contenuto di umidità alla raccolta (circa il 70%), ne fanno una sua idonea utilizzazione per andare incontro a digestione anaerobica. I risultati ottenuti dalla linea di ricerca 4, confermano come il minimo termico per la germinazione dei semi delle quattro cultivar di sorgo (Padana 4, PR811F, Jumbo e PSE24213) rilevato in laboratorio sia intorno a 8-10°C. Tuttavia, in pieno campo, il ridotto tasso germinativo dimostra che in condizioni termiche non controllate siano necessarie temperature più elevate per l'emergenza delle plantule. I semi hanno beneficiato dell'osmopriming, più in laboratorio che in pieno campo, anche se in quest'ultimo caso un certo beneficio viene apportato rispetto ai semi non trattati. Pertanto, è opportuno considerare la possibilità di migliorare le performance germinative del sorgo in campo attraverso l'osmocondizionamento dei semi, poiché questo può anche ridurre il periodo di esposizione dei semi stessi ad attacchi da parte di microrganismi tellurici, allorché la germinazione viene prolungata a causa delle basse temperature del terreno. Questo è un aspetto rilevante nella coltivazione del sorgo, poiché le fluttuazioni termiche del terreno che interessano una data area di coltivazione possono influenzare fortemente l'insediamento della coltura, specialmente quando seminata in epoca anticipata. Sebbene la risposta germinativa alle basse temperature costanti in laboratorio non sempre fornisca un buon indice previsionale della emergenza delle plantule in campo in condizioni termiche fluttuanti, essa può contribuire alla definizione di caratteri utili per la identificazione di cultivar adatte alle semine precoci nelle aree a clima mediterraneo. La identificazione di cultivar con un soddisfacente livello di tolleranza alle basse temperature e pertanto adatte alle semine precoci e la possibilità di migliorare l'emergenza delle plantule in condizioni termiche sub ottimali attraverso l'osmopriming può contribuire alla diffusione di questa coltura nelle aree di produzione delle regioni semi-aride del Mediterraneo. La identificazione di caratteri utili per la tolleranza al freddo in pieno campo durante i primi stadi di sviluppo della coltura (es. elevati standard germinativi in campo sia in termini di percentuale di piante emerse che in termini di velocità di emergenza) da trasferire a cultivar di sorgo altamente produttive, dovrebbe essere attenzionata nei programmi di miglioramento genetico della coltura per la selezione di nuove cultivar adatte anche alla coltivazione in zone temperate del Centro Europa, dove le basse temperature del terreno possono compromettere l'insediamento stabile della coltura. Infine, i risultati della linea di ricerca 5, hanno confermato la scarsa potenzialità produttiva del sorgo da biomassa allorché coltivato in ambiente a clima rigido quale quello canadese, specie quando messa a confronto con quella accertata in ambiente caldo-arido quale quello del Meridione d'Italia.

Tuttavia, è stato dimostrato come l'aumento della densità di impianto della coltura di sorgo in ambiente a clima continentale può in parte compensare le minori rese in biomassa secca ottenute in questo ambiente, sebbene i livelli produttivi accertati in corrispondenza degli investimenti più elevati (30 e 40 piante m⁻²) non raggiungano mai quelli ottenuti in ambienti più favorevoli dal punto di vista climatico. Poiché sono emerse differenze significative sia tra le cultivar che tra gli investimenti unitari anche nel contenuto di zucchero del culmo, questo carattere è da attenzionare allorchè si procede con la scelta della varietà e della relativa densità di semina.

Tuttavia, in vista dell'espansione della coltura occorre promuovere la ricerca per la risoluzione delle problematiche ancora aperte ed oggetto di studio, quali:

- selezione di genotipi resistenti a temperature relativamente basse in fase di germinazione, tale da poter anticipare l'epoca di semina, beneficiando così delle piovosità di fine inverno-inizio primavera nel Centro Sud;
- selezione di nuove cultivar più produttive e più resistenti all'allettamento;
- individuazione di nuovi genotipi di sorgo ad alto tenore zuccherino (nelle tipologie da zucchero);
- miglioramento dell'efficienza della fase agricola e di quella di trasformazione;
- l'incremento della produzione di biomassa attraverso il miglioramento della resistenza agli stress biotici e abiotici.

Per il raggiungimento di tali obiettivi occorre disporre di una vasta collezione delle diverse tipologie di sorgo, oltre ai genotipi europei, occorre collezionare le linee e le cultivar africane, nordamericane, indiane e cinesi. Le risorse genetiche collezionate dovranno essere mantenute in purezza, caratterizzate dal punto di vista morfo-fenologico, fisiologico e biochimico e moltiplicate al fine di promuovere da un lato la sperimentazione nei vari ambienti di possibile coltivazione del Paese, dall'altro lo sviluppo di nuovi ibridi commerciali di sorgo più idonei alle nostre specifiche condizioni climatiche. Le esperienze in campo su sorgo da biomassa hanno rappresentato un'opportunità per saggiare nuovo materiale genetico in vista di una maggiore diffusione di questa coltura negli ambienti italiani. Le prove in campo hanno saggiato materiale inedito che rappresenta il primo passo verso la scelta dei genotipi più adatti agli ambienti caldo-aridi del Mediterraneo. L'ambiente meridionale nello specifico si conferma adeguato alla coltivazione del sorgo da biomassa. Anche i tradizionali sistemi colturali, qualora venga assicurato il sussidio irriguo, possono inserire la specie senza ulteriori aggravii di spesa per seminatrici o per macchinari per la trinciatura e raccolta. Il sorgo potrebbe occupare gli spazi lasciati liberi dalla coltivazione della barbabietola ed anche espandersi, proporzionalmente alle richieste della filiera agro-energetica. Il

principale punto di forza di questa coltura è che avendo un ciclo di vita annuale non impiega permanentemente il terreno per un lungo periodo e, pertanto, si inserisce bene nei cicli tradizionali di rotazione colturale. Tale flessibilità, in una fase di mercato ancora incerto, quale quello attuale, rassicura molto l'imprenditore agricolo che intende avviare nella sua azienda la produzione di biomassa ad uso energetico senza vincoli a lungo termine. Altro fattore che spinge alla coltivazione del sorgo è rappresentato dalla sua elevata adattabilità ambientale: grazie alla resistenza alla siccità è una delle poche specie che si adatta alle condizioni caldo-aride del Mezzogiorno, con il supporto di qualche intervento irriguo di soccorso durante le fasi fenologiche critiche (emergenza-levata). Altro vantaggio di questa coltivazione, di non poco conto, è la grande flessibilità della destinazione d'uso del prodotto. La biomassa può alimentare impianti di combustione per la produzione di calore e/o impianti di cogenerazione per l'ottenimento di calore ed elettricità. Il sorgo zuccherino, oltre che alla conversione termochimica, può essere destinato alla filiera del bioetanolo attraverso spremitura e fermentazione del succo dei culmi; la bagassa invece può essere combusta per la produzione di calore ed elettricità necessari al funzionamento dello stabilimento. Inoltre, il sorgo zuccherino può trovare un vastissimo impiego nella filiera del biogas. In prospettiva, altra possibile destinazione d'uso della biomassa di entrambe le tipologie di sorgo (da fibra e da zucchero) sarà la produzione del bioetanolo di "II generazione".