



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**Dipartimento di Agronomia Alimenti Risorse naturali  
Animali e Ambiente  
(DAFNAE)**

**Tesi di Laurea Triennale in Scienze e Tecnologie Agrarie**

**Potenziale di coltivazione del miglio perla (*Cenchrus americanus L.*)  
nel contesto del cambiamento climatico**

**Relatore: Dott. Teofilo Vamerli  
Correlatore: Dott.ssa Anna Panozzo**

**Laureando:  
Gabriele Lana**

**Matricola n. 1194600**

**Anno accademico 2021-2022**



# INDICE

<b>INDICE</b> .....	<b>3</b>
<b>RIASSUNTO</b> .....	<b>9</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>10</b>
<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>13</b>
<b>1.1. Impatto dei cambiamenti climatici sulla produzione agraria</b> .....	<b>13</b>
<b>1.2. Caratteristiche generali della pianta di miglio perla</b> .....	<b>15</b>
<b>1.3. Superficie coltivata e produttività</b> .....	<b>16</b>
<b>2. IMPORTANZA DEL MIGLIO PERLA NEL MONDO</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1. Inquadramento generale</b> .....	<b>19</b>
<b>2.2. Storia evolutiva e adattamento</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3. Importanza del miglio perla come coltura foraggera</b> .....	<b>21</b>
2.3.1. Pascolo .....	22
2.3.2. Fienagione.....	23
2.3.3. Insilamento.....	23
<b>2.4. Caratteristiche botaniche</b> .....	<b>24</b>
<b>2.5. Ciclo biologico e fasi fenologiche</b> .....	<b>26</b>
<b>3. ESIGENZE PEDOCLIMATICHE E FISIOLOGICHE</b> .....	<b>28</b>
<b>3.1. Esigenze pedoclimatiche</b> .....	<b>28</b>
<b>3.2. Aspetti ecofisiologici</b> .....	<b>29</b>
<b>3.3. Tecnica colturale</b> .....	<b>30</b>
3.3.1. Avvicendamento .....	30
3.3.2. Consociazione .....	31
3.3.3. Coltivazione mista .....	31
3.3.4. Lavorazioni del terreno e semina.....	32
<b>3.4. Fattori che influenzano la tecnica colturale</b> .....	<b>32</b>
3.4.1. Densità d'impianto.....	33
3.4.2. Distanza tra le file .....	35
3.4.3. Fattori che influenzano la tecnica colturale nel miglio perla da foraggio.....	36
<b>3.5. Esigenze nutrizionali</b> .....	<b>37</b>
3.5.1. Azoto.....	37
3.5.2. Fosforo .....	39
3.5.3. Potassio .....	39
<b>3.6. Esigenze idriche</b> .....	<b>40</b>
<b>3.7. Raccolta</b> .....	<b>41</b>

<b>4.</b>	<b>AVVERSITÀ BIOTICHE E ABIOTICHE.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.</b>	<b>Incidenza dei fattori abiotici .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.</b>	<b>Stress da siccità .....</b>	<b>42</b>
4.2.1.	Risposta delle piante alla siccità .....	43
4.2.2.	Risposte fisiologiche alla siccità.....	43
4.2.3.	Ruolo dei fitormoni.....	44
4.2.4.	Meccanismi di adattamento alla siccità .....	45
4.2.5.	Risposta del miglio perla allo stress da siccità .....	47
4.2.6.	Danni causati dalla siccità in relazione alle diverse fasi fenologiche.....	48
4.2.7.	Ruolo dei batteri PGPR nell'ambito della tolleranza alla siccità.....	50
<b>4.3.</b>	<b>Danni da salinità .....</b>	<b>50</b>
<b>4.4.</b>	<b>Incidenza dei fattori biotici .....</b>	<b>51</b>
<b>4.5.</b>	<b>Malattie Fungine.....</b>	<b>51</b>
4.5.1.	Peronospora ( <i>Sclerospora graminicola</i> ).....	51
4.5.2.	Brusone ( <i>Pyricularia grisea</i> ).....	52
4.5.3.	Ruggine ( <i>Puccinia substrata</i> ) .....	53
4.5.4.	Carbone ( <i>Moesziomyces penicillariae</i> ).....	54
4.5.5.	Segale cornuta ( <i>Claviceps fusiformis</i> ) .....	55
<b>4.6.</b>	<b>Malattie da insetti.....</b>	<b>55</b>
4.6.1.	Cimice ( <i>Blissus leucopterus</i> ) .....	55
4.6.2.	Mosca del miglio perla ( <i>Atherigona approximata</i> ) .....	56
4.6.3.	Piralide del fusto ( <i>Chilo partellus</i> ) .....	57
4.6.4.	Larve bianche.....	58
4.6.5.	Punteruolo grigio ( <i>Myllocerus maculosus</i> ).....	58
4.6.6.	Nottua del pomodoro ( <i>Helicoverpa armigera</i> ) .....	58
<b>4.7.</b>	<b>Danni da uccelli.....</b>	<b>59</b>
<b>4.8.</b>	<b>Erbe infestanti .....</b>	<b>59</b>
<b>5.</b>	<b>PROPRIETÀ' NUTRIZIONALI .....</b>	<b>60</b>
<b>5.1.1.</b>	<b>Energia .....</b>	<b>61</b>
5.1.2.	Carboidrati e fibre alimentari.....	61
5.1.3.	Proteine .....	62
5.1.4.	Lipidi.....	64
5.1.5.	Composti fenolici.....	64
5.1.6.	Vitamine e minerali .....	65
<b>5.2.</b>	<b>Valore nutrizionale del miglio perla impiegato come foraggio.....</b>	<b>66</b>

<b>6.</b>	<b>INQUADRAMENTO E DESCRIZIONE DEI FATTORI ANTINUTRIZIONALI.....</b>	<b>69</b>
6.1.	<b>Acido fitico .....</b>	<b>69</b>
6.2.	<b>C-glicosilflavoni.....</b>	<b>70</b>
6.2.1.	Descrizione generale del gozzo .....	70
6.3.	<b>Inquadramento generale della malnutrizione.....</b>	<b>71</b>
6.3.1.	Malnutrizione dovuta alla carenza da ferro e zinco .....	73
6.3.2.	Prebiotici come promotori di micronutrienti .....	73
6.4.	<b>Metodi di lavorazione della granella post-raccolta.....</b>	<b>74</b>
6.5.	<b>Processi fisici.....</b>	<b>75</b>
6.5.1.	Decorticazione .....	75
6.5.2.	Molitura .....	75
6.5.3.	Maltazione .....	76
6.5.4.	Sbollentatura .....	76
6.6.	<b>Trattamenti chimici .....</b>	<b>76</b>
6.6.1.	Trattamento acido .....	76
6.6.2.	Trattamento termico a secco .....	77
6.6.3.	Ammollo dei semi.....	77
6.6.4.	Germinazione delle sementi.....	77
6.6.5.	Fermentazione.....	78
6.6.6.	Trattamento con fitasi .....	78
<b>7.</b>	<b>MIGLIORAMENTO GENETICO DEL MIGLIO PERLA .....</b>	<b>79</b>
7.1.	<b>Miglioramento delle cultivar.....</b>	<b>79</b>
7.1.1.	Tappe del miglioramento genetico in India .....	79
7.1.2.	Scelta della cultivar.....	82
7.2.	<b>Genetica molecolare .....</b>	<b>83</b>
7.3.	<b>Miglioramento per la tolleranza ai fattori abiotici .....</b>	<b>85</b>
7.3.1.	Tipologia di germoplasma utilizzato .....	86
7.3.2.	Ambiente di selezione.....	87
7.3.3.	Criterio di selezione .....	88
7.4.	<b>Miglioramento per la tolleranza ai fattori biotici .....</b>	<b>89</b>
7.4.1.	<i>Sclerospora graminicola</i> .....	89
7.4.2.	<i>Pyricularia grisea</i> .....	90
7.4.3.	<i>Puccinia substrata</i> .....	90
7.4.4.	<i>Moesziomyces penicillariae</i> .....	91
7.4.5.	<i>Claviceps fusiformis</i> .....	91

<b>7.5.</b>	<b>Miglioramento della qualità alimentare.....</b>	<b>92</b>
7.5.1.	Ruolo della biofortificazione .....	92
<b>8.</b>	<b>USI E CONSUMO DEL MIGLIO PERLA .....</b>	<b>93</b>
<b>8.1.</b>	<b>Proprietà nutraceutiche .....</b>	<b>95</b>
8.1.1.	Diabete .....	95
8.1.2.	Cancro .....	96
8.1.3.	Disturbi gastrointestinali.....	96
8.1.4.	Celiachia .....	97
<b>8.2.</b>	<b>Usi alimentari .....</b>	<b>97</b>
<b>8.3.</b>	<b>Uso del miglio perla come biocombustibile .....</b>	<b>99</b>
<b>9.</b>	<b>CONCLUSIONI .....</b>	<b>100</b>
<b>10.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>102</b>
<b>11.</b>	<b>SITOGRAFIA.....</b>	<b>105</b>







## RIASSUNTO

L'aumento delle temperature e della frequenza di eventi climatici estremi sono destinati a causare la diminuzione della produttività nelle più importanti colture che stanno alla base dell'alimentazione umana; inoltre si prevede che la popolazione mondiale aumenterà in maniera significativa nei prossimi anni, e sarà necessario garantire un'adeguata disponibilità di prodotti alimentari. Il miglio perla [*Cenchrus americanus* (L.) Morrone] è un cereale tipico delle regioni aride e rappresenta un alimento quotidiano per oltre 90 milioni di persone che vivono in tali ambienti; a differenza di altre colture cerealicole di maggiore pregio, che non sopportano temperature superiori a 30-35°C durante la fase di maturazione, i semi di miglio perla sono in grado di svilupparsi anche a temperature molto elevate, fino a temperature di 42°C. Grazie a queste importanti caratteristiche agronomiche, questa specie può giocare un ruolo cruciale nell'attenuare gli effetti negativi delle modificazioni climatiche ed è in grado di aumentare il reddito e la sicurezza alimentare delle comunità agricole nelle regioni aride. L'obiettivo di questa tesi è quello di valutare la fattibilità della coltivazione della pianta di miglio perla in relazione ai cambiamenti sopradescritti in ambiente temperato: viene fornito un inquadramento inerente al contesto climatico e sociale all'interno del quale il miglio perla andrebbe a collocarsi in futuro, in seguito, dopo aver riportato le principali esigenze pedoclimatiche e fisiologiche della pianta, oltre al suo impiego come coltura foraggera, la presente trattazione si sofferma su tre punti cardine, che comprendono i principali vincoli di produzione di tipo biotico e abiotico, la qualità nutrizionale e i fattori che tendono a deprimerla oltre ai programmi di miglioramento genetico che sono stati implementati per questa coltura; infine vengono riportate le più importanti proprietà nutraceutiche e le preparazioni alimentari del miglio perla, insieme ad un'analisi della domanda alimentare relativa a questo cereale.

*Cultivation potential of pearl millet (Cenchrus americanus L.) in the context of climate change*

## **ABSTRACT**

The increase in temperatures and the frequency of extreme climatic events are expected to decrease the productivity of the most important crops at the base of human nutrition; moreover it is expected that the world population will increase significantly in the coming years, consequently it will be necessary to ensure adequate availability of food products. Pearl millet [*Cenchrus americanus* (L.) Morrone] is a cereal typical of arid regions and represents a daily food for over 90 million people living in such environments; unlike other cereal crops of greater value, which do not tolerate temperatures above 30-35 ° C during the ripening phase, pearl millet seeds are able to develop up to temperatures of 42 °C. Thanks to these important agronomic traits, this species can play a crucial role in attenuating the negative effects of climatic changes, and is able to increase the income and food security of agricultural communities in arid regions. The aim of this thesis is to evaluate the feasibility of the cultivation of the pearl millet plant in temperate climates in relation to the changes described above: a framework concerning climatic and social context within which pearl millet would be placed in the future is provided, later, after reporting the main pedoclimatic and physiological needs of the plant, in addition to its use as a fodder crop, this thesis focuses on three key points, which include the main biotic and abiotic production constraints, the nutritional quality and factors that tend to depress it in addition to the genetic improvement programs that have been implemented for this crop. At the end the most important nutraceutical properties and food preparations of pearl millet are reported, together with an analysis of the food demand for this cereal.





# 1. INTRODUZIONE

Lo scenario climatico è in continua evoluzione: gli stress abiotici comportano un enorme rischio per l'accrescimento e lo sviluppo delle piante, in quanto possono causare una diminuzione anche del 50% in termini di resa tra le principali colture cerealicole a livello globale e ad un calo del 90% della superficie coltivabile; si stima che solamente il 10% dei terreni agrari sia esente da tali stress, che sono dovuti per lo più a periodi prolungati di siccità. In base a quanto sopradescritto, una specie vegetale come il miglio perla [*Cenchrus americanus* (L.) Morrone] resistente a temperature estremamente elevate e ad un basso volume di precipitazioni, può giocare un ruolo cruciale nel soddisfare le crescenti esigenze alimentari della popolazione mondiale in progressivo aumento (Satyavathi et al., 2021).

Sono stati qui analizzati gli impatti dei cambiamenti climatici sia sulla produttività agraria sia sulla popolazione umana, al fine di inquadrare il contesto nel quale il miglio perla potrebbe collocarsi in futuro.

## 1.1. Impatto dei cambiamenti climatici sulla produzione agraria

I cambiamenti climatici influenzeranno l'agricoltura e i sistemi forestali attraverso temperature più alte, più elevate concentrazioni di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e variazioni nella distribuzione delle precipitazioni, oltre ad un aumento della competizione delle erbe infestanti, parassiti e incidenza delle patologie.

Da un punto di vista geografico, esiste una significativa disomogeneità riguardo alle conseguenze di questi fenomeni tra l'emisfero boreale e quello australe; infatti sebbene i Paesi meridionali non siano i principali artefici delle modificazioni climatiche, possono subire la maggior parte dei danni sotto forma di decremento della produttività e maggiore frequenza di eventi meteorologici estremi come siccità e inondazioni. L'impatto negativo sulla produzione agraria relativo al continente africano fino al periodo 2080-2100 potrebbe essere compreso tra il 15-30%, viceversa nelle latitudini temperate, per lo più nell'emisfero settentrionale, temperature più elevate possono favorire l'esercizio dell'attività agraria, incrementando le aree potenzialmente adatte

alla coltivazione, aumentando la lunghezza del ciclo colturale e conseguentemente anche la produttività delle specie coltivate.

L'agricoltura attualmente contribuisce per circa il 14% alle emissioni di gas serra, ma possiede anche un potenziale di mitigazione pari a 5,5 – 6 Gt di CO<sub>2</sub> all'anno. Esistono diverse strategie che possono generare un effetto benefico significativo sia per la sicurezza alimentare sia per l'adattamento ai cambiamenti climatici, queste includono l'agricoltura conservativa, la conservazione e gestione delle foreste e l'agroforestazione, il recupero di biogas e rifiuti e, in generale, un ampio insieme di metodologie in grado di promuovere la conservazione del suolo e delle risorse idriche incrementandone la qualità, la disponibilità e l'efficienza d'uso. Migliorare tali possibilità può aumentare la resilienza dei sistemi di produzione di fronte alla crescita delle pressioni climatiche, fornendo al contempo il sequestro o la riduzione del carbonio e conseguentemente dell'effetto serra (Le Mouël e Forslund, 2017).

### **1.1. Impatto dei cambiamenti climatici sulla popolazione umana**

Diversi studi hanno riportato che le temperature globali aumenteranno da 1 a 6 °C entro il 2100, con gravi conseguenze per l'agricoltura. Ciò significa che le misure appropriate riguardo al clima per garantire la sicurezza alimentare sono una priorità, anche perché si prevede che la popolazione umana raggiungerà i 9,1 miliardi entro il 2050 (Varshney et al., 2017) e la maggior parte di questa crescita avverrà nei Paesi in via di sviluppo. In base a quanto riportato, la produzione alimentare dovrà aumentare del 70% tuttavia, incrementare la produzione non è sufficiente per raggiungere la sicurezza alimentare, in quanto è necessario adottare un approccio combinato, che garantisca gli investimenti necessari e metta in atto politiche favorevoli alla produzioni agraria, soprattutto negli Stati economicamente più poveri, i quali necessitano di assistenza specifica al fine di ottenere una maggiore resilienza contro il rischio di catastrofi causate da eventi meteorologici estremi come siccità e inondazioni (Le Mouël e Forslund, 2017).

Le modificazioni previste nei modelli previsionali relative alle precipitazioni influenzeranno i sistemi agrari dominati da specie irrigue come, ad esempio, nell'Africa subsahariana, la cui agricoltura è già stata colpita dai cambiamenti climatici, i quali hanno ridotto le rese delle colture principali fino al 10% (Rhoné et al., 2020). Il miglio perla può risultare importante per minimizzare gli effetti negativi delle modificazioni

climatiche ed è in grado di aumentare il reddito e la sicurezza alimentare delle comunità agricole nelle regioni aride (Satyavathi et al., 2021).

## 1.2. Caratteristiche generali della pianta di miglio perla

Di seguito si riporta un inquadramento generale relativo alle principali specie di miglio, analizzando, a livello globale, i dati relativi alla superficie coltivata e alla produttività; tali dati evidenziano che questo cereale è ampiamente coltivato nei Paesi poveri e in via di sviluppo sia del continente africano sia di quello asiatico, mentre per quanto riguarda i Paesi sviluppati d'America e d'Europa non ci sono prove evidenti di coltivazione.

Miglio è un termine collettivo che si riferisce a un certo numero di specie annuali a seme piccolo che vengono coltivate sia come colture da granella, sia come colture foraggere, principalmente su terreni marginali nelle regioni temperate, subtropicali e tropicali.

Le specie più importanti sono:

1. miglio perla
2. miglio indiano o miglio delle dita (*Eleusine coracana*)
3. miglio proso o miglio comune (*Panicum miliaceum*)
4. miglio a coda di volpe o miglio panico (*Setaria italica*)



**Figura 1.1:** pianta di miglio perla (Dias-Martins et al., 2018).

### **1.3. Superficie coltivata e produttività**

A livello mondiale, il miglio viene coltivato prevalentemente in Asia e Africa che risultano essere i principali produttori, e in alcune zone dell'Europa e dell'America. Nel continente asiatico, Cina e India sono i Paesi più importanti, seguiti da Nepal e Myanmar, mentre in Africa la produzione principale si riscontra nella parte occidentale del continente, in particolare in Niger, Mali e Nigeria, mentre nella parte orientale è l'Etiopia lo stato più importante in termini produttivi. In Europa, il miglio è coltivato prevalentemente ad est, in particolare in Russia e Ucraina, mentre nell'Europa occidentale la coltivazione è sostanzialmente assente. Per quanto riguarda il continente americano, il primato di produzione spetta agli Stati Uniti, seguiti in minor misura dall'Argentina. Questi dati confermano che il miglio viene coltivato prevalentemente nei Paesi poveri e in via di sviluppo. L'India detiene il primato mondiale di coltivazione, con più di 12 milioni di tonnellate prodotte, seguita da Niger, Cina e Nigeria; nei Paesi sviluppati la coltivazione del miglio è praticamente inesistente.

Nel 2020 la superficie coltivata a miglio è stata pari a 32 milioni di ettari, con una produzione complessiva pari a 30 milioni di tonnellate.

Negli ultimi 20 anni (2000 – 2020) a livello mondiale la superficie coltivata è diminuita, passando da 37 milioni di ettari nel 2000 fino agli attuali 32 milioni, invece la produzione ha seguito il percorso inverso, passando da 27 milioni di tonnellate fino alle attuali 30 milioni.

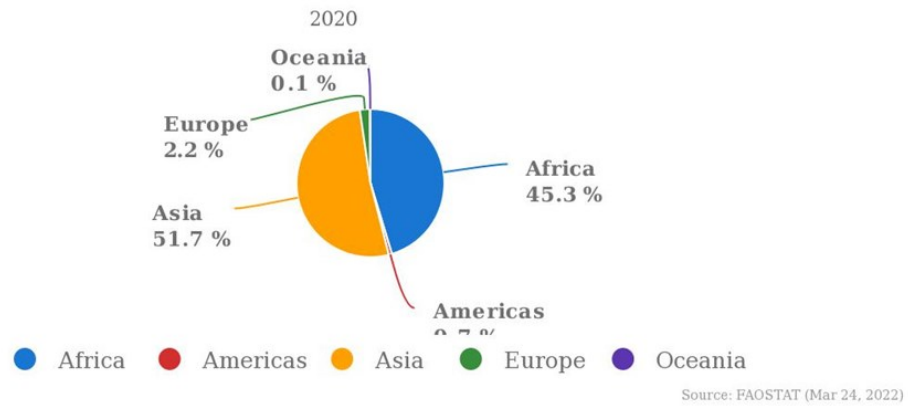
Se si analizzano i dati di resa e superficie coltivata dei principali Paesi produttori di miglio, come India, Niger e Nigeria, nell'ultimo ventennio, si deduce che nel caso dell'India la superficie coltivata è diminuita dal 2000 al 2020, passando da 13 milioni fino agli attuali 9 milioni di ettari, viceversa la resa ha subito un andamento crescente, da 10 milioni di tonnellate prodotte fino ad arrivare a quasi 12,5 milioni.

Per quanto riguarda i principali paesi produttori africani, ovvero Niger e Nigeria, nonostante entrambi siano ubicati nel medesimo continente, i dati di resa e superficie coltivata sono significativamente diversi; infatti se nel caso della Nigeria l'andamento della produzione e della resa per ettaro sono stati più che dimezzati, per quanto riguarda il Niger entrambi questi parametri sono notevolmente aumentati, in particolare la



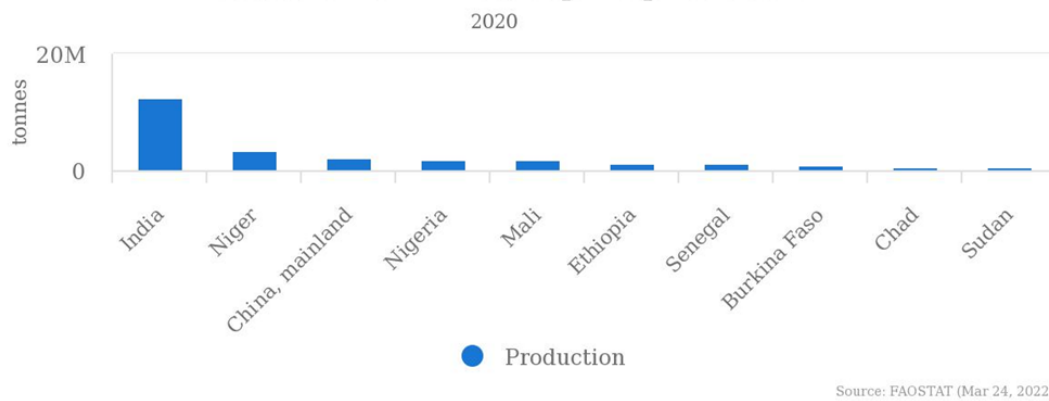
produzione, che è passata da 1,6 milioni di tonnellate del 2000 fino agli attuali 3,5 milioni di tonnellate (FAO, 2020).

### Production share of Millet by region

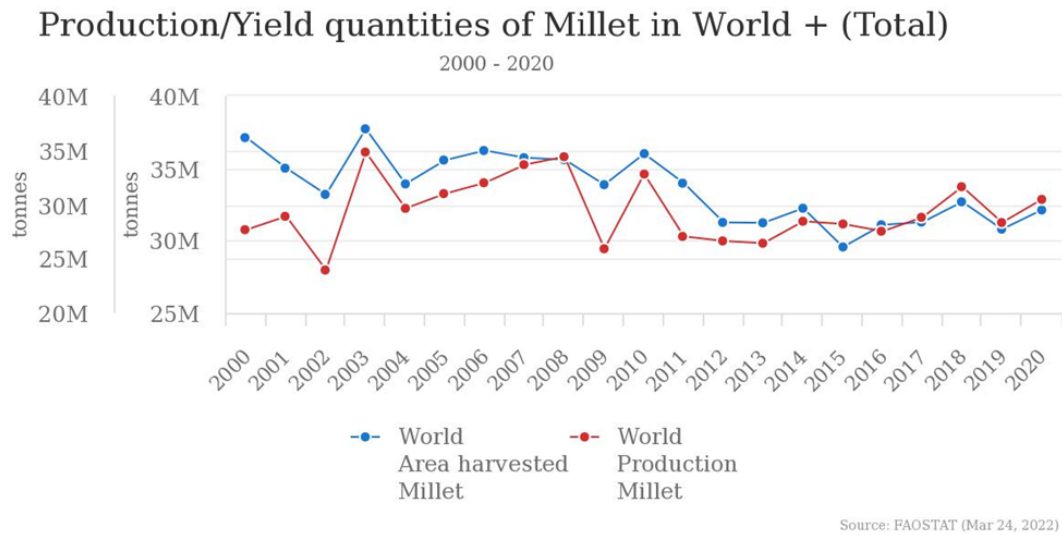


**Figura 1.2:** produzione % di miglio nei diversi continenti.

### Production of Millet: top 10 producers



**Figura 1.3:** principali Paesi produttori di miglio nel 2020 (fonte FAO).



**Figura 1.4:** variazione globale della superficie coltivata e della quantità prodotta di miglio negli ultimi 20 anni.

## 2. IMPORTANZA DEL MIGLIO PERLA NEL MONDO

### 2.1. Inquadramento generale

A livello globale, il miglio perla è la sesta coltura cerealicola più importante dopo riso (*Oryza sativa*), frumento (*Triticum aestivum*), mais (*Zea mays*), orzo (*Hordeum vulgare*) e sorgo (*Sorghum vulgare*). Costituisce un alimento base per 90 milioni di persone che vivono in condizioni di povertà e viene coltivato principalmente per la produzione di granella, ma trova impiego anche come coltura foraggera.

Grazie alla sua elevata resilienza nei confronti delle avversità climatiche, questo cereale può essere un'opzione valida per aumentare il reddito e la sicurezza alimentare delle comunità agricole nelle regioni aride, dovuta alla sua attitudine a produrre una quantità significativa di cariossidi anche in zone con piovosità media annua inferiore a 250 mm: ciò è reso possibile grazie alla sua capacità intrinseca di sopportare temperature fino a 42°C durante la fase riproduttiva (Satyavathi et al., 2021). Il miglio perla possiede inoltre un apparato radicale in grado di esplorare il suolo a profondità elevata, anche oltre 2 metri, al fine di estrarre l'acqua e le sostanze nutritive del suolo, ed è in grado di sopravvivere in condizioni di stress idrico anche per lunghi periodi di tempo (Ullah et al., 2017).

Oltre alla sua notevole tolleranza ai fattori climatici avversi, il miglio perla consente di ottenere una resa soddisfacente anche nei terreni con vocazionalità agronomica limitata, come ad esempio terreni salini ma anche con pH acido, e quelli con scarsa dotazione di nutrienti, risultando meno dipendente dall'impiego di fertilizzanti chimici (Satyavathi et al., 2021). Il pH ottimale si colloca su 6,0–7,0, ma la crescita può protrarsi fino a valori pari a 8,0 (Newman et al., 2010).

Queste caratteristiche consentono alla pianta di superare, in termini di tolleranza alle avversità pedoclimatiche, cereali di maggior importanza agroalimentare, rendendola una coltura di vitale importanza per la coltivazione dei terreni marginali nelle regioni aride e semi-aride del mondo, soprattutto per quelle dell'Asia e dell'Africa (Satyavathi et al., 2021).

## 2.2. Storia evolutiva e adattamento

La storia evolutiva del miglio perla non è stata completamente definita, in quanto le sue origini poco chiare e di complessa interpretazione hanno impedito di stabilire con precisione la sua presenza nelle diverse aree geografiche: probabilmente la pianta è stata generata da diversi eventi di addomesticamento indipendenti e una vasta gamma di condizioni ambientali; serviranno ulteriori studi per certificare le origini e la diffusione del miglio perla.

Secondo alcuni autori la specie è originaria dell'altopiano centrale sahariano, ma coltivata sin dal 1200 a.C. in India, è ormai diffusa in tutte le aree tropicali aride del Mondo.

Anche se c'è disaccordo sul numero di addomesticamenti, molti autori concordano sul fatto che questi hanno avuto luogo in Africa, all'interno della quale diverse regioni della Mauritania e del Sudan (zona saheliana) sono state proposte come probabili centri di origine (Jukanti et al., 2016).

Una delle più antiche testimonianze archeobotaniche della coltivazione del miglio perla è stata trovata in Mauritania risalente al 3500 a.C., ma testimonianze di coltivazione sono state rinvenute anche in Ghana intorno 3460 a.C. e vicino al lago Ciad in Nigeria tra il 3500-3300 a.C., mentre la sua diffusione nel continente asiatico è datata tra il 4500 e 5000 a.C. dove la coltura addomesticata si era già diffusa in India nel terzo millennio a.C.

Dall'India il miglio perla raggiunse la Cina, per poi diffondersi nell'Africa settentrionale (Tunisia, Marocco, Libia e Algeria) e persino in Spagna, dove è ancora coltivato.

In Europa le più antiche testimonianze di coltivazione risalgono al 16° secolo, mentre dal 19° secolo il cereale venne progressivamente sostituito da colture più produttive e più redditizie, come frumento, segale (*Secale cereale*), riso, mais, e patata (*Solanum tuberosum*) (Radhouane, 2013).

Il fattore più importante, che ha facilitato l'addomesticamento e la coltivazione del miglio perla come cereale selvatico è da attribuire all'elevata capacità da parte della pianta di colonizzare in modo efficace regioni di produzione agricola difficili e inospitali. La capacità dei progenitori selvatici di resistere al caldo e allo stress da siccità è stata responsabile del successo del miglio perla come importante coltura cerealicola di regioni aride e semi-aride.

Un'altra caratteristica rilevante è data dalla dormienza, elemento importante in caso di condizioni climatiche sfavorevoli, abbinata alla capacità di germinare in condizioni più adeguate; l'abbondante coltivazione unita alla capacità di produrre nuovi germogli ha aiutato lo sviluppo e la riproduzione. È doveroso considerare che la maggior parte di queste caratteristiche e adattamenti sono stati conservati nelle varietà coltivate (Jukanti et al., 2016).

### **2.3. Importanza del miglio perla come coltura foraggera**

La mancanza di una disponibilità adeguata di foraggi costituisce il principale limite alla produzione animale nelle comunità agricole delle regioni aride e semiaride: è stato stimato che a livello globale la carenza di materia foraggera ammonta a circa 911 milioni di tonnellate e ne servirebbero almeno 1.148 milioni per colmare tale deficit entro il 2030 a causa dell'aumento della popolazione mondiale. Per alleviare la carenza di mangimi in queste regioni, l'ulteriore sfruttamento del miglio perla potrebbe essere una delle soluzioni promettenti in quanto, oltre alle già citate caratteristiche di adattabilità, presenta altri vantaggi come l'alto potenziale di accostamento e la rapida capacità rigenerativa che assicura la possibilità di eseguire più sfalci durante la stessa stagione di crescita, consentendo la fornitura costante di foraggio fresco o essiccato. Tali studi suggeriscono che questo cereale è una scelta eccellente in termini di resa e qualità foraggera rispetto ad altre piante coltivate nelle regioni più aride del mondo (Govinthaaraj et al., 2021).

Nell'ambito della produzione foraggera il miglio perla viene impiegato dagli allevatori di bestiame per il pascolo e per la produzione di insilato, fieno e foraggio fresco (Newman et al., 2010). Le rese di sostanza secca di foraggio variano notevolmente a seconda delle condizioni ambientali e delle cultivar: in ambienti semi-aridi possono arrivare fino a 2,5-3 t/ha, mentre in condizioni ideali raggiungono 27 t/ha e spesso anche più di 40 t/ha (Feedipedia, 2015).

Grazie al suo elevato valore nutrizionale, la pianta viene utilizzata per l'alimentazione degli animali in fase di accrescimento o lattazione, inoltre assume un'importanza notevole nelle zone aride in quanto il foraggio di miglio, se confrontato con altre colture, risulta essere il più tollerante alla siccità.

Un vantaggio importante della pianta di miglio è che questa, a differenza del sorgo, non produce né acido cianidrico né sostanze tanniche, rendendo questo prodotto vegetale

idoneo per l'alimentazione dei cavalli. Tuttavia, questo cereale può accumulare livelli di nitrati elevati se concimato con azoto in condizioni di stress come, ad esempio, quello causato dalla siccità; livelli di nitrati nella sostanza secca superiori a 0,9% possono essere letali, mentre la produzione di latte può essere ridotta se la concentrazione di tali componenti azotati supera lo 0,6% della sostanza secca. La conservazione come fieno non riduce i livelli di nitrati, viceversa questi possono essere ridotti del 40-60% con il processo di insilamento (Newman et al., 2010).



**Figura 2.1:** miglio perla finalizzato alla produzione foraggera (Newman et al., 2010).

### **2.3.1. Pascolo**

L'uso del miglio perla come pascolo dovrebbe essere riservato agli animali giovani, ai bovini in lattazione oppure ai vitelli mediante il sistema "*creep grazing*" (metodo gestionale che consente agli animali più giovani di pascolare una parte di prato prima degli adulti), infatti tale foraggio risulta troppo costoso per essere utilizzato da animali di età avanzata o con basso fabbisogno nutrizionale, a meno che non siano disponibili altri mangimi per soddisfare le esigenze di mantenimento (Newman et al., 2010). Il miglio perla può essere impiegato sia in regime di pascolo continuo sia in rotazione, anche se quest'ultima tipologia è quella più efficiente. L'utilizzazione del pascolo può iniziare 40-50 giorni dopo la data di semina, con altezza della pianta pari a 40-50 cm, mentre bisogna evitare il consumo con valori inferiori a 15-30 cm; il tempo ottimale di ricrescita è pari a 5 settimane, con altezza compresa tra 50-86 cm (Feedipedia, 2015).



**Figura 2.2:** pascolo di miglio perla (Newman et al., 2010).

### **2.3.2. Fienagione**

Il processo di fienagione può essere applicato con successo nel caso del miglio perla, ma a causa dell'elevato spessore degli steli sono necessari lunghi tempi di essiccazione. È preferibile adottare un'elevata densità di semina al fine di ridurre lo spessore dei fusti e quindi accorciare la fase di asciugatura in campo. Il primo taglio si esegue generalmente 60-65 giorni dopo la semina, mentre gli sfalci successivi dovrebbero avvenire con cadenze pari 30-35 giorni, con piante alte circa 1 metro (Newman et al., 2010).

### **2.3.3. Insilamento**

L'insilato di miglio perla va raccolto tre settimane dopo la fioritura, ottenendo una produttività in termini di sostanza secca simile a quella che si realizzerebbe con la pianta di mais.

Il processo di insilamento può avvenire con la singola pianta di miglio oppure consociato con specie leguminose (Feedipedia, 2015). Alcuni studi hanno confrontato l'insilato di miglio perla con quello di mais e sorgo riportando che le vacche alimentate con insilato di miglio producevano latte con una maggiore concentrazione di grasso e consumavano più sostanza secca (Govintharaj et al., 2021).

## 2.4. Caratteristiche botaniche

Il miglio perla è una pianta C4, allogama e diploide, con numero cromosomico di base pari a sette ( $2n = 2x = 14$ ).

Appartiene alla famiglia delle *Poaceae* (graminaceae), sottofamiglia *Panicoideae*, genere *Pennisetum* o *Cenchrus* e specie *glaucum*. A sua volta *Pennisetum glaucum* è diviso in tre sottospecie:

- 1) *glaucum*
- 2) *violaceum (monodii)*
- 3) *stenostachyum*

All'interno della sottospecie *glaucum* sono comprese le varietà coltivate, mentre la sottospecie *violaceum* incorpora il progenitore selvatico del miglio perla, identificato come *Pennisetum glaucum ssp. violaceum (monodii)*, ed è stata la prima specie ad essere stata addomesticata, mentre la sottospecie *stenostachyum* deriva dall'ibridazione naturale tra *glaucum* e *violaceum* ed è presente in natura come forma infestante (Jukanti et al., 2016).

Sono state riconosciute quattro diverse razze di miglio perla, distinguibili in base alla forma del seme (Baldoni e Giardini, 2000):

- 1) *typhoides*: cariosside obovata e ampia diffusione;
- 2) *nigritarum*: cariosside obovata e sfaccettata diffusa dal Sudan alla Nigeria;
- 3) *globosum*: cariosside grande e sferica presente in Nigeria,
- 4) *leonis*: cariosside di forma allungata, coltivata in Sierra Leone.

<b>Classe</b>	<i>Monocotyledones</i>
<b>Ordine</b>	<i>Poales</i>
<b>Famiglia</b>	<i>Poaceae</i> (Graminaceae)
<b>Sottofamiglia</b>	<i>Panicoideae</i>
<b>Genere</b>	<i>Pennisetum</i> ( <i>Cenchrus</i> )
<b>Specie</b>	<i>Pennisetum glaucum</i>

**Tabella 2.1:** tassonomia filogenetica del miglio perla.



Il miglio perla è una pianta erbacea annuale monocotiledone a ciclo breve, compreso tra 75 e 120 giorni a seconda delle condizioni ambientali (Dias-Martins et al., 2018), presenta un habitus cespitoso, un elevato grado di accestimento e taglia elevata (1,0 – 3,0 m); il fusto è relativamente sottile, (2-3 cm di diametro) e fittamente villosa sotto il panicolo, mentre le foglie, le quali possiedono un margine finemente seghettato, possono raggiungere una larghezza di 8 cm ed una lunghezza di un metro.

La pianta presenta un sistema di riproduzione di tipo allogamo, nel quale l'impollinazione incrociata è prevalente, ed è pari circa all'85%. La sua biologia floreale è unica tra le principali specie coltivate: i fiori sono ermafroditi e protogini con gli stigmi che normalmente rimangono ricettivi per 3-4 giorni. L'infiorescenza è una falsa spiga e la dimensione del panicolo è compresa generalmente tra i 20-40 cm di lunghezza e 3-5 cm di diametro, terminale, con forma cilindrica oppure a candela. Il fiore è costituito da un rachide centrale che è strettamente pieno di cespi, ognuno dei quali è formato da una o più spighe. È stato stimato che ogni infiorescenza contiene in media 1600 spighe, le quali sono piccole, lanceolate e acute: ognuna di esse è composta da due glume (esterna e interna) e tra le glume sono presenti due fiori. Il fiore inferiore è staminato mentre quello superiore è ermafrodita: quello staminato ha un lemma e una palea, e racchiuso tra loro è presente l'androceo con tre stami, mentre il fiore superiore ermafrodita presenta un lemma ampio e appuntito e una palea sottile e ovale, in questo caso l'androceo e il gineceo sono racchiusi tra loro. L'androceo del miglio perla è costituito da tre antere pelose, gialle o viola, ciascuna attaccata a un lungo filamento, mentre il gineceo è costituito da un ovario con due stili e uno stigma piumoso; il pistillo nel suo stadio giovanile mostra due carpelli, uno più grande dell'altro.

In genere la fioritura inizia dopo l'emergenza del panicolo, ma in alcuni genotipi può avvenire dopo: a fiorire per primi sono i fiori localizzati nella parte superiore centrale della pannocchia, a seguire quelli posti verso l'alto e verso il basso; è importante considerare che lo stigma rimane ricettivo per 18-24 ore dopo la fuoriuscita. L'emergenza dell'antera prende il via un giorno dopo quella dello stigma, e inizia dapprima nei fiori ermafroditi per poi proseguire nei fiori staminati, prima nella parte superiore (circa a due terzi) del panicolo per poi procedere in entrambe le direzioni. La prima parte del processo di antesi si completa in circa 7-12 giorni e il processo può continuare per un massimo di tre settimane (Jukanti et al., 2016).

Il seme di miglio perla è una cariosside, che raggiunge la maturità circa 25-30 giorni dopo la fecondazione. I semi di miglio perla possono essere di colore bianco perla,

giallo pallido, marrone, grigio, blu ardesia o viola. La forma può essere obovata, lanceolata, ellittica, esagonale o globulare. Il peso di 1000 semi può variare da 2,5 a 20 g, ma la maggior parte delle cultivar migliorate presenta valori compresi tra 7-12g.

Un grande vantaggio da attribuire al seme di miglio perla è che questo non richiede alcuna struttura speciale di conservazione, in quanto si preserva in modo adeguato con precauzioni minime a contenuto di umidità appropriato (12-13%). Ciò fornisce la tanto richiesta sicurezza alimentare per gli agricoltori con reddito instabile o scarso accesso ad altri alimenti di base (Khairwal et al., 2007).



**Figura 2.3:** semi di miglio perla (Khairwal et al., 2007).

## **2.5. Ciclo biologico e fasi fenologiche**

Il ciclo biologico del miglio perla ha inizio con il processo germinativo: il seme germina ed emerge abbastanza rapidamente, circa cinque giorni dopo la semina, e dopo due settimane circa dalla data d'impianto la pianta inizia una rapida fase di crescita (Newman et al., 2010). Studi recenti hanno riportato che questa fase ha inizio dopo 2-4 giorni in condizioni ottimali di temperatura e umidità (24-32°C) (Lee et al., 2012), ma può prolungarsi anche fino a 5-7 giorni se le condizioni meteorologiche sono sfavorevoli. Il rivestimento che avvolge il seme viene rotto e si ha la formazione di un piccolo germoglio, detto coleoptile, e di una radice primaria. Le radici primarie, chiamate anche radici seminali, si deteriorano in breve tempo, mentre le radici secondarie o avventizie iniziano a comparire 6-7 giorni dopo l'emergenza della piantina, sono di piccola dimensione, uniformi e formano una piccola porzione del sistema radicale, occupando da 5 a 15 cm di area nel terreno intorno alla base del fusto. Un'ulteriore tipologia di radici avventizie permanenti si sviluppa dagli internodi

secondari e superiori: queste si espandono lateralmente per circa 1 m<sup>2</sup> e forniscono principalmente sostanze nutritive alla pianta (Khairwal et al., 2007).

La profondità delle radici dipende dall'andamento stagionale e dal genotipo: è stata riportata una profondità radicale pari a 300 cm per le cultivar più tardive, viceversa l'approfondimento radicale nelle cultivar più precoci è di 140 cm.

Dopo 20-25 giorni dalla germinazione ha inizio la formazione dei germogli primari, i quali portano avanti lo sviluppo di quelli secondari (accestimento) per tutta la fase di crescita in altezza della pianta; si tratta di un carattere fenologico estremamente importante, grazie alla sua capacità di compensare la perdita di resa in caso di stress.

La fioritura si completa dopo circa 40-55 giorni: alcuni genotipi sensibili al fotoperiodo possono richiedere un periodo di tempo più elevato per poter fiorire, mentre altri non fioriscono affatto se le ore di luce persistono per più di 14-16 ore. L'avvio della fase riproduttiva e la piena fioritura avvengono rispettivamente dopo 45 e 59 giorni dalla germinazione, mentre la foglia a bandiera diventa visibile dopo 50 giorni dall'evento germinativo.

Dopo 60-65 giorni ha inizio la fase di riempimento delle cariossidi e si completa entro 9-10 giorni (Ullah et al., 2017).

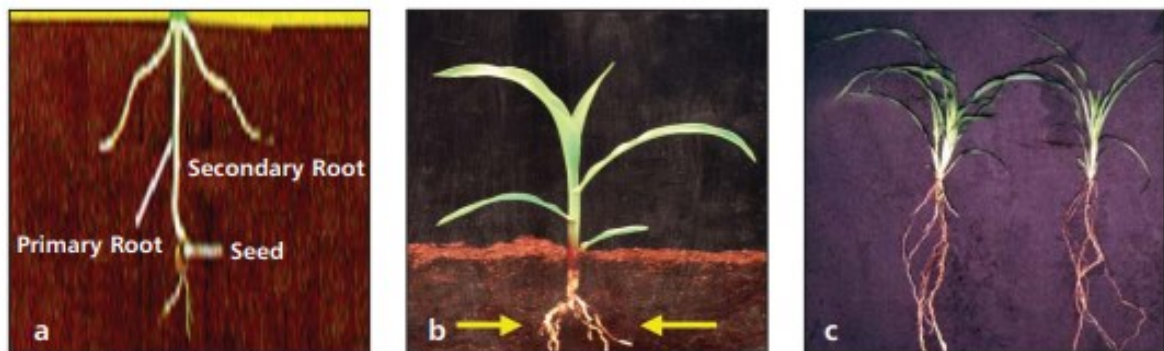
Il peso secco totale della pianta raggiunge il suo massimo allo stadio di maturazione fisiologica, nel quale si arresta l'assorbimento di nutrienti. In caso di danni da parte di uccelli, funghi, etc., può risultare vantaggioso raccogliere il prodotto in questa fase, che viene raggiunta dopo 90-95 giorni dalla germinazione, a seconda delle condizioni meteorologiche. Come nel sorgo, la maturità fisiologica può essere determinata dallo sviluppo di un piccolo strato scuro sul fondo della cariosside (*black layer*) ciò si verifica circa 30 giorni dopo la fioritura.

Gli stadi fenologici del miglio perla possono essere suddivisi in tre parti, ognuna delle quali fa riferimento alle diverse fasi di crescita, e vengono denominate rispettivamente GS1, GS2 e GS3.

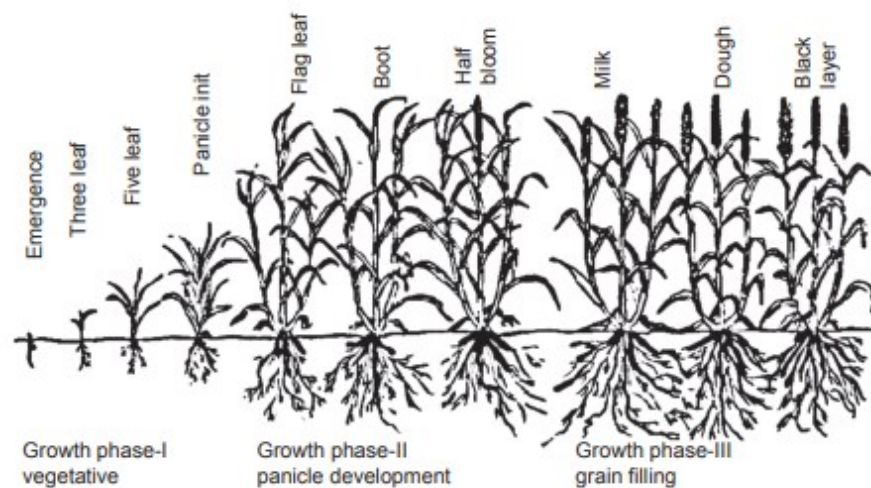
La prima fase di crescita (GS1) comprende gli stadi fenologici relativi a germinazione, emergenza, accestimento e la parte iniziale della differenziazione della spiga (panicolo).

La seconda fase di crescita (GS2) fa riferimento allo sviluppo di tutte le foglie, comparsa di tutti i germogli e crescita in altezza del fusto; tale fase termina con la comparsa degli stigmi sulla spiga.

L'ultima fase di crescita (GS3) comincia con la fecondazione dei fiori e prosegue fino alla maturazione fisiologica della pianta (Khairwal et al., 2007).



**Figura 2.4:** apparato radicale del miglio perla; a) radice primaria; b) radici secondarie; c) radici avventizie permanenti (Khairwal et al., 2007).



**Figura 2.5:** fasi fenologiche del miglio perla (Ullah et al., 2017).

### 3. ESIGENZE PEDOCLIMATICHE E FISILOGICHE

#### 3.1. Esigenze pedoclimatiche

Il miglio perla può essere coltivato in un'ampia varietà di terreni, da quelli limosi e argillosi fino a quelli sabbiosi; tuttavia, performance agronomiche soddisfacenti si realizzano nei suoli fertili, profondi e ben drenati, i quali stimolano un adeguato approfondimento radicale migliorando la quantità e la qualità dei semi alla raccolta. Da evitare la coltivazione nei terreni soggetti al ristagno idrico, in quanto possono causare un radicamento superficiale, basso contenuto proteico e scarsa produttività (Lee et al., 2012).

Raramente la coltura viene realizzata in zone con elevata vocazionalità agronomica a causa della tendenza a preferire gli areali caratterizzati da bassa piovosità e con fertilità marginale caratterizzati da condizioni climatiche sfavorevoli come siccità, elevata salinità, o basso pH, nelle quali si verifica un uso incompleto dell'acqua disponibile.

Il miglio è una pianta macroterma, negli ambienti mediterranei la stagione di produzione va generalmente da fine maggio a settembre (Newman et al., 2010); lo zero di vegetazione è di 10°C e il processo germinativo avviene in modo ottimale se la temperatura è compresa tra 25-30°C, ma è possibile effettuare la semina prima che la temperatura del suolo raggiunga 23 °C (Ullah et al., 2017). In generale le condizioni climatiche ideali per la crescita vegetativa oscillano tra 30-34°C (Baldoni e Giardini, 2000). La capacità di questo cereale nel garantire la produzione di granella anche in condizioni di bassa fertilità e temperature elevate fornisce resilienza ai cambiamenti climatici nonostante sia possibile ottenere rese più elevate con una migliore gestione agronomica (Uppal et al., 2015).



**Figura 3.1:** miglio perla coltivato senza o scarso uso di input agronomici (Khairwal et al., 2007).

### 3.2. Aspetti ecofisiologici

Il potenziale di crescita di qualsiasi specie vegetale è funzione del suo tasso di crescita e della durata del ciclo colturale. Nel caso del miglio perla tale potenziale non è paragonabile a quello di altri cereali che crescono in ambienti favorevoli, anche se è caratterizzato da un alto grado di accrescimento che consente uno sviluppo abbastanza elevato sotto condizioni ottimali, con un ampio indice di area fogliare (LAI 6,7) dovuto

al suo portamento eretto e all'elevata efficienza nell'uso delle radiazioni (RUE) (Vadez et al., 2012) pari a 2,5 – 4 g/MJ (Ullah et al., 2017).

Cereali come riso, frumento e orzo hanno un'anatomia fogliare di tipo C3, il miglio invece, analogamente a mais e sorgo, è di tipo C4: questa differenza è dovuta al fatto che in quest'ultima tipologia di piante il prodotto della fissazione della CO<sub>2</sub> non è più un composto a tre atomi di carbonio ma è l'acido ossalacetico che ha quattro C.

Rispetto alle C3, le piante C4 presentano i seguenti vantaggi: crescono in condizioni di illuminazione intensa e temperature elevate, possiedono una notevole velocità di fotosintesi e di crescita, mantengono basso il livello di fotorespirazione (viene soppressa dall'accumulo di anidride carbonica nelle cellule della guaina del fascio), sono in grado di limitare le perdite di acqua (nelle piante C4 l'apertura stomatica richiede meno tempo, dunque sono in grado di conservare una maggiore quantità della risorsa idrica) e una morfologia fogliare diversa, a causa della presenza dell'anatomia di Kranz nelle foglie, inoltre la capacità di fissare la CO<sub>2</sub> è più efficiente, in quanto questo composto è presente nelle cellule della guaina del fascio ad una concentrazione dieci volte superiore rispetto all'anidride carbonica contenuta nelle cellule del mesofillo delle piante C3.

### **3.3. Tecnica colturale**

#### **3.3.1. Avvicendamento**

La brevità del ciclo vegetativo e le caratteristiche fisiologiche portano il miglio ad entrare negli schemi di avvicendamento come coltura intercalare estiva, dopo un cereale vernino o dopo un erbaio autunno – primaverile. È importante considerare che la coltivazione del miglio perla tende ad esaurire la fertilità del terreno in modo significativo, rendendo difficoltosa l'eventuale successione di una graminacea (Baldoni e Giardini, 2000).

Il miglio perla entra spesso in rotazione anche con sorgo, arachide (*Arachis hypogaea*), cotone (*Gossypium herbaceum*), miglio panico, miglio indiano, ricino (*Ricinus communis*) e, a volte, in India meridionale con riso.

Nelle zone in cui vengono coltivati sorgo e cotone, le rotazioni sono spesso triennali:

- 1) miglio perla - cotone - sorgo
- 2) miglio perla - sorgo - cotone

Condizioni meteorologiche avverse come, ad esempio, un ritardo delle piogge durante il periodo di raccolta è molto comune nelle aree di coltivazione del miglio perla soggette a

frequenti precipitazioni: tale situazione si traduce in perdite economiche per gli agricoltori a causa del fallimento parziale o totale del raccolto; per superare questa situazione c'è una necessità di adottare o seguire sistemi di coltivazione come la consociazione o coltivazione mista (Khairwal et al., 2007).

### **3.3.2. Consociazione**

La consociazione è promossa come un promettente mezzo per ridurre le avversità ambientali, in particolare per le attività agricole a basso input. Si sostiene che utilizzando due specie diverse, risorse importanti come acqua e sostanze nutritive possano essere utilizzate in modo complementare (Nelson et al., 2021).

La consociazione di miglio perla e arachide è il sistema che viene più fortemente raccomandato agli agricoltori che vogliono soddisfare le richieste di foraggio per l'allevamento degli animali da reddito.

Con particolare riferimento all'agricoltura delle terre aride, un tale schema di coltivazione deve essere progettato in modo tale che nel caso di condizioni climatiche sfavorevoli, almeno una parte del raccolto possa essere venduta e permettere una remunerazione economica soddisfacente.

Le rese aggiuntive con la componente di consociazione sono state realizzate sotto vari sistemi: dal momento che una coltura leguminosa viene coinvolta nella maggior parte dei casi, questa non solo aumenterà il reddito dell'agricoltore, ma fornirà anche le proteine necessarie per integrare la sua dieta, oltre a contribuire a migliorare la fertilità del suolo.

### **3.3.3. Coltivazione mista**

La coltivazione mista si riferisce alla crescita simultanea di più colture nello stesso terreno sotto forma di consociazione senza alcun modello definito. Il raccolto misto di miglio perla – caiano (*Cajanus cajan*) o fagiolo cluster (*Cyamopsis tetragonoloba*), entrambe colture leguminose, costituiscono il sistema di coltivazione misto più diffuso in India.

Questo metodo viene praticato nell'agricoltura tradizionale di sussistenza per soddisfare le esigenze domestiche della famiglia dell'agricoltore, pertanto, il numero di colture varia a seconda delle esigenze familiari. Bisogna considerare che la produttività delle

colture sarà bassa a causa della competizione tra le colture per acqua, luce e sostanze nutritive (Khairwal et al., 2007).

### **3.3.4. Lavorazioni del terreno e semina**

Riguardo alle lavorazioni preliminari alla semina, il miglio perla necessita di una preparazione del terreno simile a quella dei cereali, con lavori di aratura e successivamente di sminuzzamento delle zolle (Baldoni e Giardini, 2000). Metodi di lavorazione conservativi come il no-tillage e minimum tillage possono risultare convenienti nei terreni suscettibili a fenomeni di erosione oppure nel caso di terreni argillosi, in quanto viene migliorato il controllo relativo alla profondità del seme nei terreni più compatti, riducendo anche la probabilità di andare incontro agli eventi erosivi (Lee et al., 2012).

L'epoca e la modalità di semina dipendono principalmente dall'ambiente di coltivazione e dalla destinazione della coltura. Nelle zone temperate la semina va effettuata alla fine della primavera o inizio estate con seminatrice a file o di precisione; le dosi di seme possono variare dai 6 – 10 kg/ha con file spaziate 35-50 cm per la coltura da granella, e fino a 35-40 kg/ha, con semina a spaglio, per la coltura da foraggio (Baldoni e Giardini, 2000). Bisogna tenere presente che trattandosi di un seme di piccole dimensioni la profondità di semina deve essere compresa tra 1,3 – 1,9 cm, in quanto a profondità più elevate il seme non riuscirebbe ad emergere nel terreno (Lee et al., 2012).

### **3.4. Fattori che influenzano la tecnica colturale**

La densità d'impianto e le distanze sulla fila e tra le file sono tra le pratiche agronomiche che influenzano maggiormente la resa in granella e le sue componenti nel miglio perla, in quanto determinano la competitività per l'approvvigionamento idrico e dei nutrienti durante la stagione di crescita.

Sono state riportate osservazioni controverse riguardanti la risposta di diversi genotipi in termini di elevate densità di piantagione, distanza sulla fila o interfila. Alcuni autori riportano che le piante con ampi sestri d'impianto (che riflettono *canopy* meno dense) presentavano migliori parametri di crescita e sviluppo rispetto a quelli con sestri più ristretti, altri hanno riportato un aumento lineare della resa e delle sue componenti in



risposta all'aumento della densità delle piante, mentre altri ancora non hanno riscontrato variazioni rilevanti tra alte e bassa densità d'impianto in riferimento alla produttività in granella; i risultati contraddittori riportati hanno proposto che la densità ottimale di semina varia in funzione del genotipo e dell'ambiente e deve essere adattata ad ogni specifico contesto agronomico (Shaalan et al., 2021). Di seguito vengono riportate le differenze più significative che sono state riscontrate al variare dei fattori sopra elencati.

### **3.4.1. Densità d'impianto**

La densità d'impianto o di semina è una variabile molto importante per la crescita e la produttività di genotipi differenti e assume valori diversi in diverse aree geografiche. Negli ambienti aridi e nei terreni a bassa fertilità, nei quali l'accrescimento culturale è fortemente limitato, l'accuratezza e l'adeguamento di questo parametro diventano fattori fondamentali per ridurre al minimo la competizione tra le piante e garantire un'efficienza elevata nell'uso delle risorse. Generalmente, quando la coltivazione è finalizzata alla produzione di granella è opportuno diminuire la densità d'impianto, ciò assume un'importanza notevole in condizioni climatiche di aridità; viceversa se l'obiettivo è quello di produrre foraggio è conveniente incrementare il numero di piante. In ogni caso bisogna fare attenzione ad aumentare la densità di piante per unità di superficie, in quanto si verifica una maggiore competizione per la radiazione luminosa, acqua e le sostanze nutritive lungo il ciclo di vita della pianta.

Shaalan et al. (2021) hanno condotto delle prove sul campo valutando gli effetti della variazione della densità di semina su importanti caratteri agronomici, come altezza della pianta, numero totale di germogli, lunghezza e peso del panicolo, e produttività; di seguito si riportano i risultati più significativi.

**Altezza:** l'altezza della pianta è una caratteristica agronomica molto importante, ed è direttamente proporzionale alla crescita della coltura. I dati hanno dimostrato che un aumento consistente dell'altezza è correlato positivamente con l'aumento della densità, pertanto, l'aumento della competitività dovuta all'elevata densità d'impianto determina la produzione di piante più alte. Ciò è motivato dal fatto che le piante in condizioni di elevata densità tendano a utilizzare l'allungamento dello stelo come un meccanismo comune per aumentare le loro possibilità di cattura più luce.

Tuttavia, è doveroso precisare che le piante più alte di solito hanno steli più sottili e sono quindi più suscettibili all'allettamento, che potrebbe compromettere l'utilizzo delle più alte densità.

**Numero di accestimenti:** è noto che la numerosità di piante per unità di superficie influisce in modo significativo sul numero totale di culmi: la capacità del miglio perla di compensare efficacemente la minore fittezza di semina potrebbe spiegare il numero più alto di accestimenti prodotti con densità inferiori. I dati ottenuti hanno dimostrato che densità basse (47.600 piante/ha) e intermedie (57.100 piante/ha) non solo hanno prodotto un numero maggiore di culmi, ma questi sono stati convertiti per una quota pari a circa all'89-90% in panicoli produttivi, rispetto all'82% ad alta densità di impianto.

Il potenziale elevato di produzione di germogli è un adattamento fenotipico molto importante per garantire la stabilità della resa in sistemi di coltivazione in condizioni desertiche aride estreme. Risulta quindi molto utile identificare i genotipi con un'elevata capacità di produrre germogli con possibilità di favorire la loro incorporazione nell'allevamento per aumentarne l'adattabilità.

**Lunghezza e peso dei panicoli:** il miglio perla, in generale, è caratterizzato da panicoli corti e compatti. Nel presente studio la più alta densità di piante (71.400 piante/ha) non era a favore della lunghezza e del peso del panicolo e del peso di 1000 semi, viceversa buone performance sono state ottenute con densità intermedie, mentre i panicoli con peso più elevato derivavano dalla più bassa densità di piante.

**Produttività:** sono stati riportati risultati contraddittori per quanto riguarda la risposta della variazione della resa in risposta alla densità: alcuni ricercatori hanno indicato che generalmente la resa in granella aumenta all'aumentare della densità, altri hanno riferito che le densità elevate tendevano a produrre più paglia rispetto alle rese di granella; nel presente studio la più alta densità di piante non era a favore della produzione di cariossidi.

Ciò si può spiegare dal fatto che con densità elevate le piante sono soggette ad un'elevata concorrenza per le risorse e, quindi, sono spinte alla maturazione precoce come meccanismo per sfuggire allo stress dovuto alla competizione intraspecifica che si riflette direttamente sulla resa in granella. Altri autori hanno confermato che le popolazioni meno dense, maturavano più tardi e producevano più germogli con panicoli più pesanti e, quindi, migliori rese in granella.

In generale, le densità basse e intermedie hanno sostenuto la produzione di un maggior numero di germogli e panicoli con cariossidi più pesanti, i quali si sono chiaramente riflessi su maggiori rese finali di granella con densità intermedia rispetto a quella più bassa. È importante considerare che le piante prodotte con densità ridotte sono anche più resistenti all'allettamento, migliorando la raccolta della coltura.

### 3.4.2. Distanza tra le file

La distanza tra le file e l'interfila sono elementi che giocano un ruolo importante sulla crescita, lo sviluppo fenologico e la resa del miglio perla. In generale, diminuire l'interfila non è una soluzione adeguata, in quanto comporta una maggiore competizione tra le piante per i nutrienti, causando ombreggiamento reciproco e allettamento della coltura (Ullah et al., 2017).

Legwaila et al. (2014) hanno condotto due esperimenti di campo su due varietà autoctone di miglio perla (*Serere 6A* e *Tswana*) durante la stagione di crescita 2009/2010 al Botswana College of Agriculture (BCA, Emirati Arabi), valutando la risposta di questi due genotipi a distanze differenti sulla fila. I trattamenti consistevano in tre diverse distanze sulla fila, pari a 15, 25 e 35 cm con interfila costante di 75 cm, ognuno dei quali è stato replicato per quattro volte in un sistema di blocchi completamente randomizzati (RBCD); i dati ottenuti vengono riportati di seguito.

**Altezza:** i risultati hanno mostrato che non c'erano differenze significative tra i sestri d'impianto delle due varietà di miglio per il periodo di prova, tuttavia, un sesto più elevato per la cultivar *Serere 6A* ha rivelato una quantità significativa di piante più alte rispetto ai sestri più stretti; ciò può essere spiegato dal fatto che l'interfila era troppo larga (75cm), con conseguente produzione di piante più alte rispetto a quelle ottenute con distanze minori.

**Area fogliare:** i dati ottenuti nell'ambito dell'area fogliare hanno rivelato che dalla nona settimana fino al termine delle prove le piante coltivate con le distanze maggiori (35 × 75 cm) presentavano le foglie di dimensioni maggiori rispetto a quelle con distanze più strette, confermando i risultati di un precedente studio nel quale le foglie erano più grandi con piante seminate a distanza di 90 cm rispetto a 50 cm. Ciò può essere dovuto alla minor competizione tra le piante per luce, acqua e nutrienti.

**Numero di foglie e accestimenti:** non sono state osservate differenze rilevanti riguardo al numero di foglie, mentre per quanto riguarda il numero di accestimenti è stata

registrata una produzione maggiore nelle piante coltivate a distanze più ampie rispetto a quelle coltivate con sesti d'impianto più ristretti tra la quinta e l'undicesima settimana, nessuna differenza nelle settimane successive. Entrambe le varietà hanno prodotto la sostanza secca totale più elevata alla massima spaziatura degli impianti (35×75 cm) rispetto alla spaziatura più stretta.

Sulla base di queste prove, si può concludere che il sesto d'impianto più ampio ha portato a performance migliori rispetto a quello più stretto per tutti i parametri di crescita e sviluppo che sono stati misurati.

### **3.4.3. Fattori che influenzano la tecnica culturale nel miglio perla da foraggio**

Le pratiche agronomiche per massimizzare la produttività e la qualità sono ancora in fase di perfezionamento per il miglio perla da foraggio. L'adeguamento della data di semina è fondamentale, soprattutto per gli ecosistemi aridi e semi-aridi, poiché viene direttamente correlato alle sfide dei rischi di riscaldamento che queste regioni devono affrontare. Un accurato processo decisionale in merito alla data di semina non è solo importante per ottenere la massima resa e qualità del prodotto finale, ma anche per ridurre i costi complessivi delle pratiche agricole eliminando i costi di manodopera e risemina.

Salama et al. (2020) hanno valutato la resa e la qualità di cinque genotipi di miglio perla per la produzione foraggera a 3 differenti date di semina, riportando che la variazione della data d'impianto ha avuto scarso effetto sulla resa e sul contenuto di sostanza secca delle cultivar testate, che dipendeva molto dall'epoca di taglio: la resa significativamente più elevata è stata riportata nel primo taglio della coltura a semina precoce, mentre il rendimento meno rilevante si è verificato al terzo sfalcio della pianta a semina tardiva. L'impianto precoce è quindi accompagnato da un fotoperiodo prolungato, con conseguente produzione di piante più alte, che risulteranno in una maggiore produzione di foraggio; invece optando per una semina tardiva, la temperatura sarà più elevata e ciò provoca la maggiore crescita del fusto rispetto alla crescita delle foglie e incrementando lo spessore cellulare; questi cambiamenti morfologici sono solitamente accompagnati da una diminuzione del contenuto di proteina grezza e da un aumento della deposizione di fibre e lignina.

In base a queste informazioni, si deduce che la decisione sull'epoca di semina è comunemente basata sulla temperatura atmosferica e del suolo: è stato dimostrato che la

crescita ottimale del miglio perla si verifica tra i 32 e 35°C, e che la semina successiva ha influito negativamente sulla resa del foraggio e dovrebbe essere presa in considerazione solo per il pascolo a breve termine o per la produzione di foraggio di emergenza.

Se è disponibile l'irrigazione, è necessario apportare da 400 a 600 mm di acqua totale disponibile per massimizzare la produzione di foraggio (Crookston et al., 2020).

### **3.5. Esigenze nutrizionali**

Le basse rese nel miglio perla sono generalmente dovute al fatto che il raccolto viene coltivato in condizioni avverse come terreni poveri, condizioni di pioggia irregolari, etc., inoltre bisogna tenere conto che questo cereale viene coltivato da molti agricoltori in una forma tradizionale di agricoltura, cioè senza alcuna applicazione di fertilizzante e con poco o nessun uso di letame.

Esiste un ampio divario tra la resa media del territorio indiano (meno di 800 kg/ha) e la resa potenziale ottenibile (oltre 3000 kg/ha): la disponibilità inadeguata di nutrienti essenziali sono una delle ragioni di un così ampio divario nella produttività del miglio perla (Khairwal et al., 2007).

L'applicazione in modo equilibrato degli elementi nutritivi aumenta l'assorbimento di minerali come ferro, rame, magnesio e zinco. In secondo luogo, i danni causati da una bassa disponibilità d'acqua nelle prime fasi di crescita sono compensati dalla disponibilità di nutrienti per le piante, infine il miglio fertilizzato tollera maggiormente lo stress idrico che si verifica nelle fasi di inizio fioritura e maturazione rispetto a quello non fertilizzato. Il costo aggiuntivo relativo ad una gestione equilibrata dei nutrienti è giustificato da ulteriori benefici ottenuti attraverso l'aumento della resa anche nelle stagioni siccitose (Uppal et al., 2015).

#### **3.5.1. Azoto**

Tradizionalmente, il miglio perla viene coltivato su suoli marginali senza applicazione di azoto.

Si segnala che gli ibridi richiedono quantità maggiori di questo macroelemento rispetto alle varietà autoctone locali, in quanto le loro rese sono più elevate. Tuttavia, la risposta degli ibridi all'azoto è diversa durante la stagione di crescita poiché la produttività

dipende da molti fattori, tra cui la resa potenziale, la disponibilità di azoto nel suolo, acqua e altri nutrienti. Ciò spiega perché la risposta del miglio perla alla concimazione azotata è variabile, con intervallo ottimale che va da 0 a 150 kg N/ha. È stato dimostrato che gli ibridi e le varietà di colture ad alta resa usano l'azoto in modo più efficiente: tenendo presente la risposta di queste piante alla concimazione azotata, si stima che ogni chilogrammo di azoto applicato abbia restituito 10-15 kg di granella (Ullah et al., 2017). È noto che l'assorbimento e l'assimilazione dell'azoto aumenta con la disponibilità di zolfo e la concimazione azotata combinata con applicazioni di zinco al suolo e/o fogliare ha un effetto sinergico positivo sulla concentrazione di questo microelemento (Uppal et al., 2015). È importante ricordare che nei terreni sabbiosi l'azoto applicato può essere perso a causa di lisciviazione con forti piogge quindi solamente il 50% della dose di azoto deve essere applicata alla preparazione del letto di semina, mentre la restante metà deve essere somministrata dopo circa 25 giorni dalla data di impianto (Khairwal et al., 2007).



**Figura 3.2:** pianta di miglio con carenza di azoto (destra) e una normale (sinistra) (Khairwal et al., 2007).

### **Efficienza nell'uso dell'azoto (NUE)**

NUE può essere descritto come un indice di efficienza aggregato dei contributi alle colture derivanti dall'assorbimento di azoto, dalla sua efficienza e dall'efficacia di acquisizione per convertirlo in resa di granella. Tale indice deriva da due componenti: il primo fa riferimento alla capacità della coltura di assorbire azoto dal suolo, mentre il

secondo indica l'efficienza di utilizzo dell'azoto per produrre cariossidi (Uppal et al., 2015).

NUE può essere determinato dividendo la resa di una coltura per la quantità di azoto applicato migliorare la comprensione di questo indice è essenziale nelle aree in cui gli agricoltori sono poveri di risorse a causa dell'alto costo dei fertilizzanti; l'uso di fertilizzanti azotati sta aumentando quantitativamente, ma la risposta degli ibridi all'applicazione azotata sta sostanzialmente svanendo nel corso degli anni in tutte le colture, compreso il miglio perla. Migliorare NUE è di fondamentale importanza per gli aspetti economici e ambientali: dipende in gran parte da vari fattori agronomici, come lavorazione del terreno, epoca e densità di semina, metodo e irrigazione adeguata. La selezione del materiale d'impianto adeguato (sementi, fertilizzanti), delle variabili di produzione (densità di impianto, applicazione equilibrata e localizzata del fertilizzante) e le condizioni climatiche ideali (temperatura, precipitazioni, radiazione solare) possono migliorare l'efficienza d'uso dell'azoto (25-50%) dei cereali (Ullah et al., 2017).

### **3.5.2. Fosforo**

Il fosforo è essenziale per fornire energia per la crescita e lo sviluppo delle piante, in quanto la disponibilità di questo elemento aiuta ad aumentare l'efficienza dell'uso dell'azoto. Le piante di miglio assorbono il fosforo dalla fase di emergenza fino alla fase di riempimento delle cariossidi (Khairwal et al., 2007). La dose consigliata di  $P_2O_5$  è pari a 100 – 120 kg/ha (Baldoni e Giardini, 2000).

### **3.5.3. Potassio**

Sebbene l'applicazione di potassio non sia praticata regolarmente, questo nutriente svolge un ruolo altrettanto importante, analogamente all'azoto e al fosforo, per la crescita e lo sviluppo delle piante, in quanto fornisce resistenza agli insetti nocivi, alle malattie e allo stress idrico, permettendo alle piante di utilizzare l'acqua in modo economico e migliorando la qualità dei prodotti vegetali. Se le analisi del terreno rivelano che il potassio disponibile è inferiore a 150 kg/ha di  $K_2O$  significa che c'è la necessità di applicare il potassio. L'assorbimento di potassio è maggiore nella prima parte della crescita del miglio perla rispetto a quello di azoto e fosforo quindi la dose va

somministrata interamente alla semina; tuttavia, in terreni leggeri, risulta opportuno effettuare la concimazione in due momenti diversi (Khairwal et al., 2007).

### **3.6. Esigenze idriche**

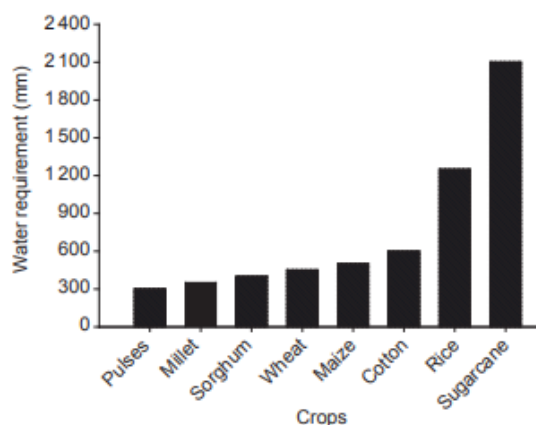
Il fabbisogno ottimale di precipitazioni del miglio perla varia tra 600 e 800 mm, ma può essere coltivato anche in aree che ricevono meno di 350 mm di precipitazioni stagionali. La pianta cresce adeguatamente negli ambienti dove la piovosità durante la stagione vegetativa è variabile tra i 125 e 900 mm; invece situazioni prolungate di clima caldo e secco sono dannose per il raccolto e comportano una riduzione della produttività delle colture. È importante tenere presente che almeno 500 mm annui sono necessari per un'abbondante produzione di foraggio (Khairwal et al., 2007).

La distribuzione delle precipitazioni riferita alla singola stagione di crescita ha un effetto più significativo sulla crescita delle colture rispetto alle fluttuazioni delle precipitazioni annuali. È stato riportato che variazione della resa del miglio perla è correlata con la distribuzione delle precipitazioni all'interno della stessa stagione, con periodi prolungati di siccità e pioggia che sono fattori chiave nella determinazione della resa.

Periodi di pioggia prolungati hanno un impatto negativo sulla resa delle colture quando l'evento piovoso coincideva con l'antesi e lo stadio di maturazione fisiologica, provocando rispettivamente il dilavamento del polline con conseguente scarsa allegagione e condizioni di ristagno idrico nei suoli poco profondi con bassa capacità di ritenzione idrica.

Nelle annate siccitose, le colture utilizzano l'acqua in modo più efficiente con conseguente maggiore produttività dell'acqua: nel caso del miglio perla, i raccolti sono paragonabili nelle stagioni secche e normali, il che indica la predisposizione genetica del miglio perla ad essere coltivato in condizioni di siccità (Uppal et al., 2015).





**Figura 3.3:** confronto delle esigenze idriche del miglio con altre colture (Ullah et al., 2017).

### 3.7. Raccolta

La raccolta si effettua meccanicamente con la normale mietitrebbia con produzioni, in condizioni ideali, prossime alle 6 t/ha (Baldoni e Giardini, 2000).

È importante tenere presente che il seme di miglio perla non si separa facilmente dalle glumette del seme, per cui è necessario regolare accuratamente la barra di taglio per ottenere un raccolto qualitativamente idoneo.

La trebbiatura può essere eseguita già 40 giorni dopo la fioritura quando il contenuto di umidità dei semi scende al di sotto del 15%, ma è necessario abbassare questo valore al 10-12% mediante l'essiccazione artificiale per evitare la comparsa di muffe; il processo essiccativo richiede temperature dell'aria comprese tra 43 e 50°C a 68 m<sup>3</sup>/h, inoltre è fondamentale valutare se gli impianti di essiccazione hanno la capacità di essiccare la granella tempestivamente a causa della piccola dimensione dei semi e della spaziatura dei pori (Lee et al., 2012).

In generale le cariossidi dovrebbero essere raccolte il prima possibile al fine di minimizzare le perdite dovute alla predazione da uccelli e alle condizioni meteorologiche avverse. La fase fenologica migliore per raccogliere il miglio perla corrisponde alla maturazione fisiologica, che può essere rilevata dalla presenza del “black layer” nella parte inferiore della cariosside.

Tradizionalmente, le cariossidi di miglio perla vengono conservate in bidoni di paglia, bambù o contenitori metallici.

## **4. AVVERSITÀ BIOTICHE E ABIOTICHE**

La produttività delle piante agrarie dipende da diversi fattori, molti dei quali non possono essere controllati dall'uomo, le avversità biotiche e abiotiche giocano un ruolo importante in questo contesto. In questo capitolo vengono analizzati i principali ostacoli di tipo biotico e abiotico che compromettono fortemente la coltivazione del miglio perla, prendendo in considerazione anche i meccanismi di difesa che la pianta mette in atto per cercare di ovviare a tali problematiche.

### **4.1. Incidenza dei fattori abiotici**

A questo gruppo appartengono tutte quelle cause di natura non infettiva e non parassitaria che inducono un rapporto squilibrato tra la pianta e l'ambiente in cui vive, tra cui siccità, inondazioni, salinità e tossicità chimica: gli stress dovuti alla siccità e/o alla salinità sono quelli più impattanti sulle colture; al fine di ridurre gli effetti negativi le piante hanno sviluppato diverse strategie di tipo morfologico, fisiologico e biochimico (Taak e Koul, 2018).

### **4.2. Stress da siccità**

Lo stress indotto dalla siccità avviene quando non viene soddisfatto il fabbisogno idrico, con conseguente crescita ridotta, minor accumulo di biomassa e resa più bassa. Si può verificare in qualsiasi fase del ciclo colturale e può influenzare la risposta e la produttività delle piante a seconda del periodo di insorgenza, durata e intensità. Ad esempio, la carenza di acqua in fase di emergenza o alla semina potrebbe comportare una riduzione della resa nello stadio riproduttivo fino al 50%, mentre se lo stress si verifica a fine ciclo può comportare uno scadimento qualitativo (Khan et al., 2016).

Colture di elevato interesse agroalimentare come riso e frumento hanno subito una drastica riduzione della resa in granella pari rispettivamente al 60-70% e al 50% in alcune località soggette a carenza idrica (Zhang et al., 2021).

#### **4.2.1. Risposta delle piante alla siccità**

In generale, la risposta delle piante alla siccità è un fattore complesso, variabile a seconda dei diversi meccanismi morfologici, fisiologici e molecolari, con grandi variazioni genotipiche. L'acqua ha un ruolo cruciale nella maggior parte delle funzioni biologiche delle piante e della loro stabilità strutturale, così come nell'assorbimento di nutrienti dall'apparato radicale a quello fogliare (Khan et al., 2016). Quando si verifica lo stress da siccità, la prima risposta consiste nella chiusura degli stomi, al fine di prevenire la perdita d'acqua attraverso la traspirazione. Le piante coltivate in condizioni di deficit idrico tendono ad avere minore conduttanza stomatica, contribuendo così a conservare l'acqua e mantenere un adeguato stato idrico all'interno delle foglie, ma allo stesso tempo riducendo sia la concentrazione interna di CO<sub>2</sub> fogliare sia l'attività fotosintetica: la relazione precisa dipende anche da altri fattori, come ad esempio il genotipo e le condizioni ambientali (Ghatak et al., 2021). Tuttavia, i genotipi con conduttanza stomatica più elevata sono relativamente sensibili alle alte temperature, in quanto perdono acqua rapidamente rispetto a quelli che chiudono i loro stomi (Serba e Yadav, 2016).

#### **4.2.2. Risposte fisiologiche alla siccità**

Uno dei processi chiave colpiti dal deficit idrico nelle piante è la fotosintesi, a causa della diminuzione della diffusione di CO<sub>2</sub> al cloroplasto. Alcuni genotipi sono in grado di estendere la durata del processo fotosintetico, ritardando la senescenza fogliare per un periodo di tempo più lungo rispetto ad altre varietà: questa caratteristica prende il nome di "stay-green", e viene indotta da una complessa rete di segnali che coinvolge cambiamenti in grado di sopprimere ormoni come l'etilene, l'acido abscissico, il brassinosteroidi e la trasduzione del segnale relativo allo strigolactone, mentre altre variazioni possiedono la capacità di attivare la segnalazione della citochinina e di conseguenza regolare la senescenza fogliare. Le linee pure semi-nane di miglio perla sviluppate negli Stati Uniti contengono il carattere *stay-green* (Serba e Yadav, 2016).

Le piante possono gestire lo stress da siccità attraverso il controllo di alcuni processi fisiologici chiave, come la respirazione e il metabolismo antiossidante e ormonale. La

respirazione è un elemento di vitale importanza per i processi metabolici e svolge un ruolo rilevante nell'ambito della risposta alla siccità; il tasso di respirazione è regolato da processi che utilizzano i prodotti respiratori come l'ATP, NADH e TCA, che contribuiscono alla crescita vegetativa della coltura. In condizioni di aridità, l'attività di questi processi sarà modificata, con conseguente calo del tasso respiratorio, in alternativa, può insorgere una respirazione più elevata a causa della fosforilazione ossidativa, riducendo la generazione delle specie reattive all'ossigeno (ROS).

In condizioni di siccità, i ROS sono generati a causa della perturbazione metabolica cellulare, causano danni alle cellule provocandone anche la morte. Quando queste sostanze nocive vengono prodotte in quantità eccessiva, i substrati antiossidanti come carotenoidi e ascorbato, così come gli enzimi antiossidanti, tra cui SOD, CAT, APX e glutatione reduttasi, persistono negli organelli cellulari e nel citoplasma, svolgendo un ruolo cruciale nella disintossicazione di queste specie reattive. Questi importanti catalizzatori sono prodotti da alcuni processi metabolici, in modo che quando la pianta affronta condizioni di stress idrico, un numero elevato di geni metabolicamente correlati vengano espressi per rispondere alla siccità, in particolare nella specie tolleranti come il miglio perla (Zhang et al., 2021).

Lo stress da siccità spinge anche le piante ad accumulare metaboliti come la prolina, che svolge un ruolo importante come precursore proteico nel metabolismo e nello sviluppo delle piante. Questa molecola funge da eccellente osmolita, e ha un ruolo rilevante come metabolita di difesa e antiossidante. È nota anche per impartire tolleranza allo stress mantenendo il turgore cellulare o l'equilibrio osmotico (Serba e Yadav 2016).

#### **4.2.3. Ruolo dei fitormoni**

In condizioni di aridità, l'omeostasi cellulare è disturbata, lasciando le piante più inclini ad altri stress ambientali e sopprimendo i loro meccanismi di difesa. Per superare questa problematica, le piante devono sviluppare strategie adattive a livello fenologico, morfologico, cellulare e metabolico. Queste risposte sono regolate dai fitormoni e dall'espressione di un insieme di geni (Subbarayappa et al., 2022).

I fitormoni sono fattori centrali che rilevano e segnalano varie condizioni ambientali, come lo stress dovuto alla siccità. La biosintesi dell'acido abscissico è fortemente associata alla risposta allo stress causato dalle alte temperature: se la pianta si trova in condizioni di carenza idrica, tale ormone viene sintetizzato nelle radici e traslocato nelle

foglie, provocandone la chiusura stomatica; questo è un aspetto importante, che ha permesso l'adattamento delle piante alle condizioni di aridità. In generale, nell'ambito della risposta alla siccità o altre sollecitazioni, è stato rilevato che il contenuto di acido abscissico nelle piante è aumentato fino a raggiungere un livello elevato.

Le citochinine sono un fattore regolatore negativo per la crescita delle radici e per la loro ramificazione. La degradazione radicale specifica di questi ormoni potrebbe contribuire alla crescita e alla diramazione della radice primaria, che sono indotte dallo stress da siccità e da un incremento nella sua tolleranza in *Arabidopsis thaliana*.

L'acido jasmonico (JA) e i suoi metaboliti, collettivamente noti come jasmonati, hanno origine dalla via dell'ossidazione lipidica. La segnalazione di questo composto è associata alle risposte allo stress, comprese le risposte di difesa contro le avversità biotiche, come agenti patogeni e insetti.

È stato riscontrato che il miglio perla può tornare a uno stato stazionario dopo un breve periodo di siccità per effetto di alcuni cambiamenti nell'espressione genica, fisiologica e biochimica. Inoltre, alcuni geni che partecipano alle vie di trasduzione del segnale dell'acido abscissico sono stati individuati per avere cambiamenti nel loro livello di espressione, ciò implica che il miglio potrebbe intraprendere azioni in risposta allo stress da siccità prima di un'ora (Zhang et al., 2021).

#### **4.2.4. Meccanismi di adattamento alla siccità**

Quando una coltura si trova in condizioni di aridità, può utilizzare più tipi di risposta, a seconda delle condizioni ambientali, dell'intensità, della durata dello stress e dello stadio fisiologico in cui si trova; le risposte allo stress da siccità possono essere suddivise nelle seguenti tipologie:

**Fuga dalla siccità:** le piante sono in grado di completare il loro ciclo di sviluppo prima che si verifichino gravi condizioni di stress, ciò comporta l'adattamento del tasso di maturità, un rapido sviluppo fenologico, una certa plasticità evolutiva e la rimobilitazione degli assimilati al fine di sfuggire alle stagioni secche; tale risposta consente alle colture di completare il loro ciclo di vita prima dell'inizio di una grave deficit idrico. La fioritura precoce costituisce un esempio di fuga dalla siccità.

**Prevenzione:** la capacità di assorbire l'acqua dal suolo risulta migliorata grazie a meccanismi come lo sviluppo di sistemi radicali profondi, i quali garantiscono un

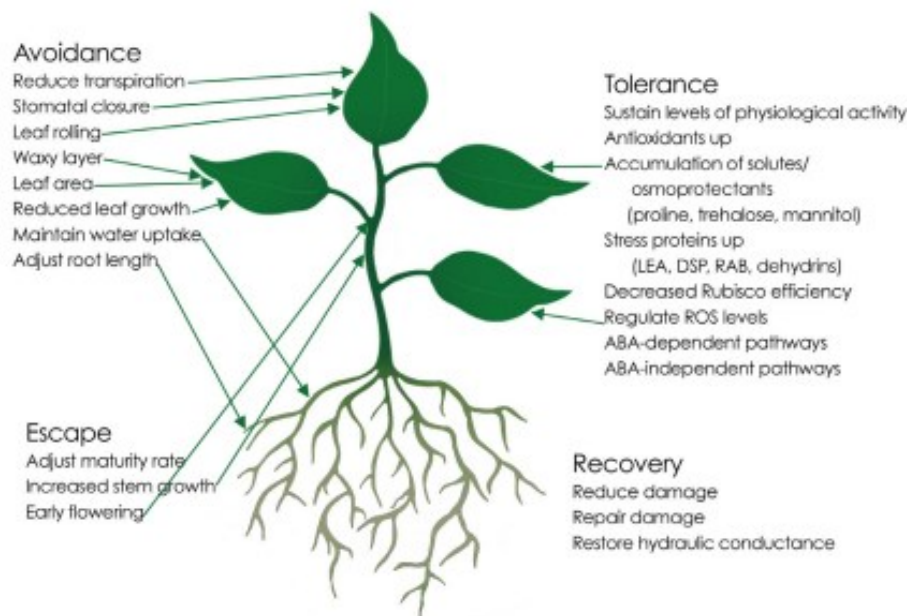
maggior assorbimento della risorsa idrica, oppure mantenendo i processi fisiologici fondamentali in caso di stress lieve o moderato, regolando le strutture morfologiche o i tassi di crescita al fine di ridurre la traspirazione o sostenere l'assorbimento di acqua allo scopo di mantenerne alti i livelli all'interno della coltura. Tali aggiustamenti possono includere la chiusura stomatica, l'arrotolamento delle foglie e l'aumento dell'accumulo di cera sulla superficie fogliare, oltre all'aumento o alla diminuzione del tasso di sviluppo dallo stadio vegetativo a quello riproduttivo, al fine di evitare lo stress da alte temperature

**Tolleranza alla siccità:** si verifica grazie al miglioramento dell'aggiustamento osmotico e aumentando l'elasticità della parete cellulare al fine di preservare il turgore cellulare e dei tessuti; ciò implica la regolazione di centinaia di geni e di una serie di vie metaboliche al fine di ridurre e/o riparare i danni derivanti dal deficit idrico, che a sua volta consente a una pianta di sostenere un certo livello di attività fisiologiche in caso di grave stress.

**Recupero dalla siccità:** questa strategia viene definita come la capacità di una coltura di ritornare a mantenere livelli adeguati di crescita e produttività dopo che si è verificato un grave stress da alte temperature.

**Abbandono della siccità:** avviene riducendo o rimuovendo una parte di pianta: la perdita delle foglie mature in condizioni di stress idrico costituisce un esempio di abbandono della siccità.

**Tratti biochimici e fisiologici inclini alla siccità:** si fa riferimento alle piante resistenti allo stress a lungo termine come, ad esempio, mutazioni e modificazioni genetiche (Ghatak et al., 2017; Khan et al., 2016).



**Figura 4.1:** Meccanismi di risposta delle piante alla siccità (Khan et al., 2016).

#### 4.2.5. Risposta del miglio perla allo stress da siccità

Di seguito si riportano i meccanismi grazie ai quali il miglio perla è in grado di affrontare e superare le condizioni di deficit idrico.

**Fuga dalla siccità:** anche in condizioni favorevoli, la pianta tende ad avere un ciclo colturale più breve rispetto ad altri cereali, in quanto possiede il meccanismo di fuga dalla siccità (fioritura precoce) che ha ereditato dai suoi progenitori selvatici, essendosi evoluta in ambienti semi-desertici con brevi cicli di vita, di conseguenza il periodo di riempimento delle cariossidi sarà più breve rispetto ad altre colture cerealicole e i semi presenteranno una dimensione ridotta. La rimobilitazione degli assimilati al fine di compensare la riduzione del processo fotosintetico, la riduzione dell'area fogliare tramite l'accartocciamento delle foglie e la rugosità della superficie delle foglie in grado di limitare la perdita d'acqua e indurre una maggiore riflettanza luminosa sono alcuni dei caratteri che hanno un'importanza vitale per la tolleranza della pianta allo stress causato dalle alte temperature (Serba e Yadav, 2016).

Grazie a questo meccanismo, il miglio è in grado di adattarsi alle condizioni climatiche nella maggior parte delle regioni aride e semi-aride dell'Africa e dell'Asia, le quali consentono la coltivazione solamente se il periodo di crescita è di breve durata (Jukanti et al., 2016).

**Tolleranza alla siccità:** attraverso la tolleranza alla siccità, la pianta è in grado di mantenere un elevato stato idrico, evitando la disidratazione; questo concetto dimostra che il miglio è in grado di sopravvivere in ambienti nei quali la disponibilità della risorsa idrica è limitata, inoltre i genotipi tolleranti sono in grado di sviluppare in modo adeguato i propri semi e di compensare qualsiasi effetto drastico sulla loro resa.

Varshney et al. (2017) hanno riportato che l'aumento della sintesi di cere cuticolari migliora la tolleranza alla siccità nelle specie *Arabidopsis*, mentre la ridotta produzione è stata associata alla sensibilità alle alte temperature nel riso. Un repertorio arricchito di geni per la sintesi lipidica e l'esportazione di macromolecole nel miglio perla potrebbe contribuire alla sua tolleranza allo stress termico.

**Prevenzione:** l'apparato radicale del miglio perla è caratterizzato da un rapido sviluppo della radice primaria nelle fasi iniziali di crescita ed è in grado di colonizzare in breve tempo lo strato più profondo del suolo, al fine di migliorare l'approvvigionamento idrico; in questo modo la pianta è in grado di riprendersi dallo stress da siccità, producendo nuove foglie o germogli da gemme secondarie e rallentando la perdita totale di acqua (Serba e Yadav, 2016).

**Recupero dalla siccità:** questa strategia di contrasto all'aridità, nel caso del miglio perla, dipende dallo stadio fenologico nel quale si verificano le condizioni di stress: queste vengono analizzate nel paragrafo successivo.

L'insieme di questi meccanismi rendono il miglio perla più resistente agli eventi climatici estremi come siccità e deficit idrico rispetto ad altri cereali, consentendogli di giocare un ruolo importante nel soddisfare le crescenti esigenze alimentari dovute al continuo aumento della popolazione mondiale (Satyavathi et al., 2021).

#### **4.2.6. Danni causati dalla siccità in relazione alle diverse fasi fenologiche**

Considerando il fatto che la siccità è il principale vincolo di produzione negli ambienti di coltivazione del miglio perla, la ricerca si è concentrata nello studio relativo alla risposta della pianta allo stress idrico che si verifica a diverse fasi di crescita, al fine di comprendere l'adattamento della coltura alle condizioni di aridità. È stato dimostrato in modo convincente che gli effetti della siccità sono influenzati dallo stadio fenologico nel quale si verifica lo stress (Yadav et al., 2017). Di seguito vengono riportate le conseguenze relative ai vari stadi fenologici nei quali lo stress si verifica.



**Germinazione – emergenza:** condizioni di aridità che si verificano durante la fase di germinazione ed emergenza causano la morte della giovane piantina, con conseguente resa ridotta e raccolto scarso. L'effetto dello stress da siccità sulla germinazione della plantula dipende dalla disponibilità di acqua, inoltre il deficit che si verifica in questa fase è la causa principale della bassa resa del miglio perla nelle regioni semi-aride.

**Fase vegetativa:** se lo stress si verifica durante la fase vegetativa gli effetti negativi sono scarsi, e si ha un aumento del numero di spighe grazie alla compensazione da parte dei germogli secondari, i quali vanno a rimediare le perdite di quelli principali; inoltre in caso di precipitazioni tardive se ne possono formare di nuovi. Il deficit che si verifica in questa fase comporta una riduzione scarsa o quasi trascurabile della crescita e della resa, grazie allo sviluppo asincrono e al rapido tasso di sviluppo, che consente al miglio di recuperare rapidamente da questa situazione. Tale plasticità fenologica conferisce alla pianta la capacità di adottare la fuga dalla siccità in modo da evitare la fase di fioritura più sensibile fino a quando lo stress viene ridotto (Shivhare e Lata 2017).

**Fioritura e maturazione:** fioritura e maturazione dei semi sono le fasi fenologiche nelle quali la resa viene più fortemente compromessa, a causa della diminuzione sia del numero di spighe per pianta, sia del numero di fiori fertili per spiga e della dimensione delle cariossidi. La scarsa produttività è dovuta principalmente alla riduzione del periodo di riempimento della granella, piuttosto che dalla riduzione del tasso di crescita della stessa, dato che il miglio perla possiede anche la capacità di compensare la perdita fornendo assimilati ai semi e mobilizzando gli zuccheri solubili che sono stati immagazzinati. La relazione tra sviluppo delle cariossidi e il trasferimento di assimilati dalle foglie è stato riportato come un meccanismo centrale di adattabilità del miglio perla allo stress da siccità che si verifica nelle fasi finali del ciclo colturale. Ricerche recenti hanno dimostrato che la pianta in possiede più acqua disponibile durante il periodo di riempimento dei semi ed è in grado di sostenere adeguatamente il processo fotosintetico, grazie ad una fornitura continua di carbonio alle cariossidi durante il periodo critico (Yadav et al., 2017).

È stato dimostrato che la resa in granella è stata ridotta in misura pari al 40-49% quando la carenza idrica si verificava a fine ciclo (Jukanti et al., 2016), e che le cultivar di miglio perla a fioritura precoce, aventi pochi ma efficaci germogli basali, bassa biomassa e alto indice di raccolta (compreso l'indice di raccolta dei panicoli), erano in grado di superare efficacemente gli effetti dello stress se comparati con altri genotipi (Shivhare e Lata, 2017).

#### **4.2.7. Ruolo dei batteri PGPR nell'ambito della tolleranza alla siccità**

Subbarayappa et al. (2022) hanno studiato l'effetto dell'inoculazione di due batteri endofitici (*Shewanella putrefaciens* e *Cronobacter dublinensis*) sulla pianta di miglio perla in condizioni di stress idrico, prendendo in considerazione le variazioni sulla crescita della pianta, sulle caratteristiche fisiologiche, sul contenuto di fitormoni e sui geni sensibili allo stress causato dalla siccità. I risultati ottenuti hanno dimostrato che nelle piante inoculate si è verificato un miglioramento del peso secco dei germogli e delle radici oltre ad un aumento significativo del contenuto di acqua e dell'accumulo di prolina. Tra i fitormoni analizzati, il contenuto di acido abscissico, auxine e gibberelline era significativamente più alto nelle piante trattate. Inoltre, il grado di espressione dei geni coinvolti nella biosintesi dei fitormoni e nella codificazione dei fattori di trascrizione sensibili alla siccità era significativamente più elevato. Pertanto, questi batteri endofitici hanno migliorato la tolleranza del miglio perla allo stress da siccità modulando la crescita delle radici, il contenuto ormonale, la fisiologia e l'espressione dei geni coinvolti nella tolleranza alle alte temperature.

#### **4.3. Danni da salinità**

A differenza di altri cereali, poche informazioni sono disponibili riguardo alla tolleranza all'elevata concentrazione salina in miglio perla.

La salinità costituisce un'importante limitazione di tipo abiotico relativa alle colture delle regioni aride e semi-aride dell'Africa e dell'Asia, caratterizzate da un'elevata evaporazione superficiale, basso livello di precipitazioni e irrigazione inadeguata, con conseguente aumento della quantità di sali solubili che rendono le acque sotterranee non disponibili per le piante.

La salinizzazione diventa più grave nelle aree colpite da intensa siccità, che provoca un aumento del flusso di acqua alla zona radicale delle piante, nonostante il miglio perla possieda una capacità intrinseca di resistere alla salinità del suolo, rendendo possibile la sua coltivazione nei terreni salini per la produzione sia di granella che di foraggio (Shivhare e Lata, 2017).

Diverse prove sperimentali hanno dimostrato che caratteri agronomici importanti come altezza, diametro del fusto, peso fresco e peso secco delle colture sono diminuiti significativamente con un aumento del livello di salinità del suolo (Sharma et al., 2021),

e che la concentrazione dei sali e la percentuale di germinazione dei semi erano inversamente correlati in modo proporzionale, per cui all'aumentare della salinità la percentuale di germinazione diminuisce (Taak e Koul, 2018).

#### **4.4. Incidenza dei fattori biotici**

Le avversità biotiche vengono distinte in avversità non parassitarie (erbe infestanti) e parassitarie di origine animale (insetti, acari, nematodi, molluschi, animali superiori), vegetale (funghi, batteri, fitoplasmi), o determinate da virus.

Di seguito vengono riportati i fattori abiotici più impattanti nella pianta del miglio perla.

#### **4.5. Malattie Fungine**

##### **4.5.1. Peronospora (*Sclerospora graminicola*)**

La peronospora o Downy mildew è la malattia più devastante che affligge il miglio perla: la perdita di resa annua stimata negli ibridi sensibili ammonta a circa il 20-40%, ma potrebbe essere molto più elevata se tali cultivar venissero coltivate in condizioni favorevoli allo sviluppo della malattia.

Questa patologia è causata da un patogeno biotrofico oomicetico che prende il nome di *Sclerospora graminicola*. I sintomi compaiono entro 5-6 giorni dall'ingresso del fungo nella pianta, sono di natura sistemica e si possono riscontrare in qualsiasi momento, dalla fase di emergenza fino a quella di fioritura, anche se in quest'ultima fase si ha la massima suscettibilità. La sintomatologia tipica della peronospora include la sporulazione sulla superficie fogliare, clorosi e crescita stentata, tali sintomi sono di solito indicati come "malattia dell'orecchio verde".

Il patogeno produce spore sia sessuali che asessuali: le spore prodotte sessualmente vengono denominate oospore, e vengono generate solamente quando l'ospite completa il suo ciclo di sviluppo e raggiunge la senescenza, e l'agente patogeno allo stesso tempo completa il ciclo delle spore asessuate. Le strutture denominate sporangiofori liberano gli sporangi, i quali a loro volta producono 1-5 zoospore bi-flagellate, che costituiscono la fonte secondaria di infezione. Queste infettano la pianta di miglio perla dalla fase di emergenza fino alla comparsa della foglia a bandiera. Le oospore possono sopravvivere

nel suolo per diversi anni mentre gli sporangi e le zoospore muoiono rapidamente con l'essiccazione.



**Figura 4.2:** infiorescenze infette da peronospora confrontate con pianta sana (sinistra) (Khairwal et al., 2007).

#### **4.5.2. Brusone (*Pyricularia grisea*)**

Il “brusone” è causato dal patogeno fungino *Pyricularia grisea*: sebbene fosse considerata una malattia minore nel miglio perla fino al 1990, la sua incidenza è aumentata considerevolmente negli ultimi anni ed è diventata economicamente importante sulle cultivar migliorate geneticamente che vengono coltivate. La perdita stimata nella resa dei cereali è stata riportata fino al 60% nelle cultivar sensibili.

La sintomatologia consiste in una maculatura fogliare che compare inizialmente come piccoli granelli o lesioni a forma ellittica, queste sono di color grigio quando sono imbevute d'acqua, ma diventano marroni se essiccate, e sono spesso circondate da un alone inizialmente clorotico che diventerà poi necrotico, dando l'aspetto di anelli concentrici. I sintomi compaiono dall'emergenza alla fase di fioritura e attaccano fusto e foglie, su queste ultime sono stati riscontrati i danni di maggiore entità.

Il patogeno attacca l'ospite svernando sui semi e residui colturali come paglia e stoppie infette; nel seme, il fungo viene trasportato sotto forma di spore conidiali e internamente si stabilisce nella pianta. Le foglie infette fungono da fonte di serbatoio di inoculo entro otto giorni dalla costituzione dell'agente patogeno sui tessuti fogliari che sporulano, liberando un gran numero di conidi nell'aria, i quali fungono da fonte secondaria di

inoculo. Le fasi di emergenza – accestimento sono quelle più suscettibili all’attacco del patogeno.



**Figura 4.3:** sintomi da brusone sulla foglia (Yadav et al., 2012).

#### **4.5.3. Ruggine (*Puccinia substriata*)**

La ruggine che infesta il miglio perla è causata da *Puccinia substriata* var. *indica*. La malattia appare alla fine della stagione, dunque la resa in granella non viene fortemente compromessa. Tuttavia, tutte le fasi di crescita della coltura sono suscettibili all'attacco del patogeno. In un ambiente favorevole, le piante possono deperire prima della fioritura in caso di un'infezione di grave entità. È stato segnalato che questa patologia può causare un danno di entità significativa nel miglio perla coltivato come foraggio, causando una riduzione fino al 51% della resa di sostanza secca digeribile.

Inizialmente si osservano le uredospore, con una colorazione che va dal marrone all'arancione - rossastro, con forma rotonda – ellittica rilevabile sulle foglie. Quando l'infezione assume una certa entità, il tessuto fogliare appassisce e diventa necrotico dall'apice fogliare alla base. Maculature necrotiche possono svilupparsi intorno al gruppo di pustole e può verificarsi un'essiccazione prematura delle foglie. Vengono prodotte le tipiche pustole contenenti le teleutospore di color rossastro – marrone, queste possono essere localizzate sulla superficie inferiore e superiore delle foglie, ma queste ultime sono quelle più comuni (Yadav et al., 2012).



**Figura 4.4:** danni da ruggine in miglio perla (Lee et al., 2012).

#### **4.5.4. Carbone (*Moesziomyces penicillariae*)**

Il carbone, considerato una malattia minore, ha acquisito notevole importanza dopo l'ampia diffusione della coltivazione di ibridi. Questa patologia è più grave alla comparsa delle prime infiorescenze e quando la disponibilità di polline è limitata. I danni possono aggravarsi sulle cultivar che possiedono una fioritura maggiormente sincronizzata e/o uno scarso ripristino della fertilità, specialmente quando le precipitazioni e l'elevata umidità coincidono con l'evento florale, con conseguente scarsa deiscenza dell'antera (Yadav et al., 2012). La perdita di resa stimata ammonta al 5-20%.



**Figura 4.5:** panicoli colpiti da carbone (Khairwal et al., 2007).

#### **4.5.5. Segale cornuta (*Claviceps fusiformis*)**

Questa patologia è facilmente identificabile grazie alla presenza di una sostanza di colore rosa chiaro proveniente da fiori infetti, i quali contengono numerosi conidi. Entro due settimane da queste si formano delle strutture nerastre che sporgono dai fiori al posto dei semi e vengono chiamati sclerozi. La perdita di resa in granella è direttamente proporzionale alla percentuale di infezione in quanto il seme infetto viene completamente trasformato in sclerozio. L'insorgenza e la diffusione della malattia è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche durante il periodo di fioritura. (ICAR-AICRP, 2022).

#### **4.6. Malattie da insetti**

Più di cento insetti e parassiti attaccano il miglio perla, ma solo alcuni di questi rivestono un'importanza economica significativa. Di questi, la cimice, la mosca del miglio perla e la piralide del fusto costituiscono quelli più impattanti, seguiti dalle larve bianche, dal punteruolo grigio e dalla nottua del pomodoro. Vengono riportati anche i danni che possono essere provocati dagli uccelli, che possono costituire un problema rilevante alla raccolta.

##### **4.6.1. Cimice (*Blissus leucopterus*)**

La cimice è il principale insetto nocivo del miglio perla e il suo controllo è vitale per un raccolto soddisfacente; appartiene all'ordine degli Emitteri, famiglia *Blissidae* e può risultare particolarmente problematico con clima caldo e secco. I danni possono essere causati in qualunque stadio fenologico della pianta, e provocano la morte delle foglie inferiori; inoltre, in caso di attacchi precoci si possono riscontrare gravi perdite di vigoria, con conseguente crescita stentata e morte, mentre le infestazioni pesanti possono anche appassire e uccidere le piante da prima della fioritura fino alla maturazione dei semi. È importante eseguire una diagnosi precoce al fine di prevenire perdite significative (Lee et al., 2012).



**Figura 4.6:** danni da cimice su panicolo di miglio perla (Lee et al., 2012).

#### **4.6.2. Mosca del miglio perla (*Atherigona approximata*)**

La mosca del miglio perla è un dittero che ha assunto un'importanza rilevante in alcune regioni dell'India a causa dei danni provocati, la cui incidenza è stata stimata pari a circa il 23-36% di resa in granella a causa dell'attacco della mosca.

Il ciclo di sviluppo conta diverse generazioni che si susseguono in un'unica annata: la femmina adulta depone circa 40 uova, disposte singolarmente sul lato inferiore delle foglie, e si schiudono in 3-4 giorni; le larve inizialmente attaccano le foglie più giovani, colpendo la parte centrale e causando il danno noto come “Dead Heart”, rilevabile anche per l'odore sgradevole, durante la fase di emergenza della pianta. Successivamente il giovane insetto attacca anche i peduncoli, recidendoli, poi le larve evolveranno allo stadio di pupa nei germogli infestati.

Le misure di controllo fanno riferimento ad una corretta gestione delle pratiche colturali e all'impiego di insetticidi in caso di attacco grave, tenendo presente che il miglio perla è una coltura a basso input, per cui l'uso di prodotti chimici per la gestione degli insetti nocivi è scarso. È doveroso considerare anche che la distruzione e la rimozione delle piante infette facilita il controllo della mosca, se l'attacco si verifica a cadenza regolare (Jambagi, 2022).





**Figura 4.7:** mosca del miglio perla (ICAR-AICRP, 2022).

#### **4.6.3. Piralide del fusto (*Chilo partellus*)**

La piralide del fusto è un lepidottero ed è uno degli insetti che provoca i maggiori danni sulla pianta di miglio; in India sono attaccate tutte le aree di coltivazione con perdite fino al 20-30% del raccolto totale. La piccola incidenza (4%) si nota inizialmente 15 giorni dopo la germinazione e aumenta gradualmente fino al suo picco (15%) quando il raccolto ha 70 giorni; nella fase di emergenza le larve causano delle perforazioni nelle foglie, fino a causare il “Dead Heart” nelle fasi successive. Come conseguenza di questi attacchi, i panicoli risulteranno privi di cariossidi, provocando quindi un ingente danno economico.

A livello morfologico gli adulti sono di colore grigio – giallastro, la seconda parte delle loro ali presenta una colorazione biancastra e trasparente; le larve appena schiuse sono di colore bianco grigio con testa marrone - nera e hanno piccoli peli e macchie nere sparse sul corpo. La fase larvale generalmente persiste per 14-28 giorni passando attraverso sei fasi di sviluppo, e dopo aver causato delle fessurazioni nel fusto, la larva si impupa al suo interno. L'intero ciclo di vita è completato in circa 6-8 settimane e l'insetto compie 4-5 generazioni all'anno. La larva completamente matura dell'ultima generazione trascorre il periodo di riposo vegetativo nei residui colturali, dove rimane fino alla stagione successiva.

Il monitoraggio a lungo termine avviato in varie località dell'India ha rivelato che nessun singolo metodo di controllo è efficace contro la piralide del fusto, anche se usare un quantitativo di sementi più elevato di 5 kg/ha può aiutare nel controllo di questo insetto.

#### **4.6.4. Larve bianche**

Le diverse specie di larve bianche includono *Anomala* spp., *Holotrichia consaguinea*, *Holotrichia longipennis* e *Holotrichia serrata*. Questo parassita polifago, oltre al miglio perla, attacca anche arachide e sorgo e persiste nei terreni prevalentemente allo stadio larvale nel periodo compreso tra marzo e ottobre. È importante considerare che la problematica nei confronti di quest'insetto è maggiore nei terreni leggeri e sabbiosi piuttosto che in quelli argillosi e pesanti. L'insetto attacca la pianta inizialmente in fase di emergenza, ed in caso di attacco di grave entità si può avere come conseguenza il fallimento del raccolto. Il controllo prevede un approccio integrato; tecniche agronomiche come, ad esempio, un'aratura estiva profonda al fine di eliminare le larve dannose può rivelarsi una strategia efficace.

#### **4.6.5. Punteruolo grigio (*Myllocerus maculosus*)**

I punteruoli grigi sono rilevanti in alcune parti dell'India, occasionalmente può essere un grave parassita del miglio perla. Gli adulti provocano gravi danni alle foglie, se questi sono presenti in numero elevato, l'intero raccolto potrebbe essere danneggiato. L'adulto è di piccole dimensioni, le cui ali sono elitre e di color bianco grigiastro con linee scure.

#### **4.6.6. Nottua del pomodoro (*Helicoverpa armigera*)**

Il danno provocato dalla nottua si osserva nella fase di emergenza della pianta, con le larve che iniziano a danneggiare le parti floreali, penalizzando la produttività sia in termini qualitativi sia quantitativi.

Il calo di resa è stato stimato essere pari al 10-15%. Le uova vengono deposte singolarmente sulle foglie giovani, mentre a livello morfologico la maggior parte delle larve sono di colore marrone verdastro scuro, ma possono anche assumere una colorazione rosa o quasi nere.

Riguardo alla gestione di questo lepidottero, è importante considerare che questo non ha la tendenza a nascondersi nel terreno durante il giorno, ciò facilita notevolmente il suo contenimento. Le pratiche di controllo includono l'uso di trappole a feromoni prima

della fioritura al fine di monitorare l'incidenza e la numerosità della popolazione; si consiglia anche di eliminare il parassita se la raccolta viene eseguita manualmente, ma questa pratica non viene normalmente seguita (Yadav et al., 2012).

#### **4.7. Danni da uccelli**

Gli uccelli possono cibarsi prontamente dei semi di miglio perla dalle piante in campo, causando danni anche gravi in piccoli appezzamenti o quando la raccolta viene posticipata per molto tempo; alcune perdite possono essere evitate seminando a maggio, in modo da raccogliere prima del passaggio degli uccelli migratori tra settembre e ottobre. Il monitoraggio e la raccolta tempestiva sono essenziali per ridurre al minimo i danni agli uccelli (Lee et al., 2012).

#### **4.8. Erbe infestanti**

Come nel caso di altre colture, la flora infestante può causare danni rilevanti nel miglio perla, a causa della competizione che si verifica per l'approvvigionamento di sostanze nutritive, acqua e luce; inoltre la competizione è maggiore in condizioni di aridità nelle quali la risorsa idrica diventa un fattore limitante.

Se il controllo delle erbe infestanti non viene svolto in maniera efficace, si possono verificare perdite di resa anche superiori al 70% (Khairwal et al., 2007).

*Striga hermonthica* è una delle erbe infestanti parassite più diffuse e distruttive che colpisce i cereali, in particolare mais, sorgo e miglio perla. Nelle regioni dell'Africa subsahariana occidentale e centrale, questa pianta parassita costituisce la più importante avversità biotica e che influisce sulla produttività del miglio perla. È stato stimato che in queste zone del continente africano circa il 40% della produzione cerealicola è gravemente infestata da *Striga hermonthica*, inoltre perdite di resa in granella fino al 100% sono state segnalate in cultivar sensibili nelle zone caratterizzate da alti livelli di infestazione da elevate condizioni di aridità (Kountche et al., 2013), mentre in zone come il Burkina Faso la perdita di resa ammonta a circa l'80% del raccolto totale.

L'elevato numero di piante ospiti, la facile dispersione per mezzo di animali e attraverso il movimento di masse d'aria, unita alla capacità dei semi di rimanere vitali nel terreno per circa 14 anni rendono difficile il controllo di quest'erba parassita. Tecniche agronomiche tra cui zappatura e diserbo manuale, rotazione colturale e pacciamatura

sono state proposte come mezzi di lotta nei confronti di *Striga hermonthica*, ma tali accorgimenti si sono rivelati inefficaci in quanto non sono in grado di eliminare il seme sotterraneo della pianta, inoltre la maggior parte degli agricoltori del Burkina Faso utilizza varietà locali di miglio perla, a causa dell'elevato costo delle cultivar migliorate; queste varietà autoctone, oltre a presentare un basso potenziale di resa, risultano anche altamente sensibili all'infestazione.

Un approccio di controllo integrato, che comporterebbe l'allevamento di cultivar resistenti all'infestante, può offrire un'opzione migliore in termini gestionali. Ciò deve essere accompagnato anche da un maggiore accesso alle informazioni e dalla fornitura di un ambiente di coltivazione favorevole al fine di ricavare i massimi benefici dalle cultivar migliorate di miglio perla (Rouamba et al., 2021).



**Figura 4.8:** miglio perla infestato da *Striga hermonthica* (Khairwal et al., 2007).

## **5. PROPRIETA' NUTRIZIONALI**

Il miglio perla grazie a livelli elevati di energia metabolizzabile e proteine, un profilo amminoacidico bilanciato e un quantitativo elevato di fibre e lipidi, risulta nutrizionalmente superiore a molti altri cereali; inoltre costituisce una fonte significativa di micronutrienti, come ad esempio ferro e zinco, i cui contenuti risultano quantitativamente più elevati rispetto ad altre colture cerealicole; ciò è particolarmente valido sia in India sia nell'Africa subsahariana dove, se comparato ad altri cereali e prodotti di origine vegetale, rappresenta potenzialmente una delle fonti più economiche di questi micronutrienti (Boncompagni et al., 2018).

Oltre al consumo umano, la pianta viene impiegata anche come mangime e foraggio e possiede anche un alto valore nutritivo per bestiame, pollame e pesce. La formulazione di mangimi per gli avicoli può aiutare sia a ridurre i costi sia a facilitare la competizione per le fonti di energia tra l'uomo e i monogastrici; i mangimi per pollame integrati con miglio perla sono generalmente superiori al sorgo ed equivalenti al mais nelle diete dei polli da carne, inoltre la coltura ben si presta anche nell'ambito dell'alimentazione animale se le diete sono adattate per accogliere livelli proteici più elevati nella granella (ICAR-AICRP, 2022).

La maggior parte delle tipologie di miglio viene utilizzata per il consumo umano nei Paesi in via di sviluppo, mentre il loro uso è stato principalmente limitato all'alimentazione animale nei paesi industrializzati.

In questo capitolo vengono analizzate le proprietà nutrizionali del miglio perla, in riferimento alla granella destinata all'alimentazione umana, prendendo in considerazione anche il foraggio destinato all'alimentazione animale.

## **5.1. Valore nutrizionale del miglio perla impiegato nell'alimentazione umana**

Le caratteristiche nutrizionali della granella di miglio non sono paragonabili a quelle dei principali cereali, ma sono comunque ottime fonti di carboidrati, micronutrienti e sostanze fitochimiche con proprietà nutraceutiche; inoltre i profili amminoacidici essenziali della proteina del miglio sono migliori rispetto a quelli del mais e il contenuto di niacina è superiore a tutti gli altri cereali (Daníhelová e Šturdík, 2012). Di seguito vengono analizzate in dettaglio tutte le principali componenti nutrizionali.

### **5.1.1. Energia**

Il miglio perla è una ricca fonte di energia (361 kcal/100g), paragonabile ai cereali comunemente consumati come frumento (346 kcal/100g), riso (345 kcal/100g), mais (125 kcal/100g) e sorgo (349 kcal/100g) (Kangama, 2021).

### **5.1.2. Carboidrati e fibre alimentari**

I carboidrati rappresentano i macronutrienti più importanti contenuti all'interno dei semi dei cereali e sono costituiti per lo più da amido, seguito da fibre. Il contenuto medio di carboidrati nei semi di miglio perla è pari al 72,2%, valore inferiore al riso (84,9%) e al

mais (78,1%) ma superiore al frumento (68,8%) (Dias-Martins et al., 2018). Il tenore totale di zucchero solubile varia tra l'1,4 % e il 2,78 %: le componenti principali sono date dal saccarosio, che rappresenta lo zucchero presente in quantità più elevata (1,32 – 1,82 g/100g) e dal raffinoso (0,65 – 0,84 g/100 g), i quali costituiscono circa il 63 % e il 29 % degli zuccheri totali, rispettivamente. Altri composti presenti sono: stachiosio (0,06 – 0,13 g/100 g), xilosio (0,02 – 0,30 g/100 g), galattosio (0,01–0,11 g/100 g) e glucosio (0,36 – 3,65 g/100 g) (Jukanti et al., 2016).

L'amido rappresenta da metà a tre quarti del peso delle cariossidi, e costituisce la principale fonte di energia utilizzata dalla pianta durante il processo germinativo. Il contenuto di questo polisaccaride varia dal 65,8 al 75,3% e si distingue per la cottura rapida, la tendenza ad essere viscoso quando raggiunge un picco elevato, scarsa stabilità durante la cottura, chiarezza della pasta, elevata capacità di legare l'acqua (ma significativamente inferiore a quella dell'amido di mais) e resistenza alla retrogradazione (Daníhelová e Šturdík, 2012).

Il miglio perla possiede un contenuto di fibre pari al 7,8% rispetto al contenuto totale delle cariossidi, superiore al riso (3,5%) e simile al mais (8,1%), ma inferiore rispetto alla segale (16,8%), orzo (14,5%) e avena (*Avena sativa*) (11,8%). Il consumo di fonti alimentari contenenti le fibre dovrebbe essere stimolato in quanto promuove la qualità della vita, riduce i sintomi da depressione, oltre a diminuire l'incidenza di malattie infiammatorie intestinali e problemi cardiaci (Dias-Martins et al., 2018).

### **5.1.3. Proteine**

Dopo i carboidrati, le proteine sono i macronutrienti più importanti contenuti nei semi di miglio perla. Essi presentano un contenuto proteico pari all'11,8%, valore simile al sorgo (10,7%) e superiore rispetto al mais (9,2%) e al riso (8,6%) ma quantitativamente inferiore rispetto all'avena (16,7%), al frumento (14%) e alla segale (13%).

Il contenuto e il consumo di proteine variano a seconda delle caratteristiche genotipiche, del contenuto di umidità del suolo e dall'uso di fertilizzanti azotati (Dias-Martins et al., 2018).

All'interno della cariosside le sequenze amminoacidiche sono allocate nell'endosperma (80%), nel germe (16%) e nel pericarpo (3%). Il germe è ricco di albumine e globuline, mentre l'endosperma contiene le kafirine e le gluteline; è stato riportato che le frazioni di albumina, globulina e glutelina sono ricche di lisina e altri aminoacidi essenziali

(Danihelová and Šturdík 2012). Il miglio perla presenta un contenuto più elevato di aminoacidi essenziali, come leucina (10,7 g/100 g di proteine) e isoleucina (4,4 g/100 g di proteine) rispetto a frumento, riso e avena, ma è anche il cereale che contiene la più bassa concentrazione di metionina (1,1 g/100 g di proteine). Il contenuto di tirosina (2,4 g/100 g di proteine) è inferiore a quello del riso (3,7 g/100 g di proteine), mais (3,9 g/100 g di proteine) e sorgo (4,2 g/100 g di proteine), ma paragonabile all'orzo (2,8 g/100 g di proteine) (Dias-Martins et al., 2018).

Un vincolo nutrizionale all'uso del miglio come alimento è la scarsa digeribilità delle sue proteine in cottura (Danihelová e Šturdík, 2012), ma è stato riportato che tecniche come la decorticazione possono migliorare la digeribilità proteica dal 54% fino al 78% (Jukanti et al., 2016).

È stato dimostrato che la qualità delle proteine contenute nelle cariossidi rispetta le esigenze nutrizionali di un adulto, ma non soddisfa il fabbisogno proteico di neonati e bambini, a causa della bassa quantità di aminoacidi essenziali, nonostante il contenuto di questi componenti sia maggiore rispetto ad altri cereali, come già ricordato in precedenza (Dias-Martins et al., 2018).

<b>Amminoacidi (g/100g proteine)</b>	<b>Miglio perla</b>	<b>Mais</b>	<b>Frumento</b>	<b>Sorgo</b>	<b>Segale</b>	<b>Orzo</b>	<b>Riso</b>	<b>Avena</b>
Leucina	10,7	12,3	6,8	12,9	5,4	6,8	8,2	7,6
Isoleucina	4,4	3,6	3,3	3,7	2,0	3,6	4,1	4,1
Valina	4,9	5,1	4,3	4,6	3,0	4,9	5,8	5,5
Treonina	4,0	3,8	2,8	3,7	2,8	3,4	3,5	3,4
Arginina	4,6	4,9	4,9	3,9	4,4	5,0	8,7	7,1
Lisina	3,1	2,8	2,7	2,1	2,8	3,7	3,5	4,1
Metionina	1,1	2,1	1,7	1,7	1,5	1,9	2,4	1,8
Cisteina	1,5	1,8	2,0	1,9	na	2,0	1,8	2,4
Triptofano	1,4	0,7	1,3	1,2	1,0	1,7	1,2	1,4
Acido glutammico	23,0	18,8	32,8	20,6	22,2	26,1	18,4	21,9
Alanina	8,7	7,5	3,7	8,9	3,9	3,9	5,6	5,2
Prolina	5,8	8,7	15,7	7,7	7,8	11,9	4,7	5,5
Acido aspartico	8,5	6,9	5,5	6,6	5,4	6,2	9,2	8,6
Fenilalanina	4,4	4,9	5,2	5,2	4,2	5,6	5,3	5,3
Tirosina	3,0	4,1	2,1	2,7	1,9	2,9	5,3	3,4
Istidina	2,3	3,0	2,7	1,9	1,8	2,2	2,5	2,4
Glicina	2,7	4,1	4,3	3,7	4,0	3,6	4,5	4,9
Serina	5,2	4,7	4,7	4,9	4,4	4,2	5,2	4,4

**Tabella 5.1:** composizione amminoacidica dei principali cereali agroalimentari (na = non analizzato) (Dias-Martins et al., 2018).

#### **5.1.4. Lipidi**

Il contenuto lipidico delle cariossidi del miglio perla è molto elevato (6,4%), quasi il doppio della quantità contenuta in sorgo (3,4%) e mais (3,3%), ma inferiore all'avena (7,6%). Ciò può essere spiegato dalla dimensione significativa del germe, il quale rappresenta circa il 21% dell'intera cariosside (Dias-Martins et al., 2018).

All'interno del seme i lipidi sono localizzati nel germe, pericarpo e aleurone. Essi si possono suddividere in due categorie: lipidi liberi e lipidi legati. I primi sono pari al 5,6-7,1% mentre i secondi si collocano nell'intervallo dello 0,57-0,90%. La frazione lipidica legata è costituita da lecitina e altri componenti ed è priva di acidi grassi liberi, i quali sono contenuti invece nella frazione lipidica libera, costituita anche da idrocarburi e trigliceridi. Quest'ultima contiene un livello elevato di acidi grassi insaturi, pari al 70,3% del contenuto totale di lipidi liberi (Daníhelová e Šturdík, 2012).

I principali acidi grassi sono: acido linoleico (C18:2), il cui contenuto ammonta circa al 39-45%, acido oleico (C18:1) e acido palmitico (C16:0), in misura pari al 21-27% e al 20-21% rispettivamente (Dias-Martins et al., 2018).

Il rapporto tra le frazioni apolari e le frazioni polari dei lipidi totali è elevato (dal 5,9 al 7,8%), il che lo rende meno adatto per la panificazione.

Si presume che i componenti lipidici siano generalmente i responsabili del deterioramento della qualità della farina di miglio durante la conservazione (Khairwal et al., 2007), inoltre l'alto contenuto lipidico di questa specie può promuovere effetti negativi sulla stabilità di prodotti come le farine, perché gli acidi grassi insaturi sono suscettibile all'ossidazione (Dias-Martins et al., 2018).

#### **5.1.5. Composti fenolici**

Diversi studi hanno dimostrato che il miglio integrale e la sua crusca sono ricche fonti di composti fenolici (acidi fenolici e flavonoidi) e di antiossidanti naturali. Tali composti sono prodotti secondari del metabolismo vegetale e possiedono diverse capacità benefiche, in quanto sono associati a un ridotto rischio di malattie croniche legate allo stress ossidativo.

In generale, i composti fenolici non sono distribuiti uniformemente nelle cariossidi ma si trovano principalmente nel pericarpo, quindi la forma più benefica per consumare il miglio perla è come granella intera. Confrontando la capacità antiossidante del miglio



perla con quella di altri cereali come frumento, riso, mais e sorgo è stato riportato che le cariossidi di miglio perla contengono i composti fenolici con la più elevata attività antiossidante, e che tali composti presentano effetti immunosoppressivi e possono essere utilizzati come integratori alimentari per il trattamento delle malattie autoimmuni (Dias-Martins et al., 2018).

#### **5.1.6. Vitamine e minerali**

Il contenuto totale di ceneri del miglio perla (1,8%) è simile al frumento (1,9%), superiore al mais (1,3%) e al riso (0,9%) e inferiore all'avena (2,5%) e orzo (2,2%). Per quanto riguarda il contenuto complessivo dei costituenti minerali, questo è pari a 2300 mg / 100 g, valore più alto rispetto ai cereali comunemente consumati. Un'analisi più dettagliata ha riportato che fosforo (3338 mg/kg di sostanza secca), potassio (3932 mg/kg di sostanza secca) e magnesio (1333 mg/kg di sostanza secca) si trovavano in quantità maggiori, mentre altri minerali come il calcio (300 mg / kg di sostanza secca), ferro (18 mg/kg di sostanza secca) e zinco (43 mg/kg di sostanza secca) sono in quantità molto più basse.

Per quanto riguarda il contenuto di vitamine, il miglio perla è ricco di vitamine del gruppo B; i semi essiccati e maturi non contengono la vitamina C, mentre le vitamine del gruppo B sono concentrate nello strato di aleurone e germe. La decorticazione dei semi riduce i livelli di tiamina, riboflavina e niacina di circa il 50% nella farina sebbene il contenuto di niacina nel seme decorticato risulti ancora significativo. Questo è il motivo per cui la malattia da insufficienza vitaminica detta pellagra non si riscontra nelle zone in cui il miglio viene consumato in quantità elevate (Nambiar et al., 2011; Dias-Martins et al., 2018).

Costituenti	Miglio perla	Sorgo	Mais	Miglio indiano	Frumento	Riso
Proteine (g)	11,6	10,4	4,7	7,7	11,8	6,8
Lipidi (g)	5,0	1,9	0,9	1,5	1,5	0,5
Fibra grezza (g)	1,2	1,6	1,9	3,6	1,2	0,2
Carboidrati (g)	67,5	72,6	24,6	72,6	71,2	78,2
Minerali (mg)	2300	1600	800	2700	1500	600
Calcio (mg)	42	25	9	35	41	10
Fosforo (mg)	296	222	121	350	306	160
Ferro (mg)	8	4,1	1,1	3,9	5,3	0,7
Zinco (mg)	3,1	1,6	0	2,3	2,7	1,4
Sodio (mg)	10,9	7,3	51,7	49,0	17,1	0
Magnesio (mg)	137	171	40	78-201	138	90
Vitamina A (mg)	132	47	32	/	64	0
Tiamina (mg)	0,33	0,37	0,11	0,42	0,45	0,06
Riboflavina (mg)	0,25	0,13	0,17	0,19	0,17	0,06
Niacina (mg)	2,3	3,1	0,6	1,1	5,5	1,9
Acido folico (mg)	45,5	20	0	0	36,6	8
Vitamina C (mg)	0	0	0	0	0	6

**Tabella 5.2:** valore nutrizionale del miglio perla confrontato con altri cereali (g/100g al 12% di umidità) (Dube et al., 2021).

## 5.2. Valore nutrizionale del miglio perla impiegato come foraggio

Il miglio perla risulta appetibile per il bestiame, ma il suo valore nutrizionale dipende dalla varietà, dalle condizioni di crescita e dai metodi di conservazione. Il valore nutritivo del residuo colturale di miglio perlato dipende dalla composizione chimica e anche da semplici tratti morfologici come il diametro del culmo (maggiore è il diametro, minore è la digeribilità). Il fusto ha un basso valore nutritivo che può essere migliorato con il trattamento con urea, la quale aumenta il contenuto di azoto, l'assunzione di sostanza secca (DM) e la digeribilità.

Il miglio è in grado di crescere in condizioni agronomiche avverse senza perdere valore nutritivo. Il contenuto proteico grezzo del foraggio verde varia dal 6 al 20%. Il foraggio fresco è abbastanza ben digerito dai ruminanti, con digeribilità della sostanza secca (DMD) pari al 66-69%.

In caso di insilamento il contenuto di proteine grezze è basso (dal 4% al 10%) a causa delle perdite proteiche e della bassa frazione di fibre degradabili a livello ruminale.

L'insilato di miglio perla è incline a perdere dal 13% al 23% della sua sostanza secca e fino al 50% della proteina grezza a causa della sua degradazione in azoto non proteico.

Si consiglia di pre-appassire e trinciare il materiale verde prima di avviare il processo di insilamento al fine di prevenire tali perdite (Feedipedia, 2015).

<b>Costituenti</b>	<b>Valore medio</b>	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Sostanza secca (% TQ)	19,4	14,1	28,5
Proteina grezza (% SS)	12,4	6,6	17,0
Fibra grezza (% SS)	29,2	21,1	39,7
NDF (% SS)	64,8	46,1	64,8
ADF (% SS)	34,5	30,7	45,1
Lignina (% SS)	4,2	/	/
Estratto d'etere (% SS)	2,0	1,4	3,0
Ceneri (% SS)	12,3	9,2	15,8
Carboidrati idrosolubili (% SS)	2,7	/	/
Energia lorda (MJ/kg SS)	17,6	/	/
Calcio (g/kg SS)	5,5	2,9	8,5
Fosforo /g/kg SS)	2,8	0,4	4,5
Potassio (g/kg SS)	31,5	16,0	41,9
Magnesio (g/kg SS)	3,2	2,4	4,5
<b>Valori nutrizionali nei ruminanti</b>			
Sostanza organica digeribile (%)	68,5	68,5	75,2
Energia lorda digeribile (%)	65,5	/	/
Energia netta digeribile (MJ/kg SS)	11,5	/	/
Energia metabolizzabile (MJ/kg SS)	9,2	/	/
Azoto digeribile (%)	64,1	51,5	72,3

**Tabella 5.3:** valore nutrizionale del foraggio fresco di miglio perla (TQ = tal quale, SS = sostanza secca) (Feedipedia, 2015).

<b>Costituenti</b>	<b>Valore medio</b>	<b>Valore minimo</b>	<b>Valore massimo</b>
Sostanza secca (% TQ)	90,1	89,6	
Proteina grezza (% SS)	9,6	6,6	
Fibra grezza (% SS)	41,2	/	/
NDF (% SS)	76,0	66,5	
ADF (% SS)	47,7	44,0	
Lignina (% SS)	7,1	5,9	
Estratto d'etere (% SS)	1,4	1,3	
Ceneri (% SS)	10,7	10,0	
Energia lorda (MJ/kg SS)	18,0	/	
Calcio (g/kg SS)	3,7	/	/
Fosforo /g/kg SS)	4,2	/	/
Potassio (g/kg SS)	39,4	/	/
Magnesio (g/kg SS)	2,3	/	/
<b>Valori nutrizionali nei ruminanti</b>			
Sostanza organica digeribile (%)	52,7	52,7	60,2
Energia lorda digeribile (%)	49,4	/	/
Energia netta digeribile (MJ/kg SS)	8,9	/	/
Energia metabolizzabile (MJ/kg SS)	7,1	/	/
Azoto digeribile (%)	46,0	32,9	59,1

**Tabella 5.4:** valore nutrizionale del fieno di miglio perla (Feedipedia, 2015).

## **6. INQUADRAMENTO E DESCRIZIONE DEI FATTORI ANTINUTRIZIONALI**

Alcuni composti chimici come polifenoli, tannini, acido fitico, goitrogeni e acido ossalico sono classificati come componenti anti-nutrizionali e sono presenti nei semi di miglio perla, nello specifico all'interno della crusca (Dube et al., 2021), rappresentando una seria problematica nei cereali destinati al consumo alimentare, in quanto limitano la biodisponibilità, intesa come l'assorbimento di biomolecole come calcio, ferro, zinco e vitamina E nei neonati, nei bambini e nelle donne in età fertile dovuta ad un ridotto assorbimento di questi microelementi nell'intestino (Kumar et al., 2022). Al fine di migliorare la qualità alimentare del miglio perla si rende necessaria la conoscenza di questi fattori per minimizzare la perdita di nutrienti (Sharma et al., 2020). L'acido fitico e i C-glicosilflavoni sono gli anti-nutrizionali più rilevanti dal punto di vista alimentare e salutistico, e vengono analizzati di seguito.

### **6.1. Acido fitico**

L'acido fitico è un antiossidante naturale presente nella maggior parte dei cereali ed è responsabile sia delle reazioni di ossidazione dei semi sia della trattenuta del fosforo inorganico quando consumato (Dias-Martins et al., 2018). Tale composto è il fattore anti-nutrizionale presente in maggiore quantità (179 - 306 mg/100 g), e rappresenta un ostacolo rilevante per la nutrizione e la salute umana, provocando la diminuzione della biodisponibilità di minerali, proteine e altri nutrienti dietetici essenziali per il consumo da parte dell'uomo; infatti l'acido fitico possiede una forte capacità chelante e forma facilmente complessi con cationi come il potassio ( $K^+$ ), calcio ( $Ca^{2+}$ ), zinco ( $Zn^{2+}$ ), magnesio ( $Mg^{2+}$ ) e Ferro ( $Fe^{2+}$ ), riducendo la loro biodisponibilità e creando un deficit nel loro assorbimento. L'acido fitico può essere sintetizzato attraverso due diverse vie metaboliche: la prima viene denominata via lipidica-indipendente e consiste nella fosforilazione sequenziale dell'alcol ciclico a 6 atomi di carbonio mio-inositolo (Ins) e inositolo fosfato (InsPs) mentre il secondo percorso metabolico è chiamato via lipidica-dipendente. Quest'ultima via è presente nella maggior parte delle cellule eucariotiche, compresi i tessuti vegetativi delle piante, mentre la prima via sembra essere predominante nei semi.

## **6.2. C-glicosilflavoni**

Per quanto riguarda i C-glicosilflavoni, la loro produzione dipende dall'attività dell'enzima chiave C-glicosiltransferasi (CGT) appartenente alla famiglia delle glicosiltransferasi 1, e vengono classificati come polifenoli goitrogenici, localizzati principalmente negli strati esterni delle cariossidi e contribuiscono sia alla loro colorazione grigiastria della granella, sia a causare un odore sgradevole nella farina, limitandone fortemente il consumo alimentare. Appartengono a questa categoria molecole come: glucosyl vitexin, glucosyl orientin, vitexin, orientin, rhamnosyl vitexin e rhamnosyl orientin; tali composti sono stabili all'idrolisi e sono biologicamente attivi sia "in pianta" sia come componenti dietetici; il contenuto di C-glicosilflavoni, espresso come equivalenti di glucosil vitexina, varia da 87 a 259 mg/100 g.

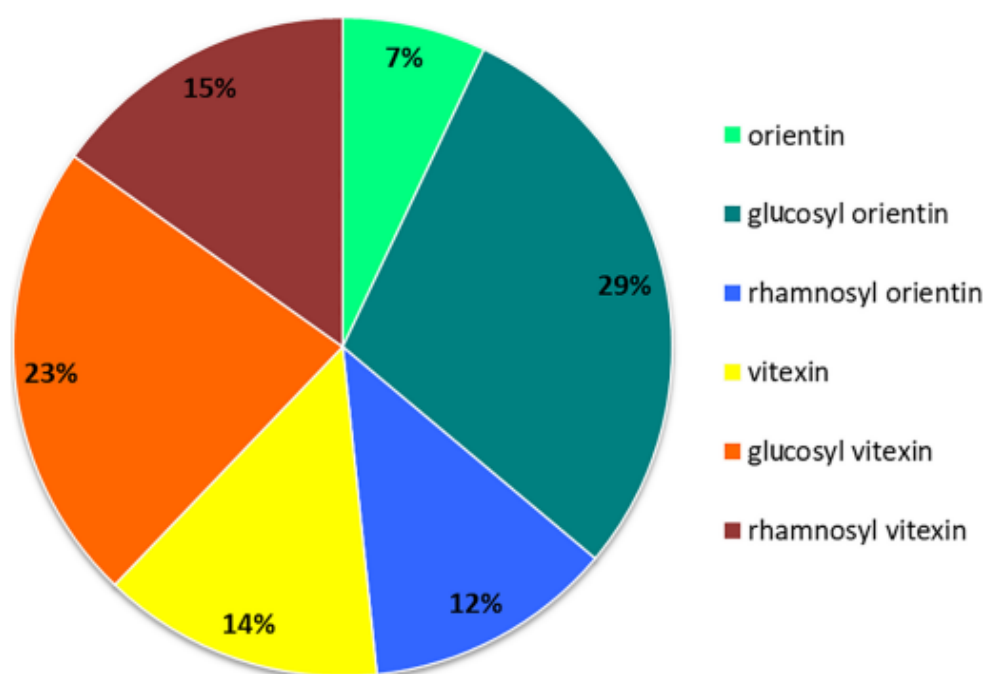
Da un punto di vista salutistico, questi composti fenolici sono implicati in attività biologiche sia benefiche che dannose. Nonostante tutti i loro benefici per la salute, alcuni di essi interrompono l'utilizzo di proteine e amido inibendo l'attività di enzimi importanti, come ad esempio tripsina e amilasi, inoltre interferiscono con numerosi sistemi enzimatici nell'uomo e in particolare con quelli che controllano la sintesi dell'ormone della tiroide, che risulta compromessa. Questo può portare allo sviluppo del gozzo, cioè un gonfiore del collo o della laringe derivante dall'allargamento della ghiandola tiroidea. Ciò è dovuto dal fatto che l'ingestione delle molecole goitrogeniche sopra citate interferisce con lo iodio nel corpo su diversi livelli e causa ipertiroidismo, di conseguenza la ghiandola non è più in grado di sintetizzare quantità adeguate di ormoni tiroidei, portando infine all'allargamento della tiroide e alla formazione del gozzo.

### **6.2.1. Descrizione generale del gozzo**

Il gozzo è una patologia endemica presente in molti paesi poveri in via di sviluppo, ed è ancora prevalente nell'Africa centrale, India, Cina e Asia centrale. Nonostante nella grande maggioranza dei casi il gozzo è causato da una carenza di iodio nella dieta, l'incidenza di questa patologia negli animali e negli uomini con normale assunzione di questo elemento nel cibo consumato suggerisce che ci sono altri fattori nell'eziologia di questa condizione.

Le evidenze epidemiologiche hanno indicato che una dieta basata sul miglio come alimento base, come quello che si trova nei villaggi rurali di Africa e Asia, gioca un ruolo importante nella genesi del gozzo endemico in queste aree; ad esempio il gozzo è risultato essere più prevalente nei villaggi rurali della provincia del Darfur, in Sudan, dove ben il 74% dell'energia alimentare deriva dal miglio, rispetto ad un'area urbana, dove il miglio fornisce solamente il 37% di calorie, anche se il grado di carenza di iodio era simile per entrambe le aree.

È stato dimostrato che l'alta prevalenza della carenza di ferro tra i bambini nelle aree caratterizzate da questa malattia può ridurre l'efficacia dei programmi di distribuzione del sale iodato pertanto è fortemente raccomandato migliorare lo stato di nutrizione del ferro nelle aree dove tale deficit è presente (Boncompagni et al., 2018).



**Figura 6.1:** contributo percentuale di ciascun C-glicosilflavone ai C-GF totali di 96 genotipi di miglio perla (Boncompagni et al., 2018).

### 6.3. Inquadramento generale della malnutrizione

I fattori anti-nutrizionali oltre a provocare varie patologie alla salute umana, come ad esempio la formazione del gozzo, possono anche essere responsabili della riduzione di microelementi come ferro (Fe) e zinco (Zn), provocando la cosiddetta carenza da micronutrienti; tale problematica è dovuta al fatto che non tutti questi costituenti contenuti nella pianta sono biodisponibili per gli esseri umani e gli anti-nutrizionali

interferiscono con l'assorbimento o l'utilizzo di questi elementi. Di seguito si riporta un'analisi delle conseguenze della malnutrizione causata da un deficit nell'assorbimento di micronutrienti, suggerendo le possibili soluzioni a questa importante malattia al fine di garantire la sicurezza alimentare nelle zone dove il miglio perla viene consumato in quantità rilevanti.

A livello globale, la malnutrizione è responsabile di più decessi rispetto a qualsiasi altra patologia legata all'alimentazione, causando più di 20 milioni di morti all'anno (Bouis e Welch, 2010).

L'insufficiente apporto di energia dovuto a macronutrienti come carboidrati, proteine e lipidi porta alla sottanutrizione e le conseguenze sono evidenti nella forma di manifestazioni fisiche come sottopeso e crescita stentata. A differenza dei macronutrienti, che sono richiesti in grande quantità per una corretta crescita e sviluppo, ci sono molti altri elementi nutrizionali che sono richiesti in piccole quantità e vengono chiamati micronutrienti (Kumar et al., 2022); questi fanno riferimento a insufficienze di ferro, iodio, zinco, e vitamina A (Bouis e Welch, 2010), che rappresentano una parte essenziale delle funzioni metaboliche e cellulari di quasi tutti gli organismi viventi.

Le carenze di micronutrienti portano alla "fame nascosta", definita come un tipo di sottanutrizione che si verifica quando l'assunzione e l'assorbimento di vitamine e minerali sono troppo bassi per garantire normali condizioni di salute: viene così definita perché spesso è difficile da individuare, ed è molto pericolosa in quanto indebolisce il sistema immunitario, compromette lo sviluppo psicofisico fino a causare anche la morte.

A livello mondiale l'agricoltura ha raccolto la sfida di garantire la sicurezza alimentare anche alle popolazioni economicamente più fragili durante la "Rivoluzione Verde" avvenuta negli anni '60 del Novecento, concentrandosi principalmente su tre colture di base: riso, frumento e mais. Queste colture fornivano energia sufficiente per prevenire la diffusione di carestie in molte nazioni in via di sviluppo, ma una conseguenza imprevista di questo evento fu il rapido aumento della malnutrizione da micronutrienti. L'agricoltura deve ora formulare nuove politiche che non solo forniscano abbastanza calorie per soddisfare il fabbisogno energetico delle popolazioni più povere, ma anche un livello adeguato di tutte le componenti nutrizionali necessarie per mantenere uno stato di salute adeguato (Bouis e Welch, 2010).



### **6.3.1. Malnutrizione dovuta alla carenza da ferro e zinco**

In riferimento alle carenze da micronutrienti, ferro e zinco sono le più diffuse, e ne soffrono circa due miliardi di persone in tutto il mondo; questi due elementi giocano un ruolo molto importante nel mantenimento e nel rafforzamento del sistema immunitario. Circa il 60% del ferro nel corpo umano è presente come emoglobina, il 25% come ferro prontamente disponibile e il rimanente 15% come mioglobina; questo elemento si riscontra anche in alcune classi di enzimi che sono coinvolti nel metabolismo ossidativo e all'interno della parete cellulare. Questi svolgono un ruolo molto importante nel trasferimento di energia all'interno della cellula, in particolare nei mitocondri.

A differenza del ferro, lo zinco è un metallo di transizione presente in tutto il corpo umano e svolge ruoli importanti nella divisione e nella crescita cellulare. Questo microelemento è essenziale per le donne in gravidanza e per i neonati, garantendo una crescita e sviluppo adeguati: svolge un ruolo molto importante in attività sensoriali, tra cui l'olfatto e il gusto, controlla il rilascio di ormoni come l'insulina e partecipa alla trasmissione di impulsi nervosi. La carenza di zinco provoca difetti nel sistema neuronale e immunitario e può causare anche varie infezioni, ed è stata osservata nel 17% circa della popolazione mondiale.

La bioaccessibilità di questi due microelementi nella farina di miglio perla dipende principalmente dall'attività dell'enzima idrolitico fitasi, oltre che dalla presenza di polifenoli e fibre. Sebbene l'acido fitico sia stato segnalato come il principale fattore inibitorio, la fibra insolubile forma anche complessi tra fibre, fitati e minerali, inoltre cultivar ad alto contenuto di polifenoli sono state riportate per creare complessi insolubili con minerali che ne limitavano l'accessibilità e l'assorbimento dei minerali.

Diversi studi hanno riportato che le vitamine liposolubili come la vitamina A e il  $\beta$ -carotene presenti nei cereali proteggono il ferro dalla chelazione, impedendo all'acido fitico e ad altri composti fenolici di interagire con il ferro, migliorando quindi la sua disponibilità e assorbimento (Kumar et al., 2022).

### **6.3.2. Prebiotici come promotori di micronutrienti**

Un'area molto promettente relativa al miglioramento della biodisponibilità di Fe e altri micronutrienti negli alimenti di base è data dai carboidrati non digeribili come promotori della biodisponibilità dei micronutrienti: questi carboidrati sono classificati

come prebiotici, ovvero sostanze che promuovono la crescita di batteri nell'intestino tenue distale e nell'intestino crasso.

Nell'ultimo decennio, numerosi studi hanno riportato effetti benefici di vari carboidrati non digeribili sull'assorbimento di Ca, Mg, Fe, Cu e Zn anche quando questi venivano consumati in diete contenenti elevate quantità di anti-nutrizionali.

È stato riportato che la somministrazione di comunità batteriche è in grado di annullare gli effetti negativi dei fattori anti-nutrizionali sulla biodisponibilità di Fe e Zn, grazie alla capacità di questi ceppi di degradare molecole come fitato e i polifenoli, rilasciando i loro metalli legati (come ferro e zinco) e permettendo loro di essere assorbiti dagli enterociti che rivestono l'intestino.

Gli effetti sistemici dei probiotici sull'induzione di geni che controllano l'assorbimento del ferro e di altri metalli contenuti nell'intestino sono in grado di migliorare la biodisponibilità di questi micronutrienti.

Oltre agli effetti benefici sopradescritti, i batteri prebiotici sono in grado di migliorare lo stato di salute dell'intestino e la sua capacità di assorbire e utilizzare numerosi nutrienti, regolare il sistema immunitario e fornire protezione in caso di attacco da parte di organismi patogeni.

In base alle informazioni disponibili, è evidente che aumentare il contenuto di questi batteri nelle colture alimentari di base è una strategia estremamente importante per migliorare la qualità alimentare, in particolare nelle famiglie povere di risorse che vivono in ambienti dove la copertura sanitaria non è adeguata (Bouis e Welch, 2010).

#### **6.4. Metodi di lavorazione della granella post-raccolta**

Nonostante diversi studi abbiano dimostrato che il miglio integrale e la sua crusca siano ricche fonti di composti fenolici (acidi fenolici e flavonoidi) e una fonte importanti di antiossidanti naturali, i quali sono associati a un ridotto rischio di malattie croniche legate allo stress ossidativo, si suggerisce che i semi di miglio perla vengano sottoposti ad una serie di lavorazioni finalizzate sia alla riduzione dei fattori anti-nutrizionali sia al miglioramento di questo cereale.

Le tecniche di lavorazione della granella in post-raccolta prevedono la separazione parziale e/o modifica delle tre principali componenti nutrizionali del cereale, che sono date dal germe, dal pericarpo e dall'endosperma, quest'ultimo contenente l'amido (Danihelová e Šturdí-k, 2012).

Il processo post-raccolta del miglio inizia con la separazione delle cariossidi dal panicolo, rimozione delle impurità e pretrattamento (consiste nella rimozione della crusca prima della macinazione, questo processo non viene svolto se si vogliono ottenere prodotti integrali). Successivamente la granella può subire diversi trattamenti, come quelli fisici (decorticazione, molitura, maltazione e sbollentatura e chimici (trattamento acido e trattamento termico a secco) al fine di produrre prodotti alimentari diversificati (Dias-Martins et al., 2018). Di seguito vengono analizzati in dettaglio i diversi trattamenti riguardanti la granella di miglio perla.

## **6.5. Processi fisici**

### **6.5.1. Decorticazione**

La decorticazione rimuove circa il 12-30% della superficie esterna del seme. Un aumento dell'intensità di questo processo comporta una maggiore perdita di fibre, ceneri e oli, oltre alla riduzione di aminoacidi, tra cui lisina, istidina e arginina (Yadav et al., 2012).

La decorticazione può anche essere utilizzata per ottenere semi di colore chiaro con migliore appetibilità, gusto e consistenza inoltre, rimuovendo la crusca, il contenuto di flavonoidi, noti per provocare la pigmentazione grigiastra dei semi, possono essere ridotti fino al 50%. Tuttavia, questo trattamento non sempre risulta efficace e si rendono necessari ulteriori sforzi per sviluppare tecniche volte a rimuovere il pericarpo e il germe senza causare una significativa riduzione dell'endosperma (Dias-Martins et al., 2018).

### **6.5.2. Molitura**

Questo processo migliora le caratteristiche delle varietà di miglio perla che possiedono alte proporzioni di endosperma farinoso (Yadav et al., 2012). La macinazione viene utilizzata per produrre farine con diversa distribuzione granulometrica, ma provoca il rilascio di acidi grassi presenti nel germe soggetto ad ossidazione, riducendo così la shelf-life della farina stessa.

### **6.5.3. Maltazione**

I processi di maltazione tradizionali diffusi in molti paesi in via di sviluppo coinvolgono tre operazioni principali: macerazione, germinazione ed essiccazione. La durata e le condizioni di ogni operazione sono altamente variabili, con conseguente diversità relativa alla qualità del malto e del prodotto derivato (Dias-Martins et al., 2018).

Il malto aumenta anche le vitamine come la riboflavina, la tiamina, l'acido ascorbico e la vitamina A. L'effetto del malto sull'aumento della durata di conservazione della farina è scarso, ed è stato segnalato che la macerazione per 16 ore, seguita dalla germinazione per 72 ore, ha aumentato la digeribilità dell'amido in vitro del 97%, la digeribilità proteica del 17% e lo zucchero totale del 97%.

È stato riferito che il malto di miglio riduce l'acido fitico, un importante fattore anti-nutrizionale, in misura del 23,9 % dopo 72 ore e del 45,3 % dopo 96 ore (Kumar et al., 2022).

### **6.5.4. Sbollentatura**

È una delle tecniche di lavorazione più efficaci per aumentare la durata di conservazione del miglio perla. Avviene solitamente facendo bollire l'acqua a 98°C in un contenitore, quindi immergendo i semi nell'acqua bollente per 30 secondi e asciugandoli a 50°C per 60 minuti. È stato osservato che l'attività enzimatica è stata ritardata, migliorando quindi la durata di conservazione della farina senza alterare in modo significativo il contenuto di nutrienti (Yadav et al., 2012).

## **6.6. Trattamenti chimici**

### **6.6.1. Trattamento acido**

È stato riscontrato che trattare il seme decorticato con acidi organici come l'acido acetico, fumarico o tartarico ha migliorato le caratteristiche qualitative, riducendo i polifenoli e altri fattori anti-nutrizionali, aumentando quindi anche l'accettabilità del prodotto finito da parte del consumatore. Vari studi hanno riportato che l'ammollo dei semi in soluzioni come ad esempio il latte acido, ha ridotto notevolmente la colorazione

degli stessi. Una pigmentazione grigiastria delle cariossidi viene altamente preferita in alcuni stati dell'India, ma nella maggior parte del mondo questo colore non è gradito ai fini alimentari.

#### **6.6.2. Trattamento termico a secco**

L'attività dell'enzima lipasi è la principale causa di deterioramento della farina del miglio perla quindi la sua inattivazione prima della macinazione comporta un miglioramento delle caratteristiche qualitative. L'applicazione del trattamento termico a secco ritarda efficacemente l'attività della lipasi e riduce al minimo la decomposizione lipidica durante lo stoccaggio. Il riscaldamento dei semi per 120 minuti è risultato essere il metodo più efficace per ritardare al massimo la decomposizione dei lipidi durante la fase di stoccaggio; la presenza di acidi grassi liberi e l'attività della lipasi diminuiscono significativamente durante la conservazione per 28 giorni se la farina viene sottoposta ad un trattamento acido di 18 ore assieme ad un trattamento termico (Yadav et al., 2012).

#### **6.6.3. Ammollo dei semi**

È considerato uno dei metodi migliori per ridurre il contenuto di fitato, per effetto della solubilità in acqua di questi anti-nutrizionali, garantendo quindi una maggiore disponibilità di ferro e zinco. È stato riportato che l'ammollo delle sementi insieme all'enzima fitasi ha aumentato la solubilità in vitro di ferro e zinco del 2-23 %. Tale fenomeno si verifica grazie all'attività dell'enzima capace di ridurre l'accumulo di fitato.

Questo trattamento è più efficace se l'ammollo avviene ad alte temperature e con pH leggermente acido; è importante tenere presente che questo processo influisce sulla concentrazione di minerali e proteine.

#### **6.6.4. Germinazione delle sementi**

È stato verificato che la germinazione dei semi per un periodo di 10 giorni aumenta in modo significativo l'attività degli enzimi catabolici, in particolare quella della fitasi,

presente all'interno dei semi, riducendo la quantità di acido fitico per un valore pari circa al 40 % (Kumar et al., 2022).

### 6.6.5. Fermentazione

Si tratta di un processo metabolico nel quale i carboidrati vengono ossidati per rilasciare energia, migliorando la biodisponibilità dei minerali nei cereali destinati al consumo alimentare. Questo processo se svolto in un arco temporale pari a 12 - 24 ore è in grado di diminuire notevolmente i contenuti di acido fitico e tannini (Coulibaly et al., 2011). È stata osservata una riduzione pari all'88,3 % del contenuto di fitati in risposta al trattamento con *Saccharomyces diasticus*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Lactobacillus brevis* e *Lactobacillus fermentum* a 30 °C per 72 ore.

### 6.6.6. Trattamento con fitasi

L'enzima fitasi è in grado di ridurre l'acido fitico (IP6) in forme inferiori, come IP5, IP4, IP3, IP2, IP1 e myo-inositolo. Rispetto ai metodi sopradescritti, questo è il migliore, in quanto riduce notevolmente la quantità di acido fitico senza alterare le componenti nutrizionali (Yadav et al., 2012).

Trattamento	Antinutrizionali (mg/100g semi)	
	Polifenoli	Acido fitico
Non trattato (controllo)	755	858
Maltazione (48h)	449	481
Sbollentatura	529	565
Trattamento acido (24h)	182	153

**Tabella 6.1:** riduzione dei fattori anti-nutrizionali mediante diverse tecnologie di lavorazione (Jukanti et al., 2016).

## **7. MIGLIORAMENTO GENETICO DEL MIGLIO PERLA**

I programmi di miglioramento genetico sono più difficili da applicare nel miglio perla rispetto alla maggior parte delle altre colture, principalmente a causa della scarsa disponibilità di risorse economiche; di conseguenza, i piani nazionali di sviluppo hanno avuto un ruolo molto marginale e sono iniziati solamente di recente. Inoltre, prendendo come riferimento i Paesi sviluppati, quasi nessuna esperienza è stata acquisita sulla tecnica di coltivazione del miglio che potrebbe essere trasferita ai territori in via di sviluppo, come è stato fatto per il frumento e per il mais. Laddove sono state sviluppate nuove metodologie di miglioramento, l'adozione è stata scarsa, in parte a causa di un'estensione inadeguata, in parte al fatto che molte nuove tecnologie potrebbero non adattarsi alle esigenze degli agricoltori (Yadav e Rai, 2013).

In questo capitolo vengono analizzati i principali risultati che sono stati raggiunti nell'ambito del miglioramento genetico, prendendo in considerazione il miglioramento della produttività delle cultivar, della tolleranza ai fattori biotici e abiotici e della qualità alimentare del miglio perla.

Esistono buone prospettive per migliorare e stabilizzare le rese a un livello più elevato, ma ciò richiederebbe studi più approfonditi, tenendo conto delle passate esperienze di coltivazione del miglio perla nelle zone aride. Sarebbe necessario coinvolgere tutte le parti interessate, della ricerca, della produzione e fornitura di sementi, all'adozione tecnologica e al suo potenziamento (Yadav et al., 2017).

### **7.1. Miglioramento delle cultivar**

#### **7.1.1. Tappe del miglioramento genetico in India**

Il miglio perla è una specie prevalentemente allogama, con frazioni di fecondazione incrociata superiori all'85%, a causa della fioritura di tipo protogino. Pertanto, le

singole piante delle popolazioni naturali si incrociano in modo casuale e i loro genotipi sono altamente eterozigoti ed eterogenei.

I programmi di miglioramento genetico vennero avviati nel territorio indiano negli anni '30 del Novecento e tentarono di capitalizzare la variazione genetica contenuta all'interno delle razze autoctone tradizionali sottoponendole a una semplice selezione massale (Yadav et al., 2021). Sono state riportate tre diverse fasi relative allo sviluppo di varietà migliorate in India: nella fase pre-ibrida (1950-1965), il miglioramento genetico si è concentrato prevalentemente sul miglioramento della resa nei materiali adattati localmente, con conseguente rilascio di un buon numero di varietà a impollinazione libera (OPV).

Analogamente alla pianta di mais, l'eterosi è stata osservata anche nel miglio perla per quanto riguarda la resa in granella, ma la natura ermafrodita dei fiori di dimensioni ridotte limitava la capacità di sfruttarla a livello commerciale.

Negli anni '50 sono stati effettuati alcuni tentativi di sfruttare il vigore ibrido attraverso lo sviluppo di "ibridi casuali", tuttavia essi non riuscirono ad ottenere risultati soddisfacenti, in quanto la resa non era significativamente superiore rispetto agli OPV, il livello di adattabilità non era tale da conformarsi alle diverse condizioni ambientali, e i programmi di allevamento non erano adeguati. Gli ostacoli relativi allo sfruttamento dell'eterosi furono aggirati con la scoperta della maschio-sterilità citoplasmatica nucleare (CMS), con conseguente rilascio delle linee maschio-sterili *Tift 23A* e *Tift 18A* all'inizio degli anni '60.

L'utilizzo della linea *Tift 23A* ha segnato l'inizio di una nuova fase nell'ambito del miglioramento genetico. Ciò nonostante, la coltivazione di un numero limitato di ibridi caratterizzati da una ristretta base genetica ha provocato la comparsa di epidemie di peronospora, le quali hanno fortemente limitato i risultati impressionanti ottenuti nello sviluppo delle varietà migliorate a metà degli anni '70, di conseguenza l'aumento della produttività è stato di modesta entità (6 kg/ha) nel periodo 1966–1980. L'elevata persistenza di questo patogeno negli ibridi di miglio perla fino al 1980 ha comportato il potenziamento della ricerca sulla diversificazione della base genetica delle linee maschio-sterili. Pertanto, un gran numero di tali linee geneticamente diversificate sono state sviluppate nel periodo 1981-1995, riuscendo a ridurre in maniera importante l'incidenza del patogeno, ed è stato riportato che la produttività era quasi raddoppiata rispetto a quella della fase precedente.



La fase attuale (dal 1996 in poi) ha posto un'enfasi molto maggiore sulla diversificazione genetica sia dei semi sia delle linee parentali. I caratteri che vengono maggiormente considerati riguardano una resa elevata e un maggiore grado di tolleranza alle patologie. In questo arco temporale, la resa in granella è ulteriormente aumentata a 24 kg/ha.

A causa della maggiore produttività in granella degli ibridi rispetto alle varietà OPV si è verificato un rapido allontanamento riguardo alla produzione delle cultivar a impollinazione libera in favore dello sviluppo delle varietà derivanti da incrocio (Yadav e Rai, 2013).

Ad oggi il miglioramento genetico, finalizzato alla produzione di granella, prevede la costituzione di piante a taglia bassa, con poche foglie e con basso indice di accostamento: un simile ideotipo dovrebbe ridurre il rischio di allettamento della coltura e consentire la contemporaneità di maturazione per facilitare la raccolta e limitare i danni da uccelli. L'elevata resa in granella, la resistenza alle malattie e la durata dello stadio di maturazione pari a 75-85 giorni, secondo i requisiti agroecologici, hanno ricevuto la massima priorità. La lunghezza e il diametro dei panicoli sono aumentati rispettivamente da 16,7 a 22 cm e da 2,4 a 3 cm, rispettivamente, mentre il peso di 1000 semi è stato incrementato da 10 a 12 g (Baldoni e Giardini, 2000; Yadav et al., 2021).

Oltre al miglioramento del miglio perla destinato al consumo umano, nell'ultimo decennio i breeders si sono concentrati per migliorare la resa e le caratteristiche qualitative del foraggio di miglio. Ad oggi, quasi tutte le cultivar di miglio perla destinate alla produzione di foraggio disponibili sul mercato si basano su taglio singolo, ma attualmente gli allevatori di bestiame nelle regioni semi-aride richiedono varietà che possono essere sfalciate più volte durante la stessa annata (2-3 tagli/stagione) (Govintharaj et al., 2021) e che risultino migliorate dal punto di vista della digeribilità, aumentando il contenuto dei carboidrati solubili a discapito di quello della parete cellulare, in particolare della lignina, per garantire la fornitura costante di materia foraggera tutto l'anno (Salama, Shaalan e Nasser 2020).

Analogamente alla pianta di sorgo, anche per il miglio perla sono disponibili gli ibridi BMR (Brown Mid Rib), i quali presentano la nervatura centrale marrone grazie a una mutazione naturale; le piante aventi tali caratteristiche sono in grado di limitare la sintesi della lignina, producendo un foraggio più digeribile (Feedipedia, 2015).

<b>Fase</b>	<b>Periodo</b>	<b>N° ibridi rilasciati</b>	<b>Caratteristiche principali</b>
<b>Pre-ibrida</b>	1950-1965	/	Poche varietà OPV, coltivazione prevalente di cv tradizionali
<b>Fase 1</b>	1966-1980	17	Frequenti epidemie di peronospora
<b>Fase 2</b>	1981-1995	40	Coltivazione prevalente di linee geneticamente diverse, con le quali è stato possibile controllare la peronospora
<b>Fase 3</b>	1996-2012	81	Priorità all'adattamento degli ibridi in zone climaticamente differenti

**Tabella 7.1:** sintesi delle quattro fasi del miglioramento genetico in India (Yadav e Rai, 2013).

### **7.1.2. Scelta della cultivar**

Attualmente nel miglio perla sono disponibili due tipi di cultivar commerciali, ovvero ibridi e varietà a impollinazione libera (OPV) (Yadav et al., 2017).

Utilizzando diverse linee maschio-sterili e impollinanti, 90 ibridi sono stati rilasciati negli ultimi 25 anni sia dal settore pubblico che da quello privato. Ciò ha consentito agli agricoltori di scegliere tra un'ampia gamma di cultivar disponibili, con combinazioni di caratteristiche atte a soddisfare le loro esigenze nei diversi ambienti di produzione. Inoltre, la disponibilità e la coltivazione di un gran numero di varietà derivanti da incrocio fornisce un efficace meccanismo di difesa contro le avversità biotiche e abiotiche (Yadav e Rai, 2013).

Confrontando le varietà a impollinazione libera con gli ibridi si possono riscontrare diversi vantaggi per entrambe queste categorie, rendendole adattabili a diverse situazioni: come già riportato in precedenza, gli ibridi presentano un elevato potenziale di resa con un vantaggio sulla produttività in granella pari al 15-30% rispetto alle OPV, inoltre presentano una notevole uniformità morfologica, la quale infonde fiducia tra gli agricoltori per la qualità delle sementi, tenendo conto del fatto che questi sono altamente reattivi ai fertilizzanti e facilmente reperibili sul mercato. Tuttavia, è necessario approvvigionarsi ogni anno di nuovi semi sul mercato, inoltre bisogna considerare che gli ibridi presentano una maggiore suscettibilità alle malattie (Manga e Kumar, 2011).

Nonostante presentino un minore potenziale di resa rispetto alle varietà migliorate, le OPV presentano una notevole variabilità genetica, la quale consente di mantenere una produttività stabile anche in ambienti che rendono difficoltosa la coltivazione e con risorse inadeguate.

Una delle questioni chiave, spesso dibattuta in passato, è stato il vantaggio comparativo degli ibridi e delle varietà a impollinazione libera in condizioni di grave siccità, analizzando i dati secondo i quali le OPV geneticamente eterogenee potrebbero fornire prestazioni stabili in ambienti di siccità imprevedibili. Uno studio completo condotto nelle regioni aride dell'India ha riportato che in tali ambienti gli ibridi fornivano una resa in granella più elevata rispetto alle varietà a impollinazione libera, con una superiorità complessiva del 25%.

Un altro aspetto da considerare riguardo alla scelta della cultivar è che le OPV a differenza degli ibridi possono autofecondarsi e i semi raccolti possono essere riutilizzati dagli agricoltori per un periodo compreso dai 2 ai 3 anni. Tuttavia, una tale opzione comporterebbe una significativa riduzione della resa in granella, pertanto è probabile che gli ibridi svolgano un ruolo molto più importante rispetto alle varietà a impollinazione libera nel migliorare la produttività del miglio perla nelle regioni soggette a siccità (Yadav et al., 2021; Jukanti et al., 2016).

## **7.2. Genetica molecolare**

Gli studi riguardanti la genetica molecolare nel miglio perla sono iniziati nei primi anni '90 con lo sviluppo di una mappa di collegamento genetico basata su marcatori molecolari e sono stati rivisti di recente (Yadav et al., 2012).

Diversi ibridi migliorati sono stati sviluppati attraverso la coltivazione convenzionale, ma non è stato ottenuto alcun successo significativo nell'ambito della tolleranza alla siccità a causa della natura poligenica della stessa. Inoltre, le metodologie tradizionali sono dispendiose in termini di tempo, lavoro, abilità, dipendono dallo stadio di sviluppo ed è associato al *linkage drag*.

Tali limitazioni possono essere superate tramite la selezione assistita da marcatori, la quale offre una rapida selezione dei tratti desiderati indipendentemente dallo stadio di sviluppo.

Il miglio perla è la prima coltura nella quale sono state applicate strategie e strumenti di selezione assistita da marcatori per ottenere varietà migliorate (Satyavathi et al., 2021). Nel 1994 è stata sviluppata la prima mappa di legame genetico: con l'avvento della tecnologia dei marcatori molecolari SSR, questa mappa è stata ulteriormente aggiornata da diversi ricercatori, tali indicatori sono stati ampiamente utilizzati per identificare i loci dei caratteri quantitativi (QTL) associati alla tolleranza alla siccità e alla resa in

granella e possono essere implementati nelle linee parentali d'élite per sviluppare versioni migliorate. Una volta che i QTL o i caratteri d'interesse sono stati introdotti nella cultivar/varietà di elevato pregio agronomico, questi possono essere rintracciati con l'aiuto di marcatori strettamente collegati al QTL o al carattere di riferimento. Questo approccio viene definito "selezione in primo piano", ed è stato impiegato con successo in diverse colture per lo sviluppo di varietà migliorate contro vari tipi di stress biotici e abiotici (Jangra et al., 2019).

Govinatharaj et al. (2021) hanno valutato due serie di ibridi di miglio perla insieme ai loro parentali valutati in più località per i caratteri legati al foraggio con il sistema multi-taglio (due tagli), rivelando una significativa variabilità per tali caratteri, di cui la maggior parte erano prevalentemente controllati dall'azione di un gene ad effetto non additivo. Non è stata osservata alcuna correlazione significativa tra la produttività di foraggio e le caratteristiche qualitative, indicando che queste possono essere migliorate indipendentemente. Sono state identificate dieci regioni genomiche associate ai caratteri qualitativi del foraggio, le quali possono essere ulteriormente migliorate attraverso la selezione assistita da marcatori. I loci genomici significativi e i geni identificati da questo studio gettano le basi per lo sviluppo di cultivar ad alta resa in biomassa con caratteristiche qualitative migliorate, da sfruttare nei futuri programmi di miglioramento genetico del miglio perla coltivato come coltura foraggera.

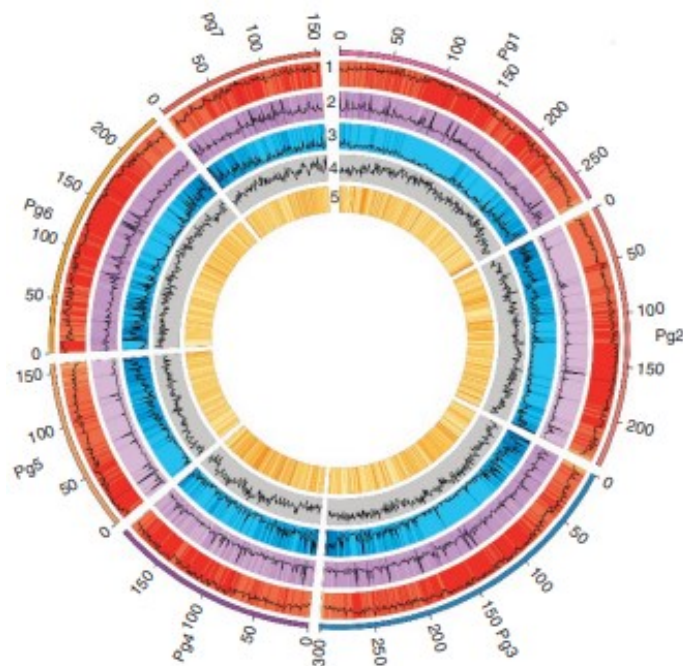
Varshney et al. (2017) hanno sequenziato l'intero genoma del miglio perla: si tratta di un risultato importante in quanto una tale analisi può fornire informazioni su specifiche regioni genomiche o su specifici geni associati a tratti agronomicamente importanti, tra cui la resa in granella e di foraggio.

Per la costruzione del genoma è stata utilizzata la tecnica sperimentale WGS, usata per sequenziare l'intero genoma di un individuo, ed è stato effettuato il sequenziamento del cromosoma artificiale batterico (BAC), plasmide ricombinante che permette la clonazione di lunghi inserti di DNA e presenta un basso numero di copie nella cellula batterica ospite.

La dimensione del genoma del miglio perla è stata stimata in 1,76 Gbasi, indicando che circa il 90% del genoma è stato descritto.

Sia la bozza del genoma sia i dati di rifequenziamento forniscono una preziosa risorsa per la comunità scientifica, la quale dovrebbe facilitare la comprensione della variabilità dei caratteri e di conseguenza accelerare il miglioramento genetico del miglio perla. Tali risultati contribuiranno anche a capire la struttura delle basi genetiche relative alla

tolleranza alla siccità grazie all'identificazione delle famiglie geniche associate a questo carattere. Una comprensione dettagliata della produttività delle colture nelle località soggette a temperature elevate potrebbe consentire il miglioramento delle caratteristiche agronomiche non solo del miglio perla ma anche di altre colture come riso, mais e frumento, le quali attualmente sono in grado di fornire solamente una gamma limitata di prodotti in queste zone. Ciò è particolarmente importante a causa dell'urgente necessità di sviluppare colture cerealicole resistenti ai fattori abiotici nei prossimi anni.



**Figura 7.1:** genoma del miglio perla (Varshney et al., 2017).

### 7.3. Miglioramento per la tolleranza ai fattori abiotici

La coltivazione per una maggiore adattabilità rimane una sfida impegnativa, a causa dell'incertezza in termini di tempo, intensità e durata dello stress idrico, oltre all'ampia relazione tra genotipo e ambiente negli areali affetti da tali problematiche. I fattori principali che sono stati considerati riguardano la tipologia di germoplasma utilizzato, i diversi criteri di selezione implementati e la valutazione e rappresentazione dell'ambiente target durante la coltivazione.

### 7.3.1. Tipologia di germoplasma utilizzato

La tolleranza alla siccità riguarda l'abbinamento tra fornitura d'acqua e richiesta idrica da parte della coltura, pertanto, zone con specifiche disponibilità d'acqua richiedono germoplasmi specifici, con un adeguato tempo di fioritura e una dimensione dell'apparato epigeo che si adatti all'ambiente.

Le specie autoctone provenienti dalle zone aride sono note per avere un buon livello di tolleranza allo stress idrico e sono considerate un ampio pool di geni preziosi non sfruttati, i quali condizionano l'adattabilità allo stress e rendono il materiale di base molto adatto al miglioramento, inoltre è stato dimostrato che la loro resa può essere migliorata notevolmente attraverso una semplice selezione massale, viceversa l'uso di materiale genetico altamente selezionato assicura un alto potenziale di resa ma comporta la necessità di migliorarne l'adattabilità. Varietà autoctone e ibridi contrastano tra di loro, ma possiedono *pathways* complementari riguardo al potenziale di resa sotto stress, suggerendo buone prospettive di differenziare le varietà locali tramite l'ibridazione di materiale genetico selezionato al fine di combinare le caratteristiche di adattamento di tali cultivar con l'alta produttività di quelle migliorate. Incroci tra queste due tipologie di cultivar sono stati riportati per avere un grado di adattabilità superiore alle popolazioni parentali, essendo in grado di sfruttare le loro risorse aggiuntive, e, contemporaneamente, di tollerare in modo più marcato i fenomeni siccitosi. La tipologia del germoplasma utilizzato è relativamente ristretta per le aree aride, a causa della modesta quantità che è stata valutata, della difficoltà di coltivazione e della bassa disponibilità di cultivar precoci. Lo sviluppo di linee maschio-sterili aventi l'abilità di produrre ibridi adattati è ancora molto limitata, in quanto la maggior parte del programma di sviluppo di tali linee è stato condotto in aree meglio dotate; è necessario valutare e identificare una maggior quantità di germoplasma possedente una tolleranza intrinseca agli stress ambientali, al fine di ampliare la base genetica del germoplasma.

### 7.3.2. Ambiente di selezione

La scelta dell'ambiente di selezione può essere eseguita seguendo due diversi approcci, uno diretto e uno di tipo indiretto:

Approccio indiretto: le varietà migliorate per la siccità devono essere valutate sotto condizioni ottimali: questa è una condizione fondamentale per ottenere cultivar con rese elevate, assumendo che quelle selezionate in questi ambienti possano essere ugualmente performanti anche in condizioni climaticamente più ostili. Il vantaggio di questo approccio è quello di una maggiore ereditabilità della resa e delle sue componenti in condizioni ottimali. Il potenziale di rendimento, valutato sotto tali condizioni, è stato identificato come un fattore significativo per la determinazione della performance del miglio perla in condizioni di aridità, pertanto, il miglioramento della produttività potrebbe avere alcuni effetti di ricaduta in condizioni di stress idrico. Ad ogni modo, questo approccio trascura le interazioni tra genotipo e ambiente.

Approccio diretto: questo approccio sostiene che le cultivar selezionate per la tolleranza alla siccità debbano essere selezionate, sviluppate e valutate nell'ambiente di riferimento. Scarse correlazioni sono comunemente osservate tra la produttività misurata sotto stress e quella in condizioni ottimali, le quali sostengono che le rese sotto stress non sono di discreta entità genetica quindi la selezione diretta negli ambienti aridi dovrebbe essere essenziale per ottenere una maggiore produttività. Ciò è ulteriormente confermato dalla presenza di significative interazioni tra genotipo e ambiente.

Molti studi hanno dimostrato che l'alto potenziale di resa ha soddisfatto solamente il 10-15% della variabilità delle performance negli ambienti siccitosi. Ciò ha sottolineato il significato di una maturazione precoce e la valutazione e selezione nelle aree siccitose.

ICRISAT, un importante Istituto di ricerca indiano ha testato, in diverse zone, cultivar sperimentali in località caratterizzate da meno di 400 mm di precipitazioni annue al fine di identificare e rilasciare cultivar adatte per le aree siccitose. Ci sono state ampie indicazioni da altre colture che le cultivar adattate alle condizioni di siccità vengano selezionate, sviluppate e testate alle condizioni dell'ambiente target.

### 7.3.3. Criterio di selezione

La fioritura precoce è il più potente strumento per determinare la resa in condizioni di stress da alte temperature, la quale si verifica nelle fasi finali del ciclo colturale, ed è stata riconosciuta come uno strumento molto utile di selezione, nonostante il suo vantaggio sia esclusivamente dovuto alla fuga dalla siccità piuttosto che alla sua tolleranza.

La variazione genetica per la precocità è abbondante nel miglio perla e una semplice selezione è stata di successo nella maggior parte dei casi. Le cultivar neutrodiurne autoctone provenienti dall'Africa occidentale rappresentano la forma di precocità più utilizzata dai *breeders* in India e Africa. È stato riportato che gli ibridi in grado di prolungare lo stadio di maturazione fino a 75 giorni possiedono una migliore capacità di realizzare alte rese sia di granella, sia di biomassa, con una buona abilità nell'evitare lo stress in fase terminale.

Un altro criterio proposto per migliorare la tolleranza alla siccità è dato dall'indice di raccolta dei panicoli (PHI), il quale rappresenta la capacità della pianta di differenziare e riempire le cariossidi sotto stress idrico. È stato dimostrato che anche in un campione modesto di linee *inbred* (linee pure), l'alta ereditabilità del PHI suggerisce che un significativo guadagno per questo tratto è possibile sotto condizioni di stress da siccità; infine l'elevato accostamento è un altro importante criterio di selezione del miglio perla allevato per resistere alla siccità nelle regioni dove esiste un'abbondante variabilità nel germoplasma e nel materiale di coltivazione.

Alcuni dei modelli matematici sono stati usati per identificare la tolleranza alla siccità delle cultivar confrontando la variazione della resa misurata allo stress in ambienti ottimali. È stato sviluppato l'indice di risposta alla siccità (DRI) il quale è indipendente dalla fuga dalla siccità e dal potenziale di resa ed è un indicatore effettivo della tolleranza alla siccità; in seguito è stato stabilito che l'indice di suscettibilità alla siccità (DSI) dei genotipi potrebbe rappresentare un criterio di valutazione per compartimentare i genotipi adattati allo stress da siccità con la condizione che venga usato insieme alla performance di resa in ambienti siccitosi (Yadav et al., 2017).



<b>Grado di tolleranza dei genotipi</b>	<b>Parte strutturale panicolo (g)</b>	<b>Numero semi per panicolo</b>	<b>Peso singolo seme (g)</b>	<b>Peso totale semi (g)</b>	<b>Peso totale panicoli (g)</b>	<b>PNHI (%)</b>
<b>Condizioni ottimali</b>	5,0	1500	0,0100	15,0	20,0	75
<b>Fioritura precoce</b>	5,0	1500	0,0085	12,8	17,8	72
<b>Tollerante</b>	5,0	1350 (-10%)	0,0085 (-15%)	11,5	16,5	70
<b>Intermedio</b>	5,0	1200 (-20%)	0,0070 (-30%)	8,4	13,4	63
<b>Suscettibile</b>	5,0	1200 (-20%)	0,0050 (-50%)	6,0	11,0	55

**Tabella 7.2:** conseguenze degli effetti dello stress terminale da siccità su genotipi con diverso grado di tolleranza (Vadez et al., 2012).

## **7.4. Miglioramento per la tolleranza ai fattori biotici**

### **7.4.1. *Sclerospora graminicola***

Come già riportato nel capitolo dedicato alla tolleranza ai fattori biotici, la peronospora è la malattia che provoca i maggiori danni nel miglio perla, i quali possono raggiungere incidenze molto elevate quando una singola cultivar geneticamente uniforme viene coltivata ripetutamente ed estensivamente. Sono state elaborate misure di controllo agronomiche e chimiche, ma l'uso di cultivar resistenti è il metodo più conveniente ed efficace. A seguito di una buona comprensione dell'epidemiologia del patogeno, sono state sviluppate tecniche di screening che distinguono in modo efficace le progenie resistenti da quelle suscettibili.

Diversi genotipi, selezioni da accessioni di germoplasma e materiali di riproduzione d'élite hanno mostrato un alto grado di stabilità per la resistenza nel corso degli anni, e le fonti di resistenza identificate sono state utilizzate efficacemente nello sviluppo di linee maschio-sterili resistenti alla malattia. Inoltre, è stata utilizzata con successo anche la resistenza indotta da mutazioni (Yadav e Rai, 2013).

La resistenza alla peronospora è poligenica e controllata da diversi loci dei caratteri quantitativi (QTL), includendo sia geni *minus* che *major*. Molti dei QTL identificati conferiscono solamente una resistenza parziale e raramente un singolo locus ha un effetto rilevante (Jukanti et al., 2016).

Diverse prove di coltivazione hanno indicato che la maggior parte degli ibridi diventa suscettibile in circa 5-6 anni di coltivazione nella stessa area a causa della pressione selettiva nel patogeno, sebbene vi siano alcune chiare eccezioni in cui gli ibridi hanno mostrato resistenza durevole. Sarebbe utile studiare i meccanismi di resistenza nei parentali di tali ibridi per identificare e implementare i geni per una resistenza duratura negli ibridi ad alto rendimento per il miglioramento del guadagno genetico. Anche la sostituzione dell'ibrido suscettibile con la sua versione resistente alle malattie, creata dalla selezione assistita da marcatori, è stata una strategia efficace (Yadav et al., 2021).

#### **7.4.2. *Pyricularia grisea***

Negli ultimi anni l'incidenza del brusone è aumentata significativamente in India, ragione per cui sono state sviluppate tecniche di screening in campo e in serra identificando le principali fonti di resistenza (Yadav e Rai, 2013).

La resistenza della pianta nei confronti del patogeno è controllata da un unico gene dominante e ciò facilita notevolmente la creazione di genotipi resistenti. I marcatori molecolari vengono utilizzati anche per identificare i loci dei tratti quantitativi (QTL) per diminuire la suscettibilità alla malattia contro i patotipi prevalenti (Yadav et al., 2021).

#### **7.4.3. *Puccinia subestrata***

Poiché la ruggine del miglio perla non è una patologia di primaria importanza, non ci sono state molte ricerche sullo sviluppo delle tecniche di screening. Sono stati compiuti diversi sforzi al fine di identificare le fonti di resistenza al patogeno, considerando un

numero elevato di accessioni del germoplasma, valutati per la loro risposta alla peronospora e alla ruggine e identificando diversi materiali resistenti a entrambe queste patologie. È stato dimostrato che la resistenza alla ruggine è sotto il controllo di un singolo gene dominante ma non si escludono i sistemi poligenici caratterizzati da più geni, i quali possono comportare una resistenza di tipo orizzontale. Sono stati identificati due QTL per la resistenza alla ruggine, ma il loro inserimento nelle linee parentali deve ancora iniziare.

#### **7.4.4. *Moesziomyces penicillariae***

La malattia del carbone è più grave negli ibridi con maschiosterilità citoplasmatica (CMS) rispetto alle varietà a impollinazione aperta (OPV) (ICAR-AICRP, 2022). Sono stati compiuti progressi significativi nell'incorporare la resistenza al carbone da materiali non adattati in linee maschio-sterili presenti in commercio: *ICMA 88006* è stata la prima linea maschio-sterile resistente al carbone sviluppata utilizzando questi metodi.

#### **7.4.5. *Claviceps fusiformis***

Tra i vari metodi di controllo, la resistenza delle piante ospiti è considerata la misura di controllo più economica e sostenibile per questa malattia.

Le linee resistenti sono state sviluppate incrociando le piante meno suscettibili con quelle resistenti per diverse generazioni, seguendo procedure di selezione ricorrenti: in questo modo un certo numero di linee sviluppate con questa metodologia hanno mostrato un alto livello di resistenza in diverse località dell'India e dell'Africa occidentale per diversi anni. Le piante scarsamente suscettibili combinate con buone caratteristiche agronomiche sono state anche identificate e utilizzate come donatori per lo sviluppo di varietà resistenti a questo patogeno.

L'ingegneria genetica ha permesso di incorporare la resistenza al *Claviceps fusiformis* all'interno di materiali di elevato pregio agronomico, consentendo l'allevamento di linee maschio-sterili resistenti (*ICMA 91333*, *ICMA 91444* e *ICMA 91555*).

L'ereditarietà della resistenza al patogeno è relativamente complessa, si comporta come un carattere recessivo ed è sotto controllo poligenico (Yadav et al., 2012).

## **7.5. Miglioramento della qualità alimentare**

Il miglioramento delle caratteristiche nutrizionali dei cereali è stato recentemente valutato come un obiettivo importante nell'ambito del miglioramento genetico del miglio perla, soprattutto a causa della diffusione a livello globale delle carenze da micronutrienti, in particolare di ferro e zinco, come già accennato nel capitolo dedicato ai fattori anti-nutrizionali.

L'obiettivo nell'ambito di una qualità nutrizionale migliorata è stato quello di aumentare il potenziale di resa tenendo presente che il miglio perla possiede livelli più elevati di proteine e minerali rispetto ad altri cereali più rilevanti dal punto di vista economico (diversi studi hanno riportato fino al 24,3% di contenuto proteico nel germoplasma e fino al 19,8% in linee di riproduzione d'élite). Tuttavia, non ci sono stati studi specifici atti a migliorare il contenuto proteico, in quanto esso presenta una correlazione negativa con la resa in granella.

È stata indicata una grande variabilità per il contenuto di ferro e zinco nel germoplasma e nelle linee riproduttive, suggerendo la fattibilità del potenziamento genetico per questi micronutrienti. Lo screening di oltre 120 ibridi commerciali indiani ha mostrato un contenuto di 46–56 ppm di Fe e 37–44 ppm, rispettivamente, di ferro e zinco. I livelli di 42 ppm di Fe e 32 ppm di Zn sono stati fissati come riferimento nella politica nazionale indiana sui test e sul rilascio delle cultivar nel 2018.

I contenuti di ferro e zinco sono in gran parte governati dalla varianza genetica additiva. Un'associazione significativa e positiva è stata stabilita tra i due elementi, ed entrambi avevano anche una correlazione positiva e altamente significativa con la dimensione del seme. Tali associazioni semplificano notevolmente il lavoro dei breeders nei programmi di sviluppo tradizionali (Yadav et al., 2021).

### **7.5.1. Ruolo della biofortificazione**

La biofortificazione delle colture di base è un approccio valido, conveniente e sostenibile per affrontare la malnutrizione causata dai micronutrienti. Si tratta di un approccio multidisciplinare, in grado di utilizzare tutto il potenziale del miglioramento genetico finalizzato ad eliminare la problematica della sottanutrizione (Satyavathi et al., 2021).

Le colture biofortificate offrono un intervento su base rurale che, in base alla progettazione, raggiunge inizialmente queste popolazioni più remote, che costituiscono la maggioranza delle persone denutrite in molti paesi, per poi penetrare nelle popolazioni urbane man mano che le eccedenze di produzione vengono commercializzate.

Complessivamente, tre cose devono accadere perché questo processo abbia successo. Come prima cosa, è necessario che l'allevamento delle colture biofortificate fornisca risultati soddisfacenti; per far sì che ciò accada è necessario che un'elevata densità di nutrienti sia combinata con produttività e redditività elevate. In secondo luogo, deve essere accertata l'efficacia, dimostrando che il livello dei micronutrienti all'interno degli esseri umani risulti migliorato quando questi si alimentano per mezzo delle colture biofortificate. Infine, le colture migliorate devono essere adottate dagli agricoltori e consumate in numero significativo da coloro che soffrono di malnutrizione da micronutrienti (Bouis e Welch, 2010).

Il successo del programma di biofortificazione del miglio perla va ricercata nella fenotipizzazione di precisione per la stima del contenuto di micronutrienti nelle cariossidi. Recenti studi hanno dimostrato che il consumo di miglio perla biofortificato in quantità pari a 250 g al giorno è in grado di soddisfare il 100% della dose giornaliera raccomandata (RDA) per lo zinco, e l'84% per quanto riguarda il ferro, mentre le varietà convenzionali forniscono solamente il 20% del fabbisogno nei confronti di quest'ultimo microelemento. Circa il 50-100% del fabbisogno giornaliero di ferro può essere soddisfatto con un pasto di varietà biofortificata, sufficiente per superare la carenza di ferro negli uomini, donne e bambini (Satyavathi et al., 2021).

## **8. USI E CONSUMO DEL MIGLIO PERLA**

A livello globale, il consumo diretto del miglio perla come coltura alimentare è diminuito significativamente negli ultimi tre decenni. Le motivazioni sono numerose, e comprendono una scarsa conoscenza dei benefici nutrizionali e terapeutici, difficoltà nella preparazione di alimenti e mancanza di tecnologie di trasformazione adeguate, oltre alle politiche governative responsabili di aver disincentivato il consumo alimentare della pianta di miglio, favorendo invece l'approvvigionamento di cereali più pregiati a

prezzi sostenibili (Danihelová e Šturdík, 2012). Tutto ciò ha comportato anche una diminuzione della superficie coltivata a causa del processo di urbanizzazione e dell'aumento del reddito dei consumatori abituali di miglio, i quali hanno modificato le loro abitudini alimentari a favore di colture più pregiate come riso e frumento. Tuttavia, si prevede che l'aumento della frequenza e dell'intensità dei cambiamenti climatici, oltre alla contaminazione da micotossine associata all'aumento della popolazione mondiale sarà responsabile di una significativa riduzione delle rese delle principali colture cerealicole con conseguente aumento dei prezzi e importanti preoccupazioni per la sicurezza alimentare (Dias-Martins et al., 2018).

Il prezzo di mercato del miglio perla è inferiore rispetto ai cereali più importanti dal punto di vista economico, ragione per cui la domanda è aumentata in favore degli usi alternativi, come ad esempio quelli riguardanti l'industria della birra, dell'amido e della formulazione di mangimi; inoltre grazie all'elevato valore nutrizionale è possibile aumentare la domanda relativa al consumo alimentare mediante la miscelazione del miglio con gli alimenti preferiti dai consumatori ad alto reddito. Esiste un buon potenziale relativo agli usi alternativi di questo cereale nei prossimi anni e la maggior parte della crescita proverrà dall'industria mangimistica, birraria e dall'industria dell'amido; i mercati dovrebbero soddisfare le esigenze dei consumatori finali; ad esempio la filiera mangimistica preferisce un prezzo unitario più basso a discapito della qualità, invece le industrie relative alla produzione di birra e amido prediligono cereali con un alto contenuto amilaceo e basso contenuto proteico (Reddy et al., 2018).

La potenziale domanda di trasformazione degli alimenti, sebbene in una fase nascente, presenta prospettive incoraggianti di valore aggiunto. È necessario fornire incentivi all'industria alimentare per utilizzare il miglio perla per creare sia nuovi prodotti alimentari trasformati sia prodotti tradizionali come pane, biscotti, etc., cercando di comprendere le preferenze e le esigenze dei consumatori (Basavaraj et al., 2010). In questo capitolo vengono riportate le principali proprietà nutraceutiche del miglio perla, oltre ai principali usi alimentari in Africa e in India, nelle quali il cereale viene maggiormente consumato.

## **8.1. Proprietà nutraceutiche**

Le cariossidi di miglio perla possiedono diverse proprietà funzionali, dovute all'elevato contenuto di fibre, alla composizione degli acidi grassi e alla presenza di diversi composti fitochimici. Oltre alle sue caratteristiche antinfiammatorie, antitumorali e alla presenza di composti antiossidanti, il miglio perla aiuta anche a ridurre il rischio di malattie cardiache, malattie infiammatorie intestinali e aterosclerosi.

I semi sono privi di glutine, ed è un fattore molto importante, considerando che l'assunzione di proteine contenenti glutine, presenti in cereali come il frumento, può favorire diversi disordini metabolici in alcuni individui, provocando allergie, intolleranze, malattie autoimmuni e permeabilità intestinale. Pertanto, il miglio perla potrebbe rivelarsi un'alternativa funzionale a basso costo per celiaci, inoltre la conoscenza acquisita dei benefici per la salute di questo cereale riveste una grande importanza, che dovrebbe essere considerata nei programmi nutrizionali (Dias-Martins et al., 2018).

Di seguito vengono analizzate in dettaglio le varie proprietà nutraceutiche del miglio perla.

### **8.1.1. Diabete**

Il diabete mellito è una malattia metabolica cronica caratterizzata da iperglicemia con alterazioni del metabolismo dei carboidrati, delle proteine e dei lipidi. È considerato il disturbo endocrino più comune e provoca una produzione insufficiente di insulina (tipo 1) o una resistenza combinata all'azione dell'ormone e alla sua risposta secretoria (tipo 2). Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) il diabete di tipo 2 è aumentato nei bambini e negli adulti a livello globale dove rappresenta attualmente la sesta causa di morte nel mondo.

Grazie alla sua elevata quantità di fibre, il miglio perla è in grado di aumentare la sensibilità all'insulina e ad abbassare il livello di trigliceridi, inoltre la digestione viene rallentata e il glucosio viene rilasciato nel sangue a una velocità inferiore rispetto ad

altri alimenti. Ciò aiuta a mantenere costante il livello di zucchero nel sangue nei pazienti diabetici per un lungo periodo di tempo.

In generale, il diabete può scatenarsi a causa di predisposizioni genetiche, obesità e consumo elevato di alimenti ad alto indice glicemico; l'uso di miglio per sviluppare nuovi prodotti può aiutare a prevenire il rischio di contrarre questa patologia, per effetto del suo basso livello glicemico (Dias-Martins et al., 2018; Danihelová e Šturdík, 2012). Infatti è stato riportato che il consumo di cibi con tali caratteristiche ritarda la fame per il pasto successivo ed è più efficace nell'indurre la sazietà rispetto agli alimenti con alta incidenza di glicemia, di conseguenza questo cereale potrebbe essere potenzialmente utilizzato nella gestione dell'iperglicemia nei pazienti diabetici e, in una certa misura, nella riduzione dell'obesità (Jukanti et al., 2016).

### **8.1.2. Cancro**

Il cancro è la seconda causa di morte mondiale, con circa 8,8 milioni di decessi nel 2015. Sebbene la malattia sia correlata a diversi fattori come predisposizione genetica, infiammazioni croniche ed età, la ricerca ha dimostrato che la scelta del cibo che viene consumato può influenzare la predisposizione a sviluppare questa malattia, tanto è vero che in Paesi come India, Burkina Faso e Nigeria, nei quali la dieta di base è costituita principalmente dal miglio, l'incidenza di cancro è molto più bassa rispetto a paesi che prediligono il consumo di cereali come mais e frumento (Dias-Martins et al., 2018). Studi recenti hanno rivelato che la fibra è uno dei modi migliori e più semplici per prevenire l'insorgenza del cancro al seno nelle donne, in particolare consumando più di 30 g di fibre al giorno c'è la probabilità di ridurre il cancro al seno per più del 50% (Danihelová e Šturdík, 2012).

### **8.1.3. Disturbi gastrointestinali**

Sempre grazie al suo elevato contenuto di fibre, il miglio può aiutare la peristalsi del sistema gastrointestinale, eliminando problemi come costipazione, gas in eccesso, gonfiore e crampi. Regolando i processi digestivi, la ritenzione di nutrienti risulta migliorata e vengono ridotte le possibilità di contrarre patologie gastrointestinali di maggior entità come le ulcere gastriche o il cancro del colon; inoltre l'eliminazione dei rifiuti aiuta anche a ottimizzare la salute dei reni, del fegato e del sistema immunitario,



in quanto tali organi sono strettamente correlati alle attività metaboliche del corpo umano.

Il miglio perla risulta efficace anche per la cura delle ulcere allo stomaco. La causa più comune di tale disturbo è l'eccesso di acidità nell'apparato digerente dopo l'assunzione di cibo. Questo cereale è uno dei pochissimi alimenti che rende lo stomaco alcalino e previene, o quantomeno riduce, la formazione di questa patologia.

#### **8.1.4. Celiachia**

La celiachia è innescata dall'ingestione di glutine in soggetti predisposti. Si stima che negli Stati Uniti circa 500.000 persone sono interessate da tale problematica. Sostituire cereali come frumento, orzo e alimenti a base di segale con cereali come riso, mais, sorgo, grano saraceno (*Fagopyrum esculentum*) e quinoa (*Chenopodium quinoa*), oltre al miglio, possono aiutare le persone ad aderire a una dieta priva di glutine. Una caratterizzazione più completa delle proteine del miglio perla e della loro funzionalità fornirebbe informazioni utili per la commercializzazione degli alimenti per celiaci (Kangama, 2021; Danihelová e Šturdík, 2012).

#### **8.2. Usi alimentari**

Il miglio perla è utilizzato in diverse forme a livello mondiale, ad esempio come pane azzimo (*roti* o *chapatti*), polenta, etc. e viene generalmente definito “pane dei poveri”. Inoltre è stato riportato che la sua farina può sostituire quella di frumento in misura pari al 10-20% (Satyavathi et al., 2021).

Sia il continente africano che quello asiatico forniscono un'ampia varietà di cibi tradizionali locali, come porridge, focacce, cuscus, dolci, bevande alcoliche (*Dogon millet beer*, *chibuku shake e merissa*) e analcoliche (*pombe*, *pito*, *boza*, *bushera e marewa*) (Dias-Martins et al., 2018). In particolare, in India, vengono realizzati molteplici prodotti alimentari tradizionali come *khichri*, *roti*, *sakarpare*, *gulgule*, etc., mentre le industrie alimentari sfruttano il miglio perla per realizzare prodotti come tagliatelle, pasta, vermicelli, biscotti, pane, biscotti, torte, bignè, e altro (Satyavathi et al., 2021).

Le focacce sono prive di glutine, assomigliano ai pancake e possono essere cotte su piastra o tramite una stufa a legna e servite, a seconda della regione, con sottaceti caldi (India) o salse piccanti (Sudan). Il couscous è un alimento base della cucina nordafricana, può derivare da farina o da semi decorticati e viene comunemente consumato assieme a verdure o yogurt.

Oltre ai prodotti salati, i semi del miglio perla possono essere utilizzati per produrre dolci, come *Ladoo* e *Dakuwa* che vengono tipicamente consumati rispettivamente in India e Nigeria. Diversi studi hanno riportato che ingredienti potenziali come i semi e la farina maltata del miglio perla possono essere aggiunti a questi dolci per migliorarne le caratteristiche nutrizionali. Inoltre, la farina ha un grande potenziale per lo sviluppo di prodotti popolari in altre parti del mondo come snack, prodotti per lo svezzamento e bevande fermentate non casearie, e può essere utilizzata come sostitutivo della farina di frumento in diverse preparazioni alimentari, come biscotti, pasta e pane integrale (Dias-Martins et al., 2018).



**Figura 8.1:** preparazioni alimentari a base di miglio perla A) semi; B) farina; C) focaccia D) biscotti (Jukanti et al., 2016).



**Figura 8.2:** alimenti tradizionali locali a base di miglio perla a) *Fura*, Nigeria; b) *Porridge*, Nigeria; c) *Ladoo*, India (Dias-Martins et al., 2018).

### **8.3. Uso del miglio perla come biocombustibile**

Oltre alle utilizzazioni sopradescritte, recentemente sta acquisendo importanza l'uso del miglio perla come biocombustibile: la crescente domanda di energia da Paesi esteri, l'esaurimento dei combustibili fossili e l'impatto ambientale hanno comportato lo sviluppo di risorse alternative.

La cellulosa e l'emicellulosa sono le componenti principali per la produzione di biocarburanti: tali polimeri sono presenti nella biomassa del miglio perla.

Il biocombustibile può essere prodotto da zuccheri riducenti, da amido oppure da materiali contenenti biomassa di cellulosa come i rifiuti solidi urbani e i residui colturali delle piante agrarie; quest'ultima categoria potrebbe essere convertita in tre prodotti principali come: energia termica, energia elettrica, carburante per i trasporti e materie prime di sintesi chimica. La scelta delle specie vegetali idonee all'utilizzazione come biocombustibile deve adattarsi alle zone con scarse precipitazioni e ai suoli poveri di risorse, dal fabbisogno di bassi input per l'insediamento, dall'elevata resa di biomassa per unità di superficie, oltre a garantire una buona resa in biomassa e una disponibilità adeguata sul mercato. Tali caratteristiche sono presenti nella coltura del miglio perla, la quale può considerarsi idonea ad essere utilizzata in futuro come coltura bioenergetica (Packiam et al., 2018).

## 9. CONCLUSIONI

In conclusione del presente lavoro di tesi, viene da chiedersi se alla luce di tutte le caratteristiche riportate relative alla pianta di miglio perla, questo cereale possa svolgere un ruolo di importanza primaria nel contesto del cambiamento climatico: grazie alla sua elevata rusticità nei confronti delle avversità ambientali e alle sue importanti proprietà nutrizionali e nutraceutiche, questa specie può avere un peso importante sulla riduzione della povertà e sull'aumento della sicurezza alimentare, in particolare per le persone povere ed emarginate che vivono negli ecosistemi poveri, tuttavia il suo consumo ad oggi riguarda principalmente tali popolazioni e non riesce a trovare una collocazione adeguata nei Paesi economicamente sviluppati. Per aumentare la popolarità di questo cereale, è necessario adottare un approccio multidisciplinare, che coinvolga più parti della ricerca scientifica: a questo scopo rivestono un ruolo cruciale i programmi di miglioramento genetico, che devono focalizzarsi prevalentemente sul rilascio di cultivar ottimizzate per la qualità nutrizionale e che garantiscano una produttività soddisfacente anche in ambienti climaticamente sfavorevoli. I risultati ottenuti attraverso il sequenziamento del genoma hanno permesso una conoscenza più approfondita relativa alla variabilità genetica di questa specie, inoltre i ricercatori hanno identificato i geni codificanti per la tolleranza e la resistenza alle alte temperature, rendendo possibile il trasferimento di queste conoscenze anche ad altre importanti colture come frumento, riso e mais.

Il miglioramento delle caratteristiche nutrizionali è entrato solamente di recente negli schemi di miglioramento genetico, a causa del riconoscimento a livello globale della malnutrizione causata dalla carenza di assorbimento di microelementi come il ferro e lo zinco. È necessario proseguire il perfezionamento dei programmi di biofortificazione, grazie ai quali è stato possibile produrre varietà ricche di questi microelementi in grado di migliorare la sicurezza alimentare della popolazione, in particolar modo in India.

Oltre allo sviluppo di varietà migliorate, assumono un ruolo fondamentale anche le politiche governative, le quali hanno il compito di ridurre i costi di produzione relativi alle produzioni alimentari e di facilitarne la commercializzazione, attraverso la promozione di campagne promozionali al fine di sensibilizzare l'opinione pubblica sulla vasta gamma di prodotti preparabili a base di miglio perla.

In generale, è doveroso incentivare maggiormente il rilascio di nuove cultivar che garantiscano una resa adeguata in granella e anche in termini di foraggio destinato all'alimentazione animale, oltre alla valutazione del grado di utilizzo e dei diversi benefici contenuti negli alimenti di miglio perla, in quanto questo cereale può svolgere una parte significativa nel garantire la sicurezza alimentare, oltre a rappresentare una valida alternativa per i consumatori interessati al consumo di prodotti alimentari a basso prezzo e sostenibili.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- Baldoni, R., Giardini, L. 2000. “Coltivazioni erbacee. Cereali e proteaginose”. Ed. Patron
- Basavaraj, G., Parthasarathy Rao P., Shraavya Bhagavatula, e Wasim Ahmed. 2010. “Availability and Utilization of Pearl Millet in India.” 8(December): 1–6.
- Boncompagni, E., Orozco-Arroyo, G., Cominelli, E., Irappa Gangashetty, P., Grandi, S., Tenenbaum, T. 2018. “Antinutritional Factors in Pearl Millet Grains: Phytate and Goitrogens Content Variability and Molecular Characterization of Genes Involved in Their Pathways.” *PLoS ONE* 13(6): 1–30.
- Bouis Howarth, E., e Ross Welch, M. 2010. “Biofortification—a Sustainable Agricultural Strategy for Reducing Micronutrient Malnutrition in the Global South.” *Crop Science* 50(April): S-20-S-32.
- Crookston, B., Blaser, B., Darapuni, M., Rhoades, M. 2020. “Pearl Millet Forage Water Use Efficiency.”
- Danihelová, M., Šturdík, E. 2012. 6 Potravinárstvo Slovak Journal of Food Sciences *Nutritional and Health Benefits of Buckwheat*.
- Dias-Martins Amanda, M., Kenia Leticia Pessanha, F., Pacheco, S., Avelino S. Rodrigues, J., Wanderlei Piler Carvalho, C. 2018. “Potential Use of Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum* (L.) R. Br.) in Brazil: Food Security, Processing, Health Benefits and Nutritional Products.” *Food Research International* 109(April): 175–86.
- Dube, M., Bhebhe, S., Nyoni, N., Maphosa, M. 2021. “Pearl Millet as a Sustainable Alternative Cereal for Novel Value-Added Products in Sub-Saharan Africa: A Review.” *Agricultural Reviews* (Of).
- Ghatak, A., Chaturvedi, P., Bachmann, G., Valledor, L., Ramsak, Z., Bazargani Mohammadi, M., Bajaj, P., Jegadeesan, S., Li, W., Sun, X., Gruden, K., Varshney Rajeev, K., Weckwerth, W. 2021. “Physiological and Proteomic Signatures Reveal Mechanisms of Superior Drought Resilience in Pearl Millet Compared to Wheat.” *Frontiers in Plant Science* 11(January).
- Govinthaaraj, P., Maheswaran, M., Blummel, M., Sumathi, P., Vemula Kumara, A., Rathore, A., Sivasubramani, S., Kale Mallikarajun, S., Varshney Kumar, R., Gupta Kumar, S. 2021. “Understanding Heterosis, Genetic Effects, and Genome Wide Associations for Forage Quantity and Quality Traits in Multi-Cut Pearl Millet.” *Frontiers in Plant Science* 12(November).
- Jambagi Suresh, R., Kambekar, D. N., Mallapur, C. P., Nalk Rudra Y. 2022. “Novel Insecticides for the Management of Shoot Fly, *Atherigona Approximata* Malloch (Diptera: Muscidae): An Emerging Insect Pest of Wheat in India.” : 1–15.
- Jangra, S., Rani, A., Yadav C. R., Yadav R. N., Yadav, D. 2019. “Introgression of Terminal Drought Stress Tolerance in Advance Lines of Popular Pearl Millet Hybrid through Molecular Breeding.” *Plant Physiology Reports* 24(3): 359–69.
- Jukanti, A. K., Gowda Laxmipathi L., C., Rai N., K., Manga K., V., Bhatt K., R. 2016. “Crops That Feed the World 11 . Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum* L.): An Important Source of Food Security, Nutrition and Health in the Arid and Semi-Arid Tropics.” : 307–29.

- Kangama, C. O. 2021. "Pearl Millet ( *Pennisetum Glaucum* ) Perspectives in Africa." 02(March): 1–7.
- Khairwal, IS., Rai, KN., Diwakar, B., Sharma, YK., Rajpurohit, BS., Bindu, N., Ranjana, Bhattacharjee. 2007. "Pearl Millet: Crop Management and Seed Production Manua." *International Resaerch Institute for the semi Arid Tropics* (January): 723.
- Khan, A., Valpuri, S., Dorcus, G. 2016. "Genome-Assisted Breeding For Drought Resistance." *Current Genomics* 17(4): 330–42.
- Kountche Boubacar, A., Hash Tom, C., Dodo, H., Laoualy, O., Sanogo D. M., Timbeli, A., Vigouroux, Y., This, D., Nijkamè, R., Haussmann L. G., B. 2013. "Development of a Pearl Millet Striga-Resistant Genepool: Response to Five Cycles of Recurrent Selection under Striga-Infested Field Conditions in West Africa." *Field Crops Research* 154: 82–90.
- Kumar R., R., Pal Singh, S., Rai K., G., Krishnan, V., Berwal, M., Goswami, S., Vinutha, T., Mishra P., G., Satyavathi Tara, C., Singh, B., Praveen S. 2022. "Iron and Zinc at a Cross-Road: A Trade-off between Micronutrients and Anti-Nutritional Factors in Pearl Millet Flour for Enhancing the Bioavailability." *Journal of Food Composition and Analysis*: 104591.
- Lee, D., Hanna, W., David Buntin, G., Dozier, W., Timper, P, Wilson P., J. 2012. "Pearl Millet for Grain." *The Journal of infectious diseases* 208: 1–7.
- Manga, V. K., Kumar, A. 2011. "Cultivar Options for Increasing Pearl Millet Productivity in Arid Regions." *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences* 1(2): 200–208.
- Le Mouël, C., Forslund, A. 2017. "How Can We Feed the World in 2050? A Review of the Responses from Global Scenario Studies." *European Review of Agricultural Economics* 44(4): 541–91.
- Nambiar, V. S., Dhaduk, J. J., Sareen, N., Shahu, T., Desai, R. 2011. "Potential Functional Implications of Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum*) in Health and Disease." *Journal of Applied Pharmaceutical Science* 1(10): 62–67.
- Nelson C. D., Hoffmann P., M., Vadez, V., Rotter P., R., Koch, M., Whitbred M., A. 2021. "Can Intercropping Be an Adaptation to Drought? A Model- Based Analysis for Pearl Millet – Cowpea." (August): 1–18.
- Newman, Y., Jennings, E., Vendramini, J., Blount, A. 2010. "Pearl Millet (*Pennisetum Glaucum*): Overview and Management." *SSAGR-337, one of a series of the Agronomy Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida*: 1–6.
- Packiam, M., Subburamu, K., Desikan, R., Uthandi, S., Subramanian, M., Soundarapandian, K. 2018. "Suitability of Pearl Millet as an Alternate Lignocellulosic Feedstock for Biofuel Production in India." 6(2): 51–58.
- Radhouane, L. 2013. "The Evolutionary History of *Pennisetum Glaucum*".
- Reddy, A., Raju S., S., Suresh, A., Kumar, P. 2018. "Analysis of Pearl Millet Market Structure and Value Chain in India." *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies* 8(2): 406–24.
- Rhoné, B., Defrance, D., Salazar-Berthouly, C., Mariac, C., Cubry, P., Couderc, M., Dequicey, A., Assoumanne, A., Kane Ardo, N., Sultan, B., Barnaud, A., Vigouroux, Y. 2020. "Pearl Millet Genomic Vulnerability to Climate Change in West Africa Highlights the Need for Regional Collaboration." *Nature Communications* 11(1).
- Rouamba, A., Shimelis, H., Drabo, I., Laing, M., Gangashetty, P., Mathew, I., Mrema, E., Shayanowako Tichafa, A. I. 2021. "Constraints to Pearl Millet (*Pennisetum*

- Glaucum) Production and Farmers' Approaches to Striga Hermonthica Management in Burkina Faso." *Sustainability (Switzerland)* 13(15): 1–17.
- Salama S. A., H., Shaalan M., A., Nasser E. A., M. 2020. "Forage Performance of Pearl Millet ( Pennisetum Glaucum [ L .] R . Br .) in Arid Regions : Yield and Quality Assessment of New Genotypes on Different Sowing Dates." 80(December): 572–84.
- Satyavathi Tara, C., Ambawat, S., Khandelwal, V., Srivastava K., R. 2021. "Pearl Millet: A Climate-Resilient Nutricereal for Mitigating Hidden Hunger and Provide Nutritional Security." *Frontiers in Plant Science* 12(September): 1–18.
- Serba D. D., Yadav S., R. 2016. "Genomic Tools in Pearl Millet Breeding for Drought Tolerance: Status and Prospects." *Frontiers in Plant Science* 7(NOVEMBER2016): 1–10.
- Shaalan Maghoub, A., Abdelhamid Attia, M., Salama Sabry Attia, H. 2021. "Asian Journal of Plant Sciences Grain Yield and Growth Parameters of Pearl Millet Genotypes Grown in an Arid Environment under Variable Plant Densities."
- Sharma, B., Chugh Kumar, L., Singh K., V., Sood, M. 2020. "Determination of Major Antinutritional Factors in Pennisetum Glaucum L. And Their Relationship with Protein and Content Yield." *Bangladesh Journal of Botany* 49(2): 401–5.
- Sharma, S., Sharma, R., Pujar, M., Yadav, D., Yadav, Y., Rathore, A., Mahala Singh, R., Singh, I., Verma, Y., Deora Singh, V., Vaid, B., Jayalekha Kakkadan, A., Gupta Kumar, S. 2021. "Use of Wild Pennisetum Species for Improving Biotic and Abiotic Stress Tolerance in Pearl Millet." *Crop Science* 61(1): 289–304.
- Shivhare, R., Charu, L. 2017. "Exploration of Genetic and Genomic Resources for Abiotic and Biotic Stress Tolerance in Pearl Millet." *Frontiers in Plant Science* 7(January): 1–17.
- Subbarayappa Manjunatha, B., Nivetha, N., Krishna Kumar, G., Elangovan, A., Pushkar, S., Chandrashekar, N., Aggarwal, C., Asha Devi, A., Chinnusamy, V., Raipuria Kumar, R., Watts, A., Bandeppa, S., Dukare Shridhar, A., Paul, S. 2022. "Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Shewanella Putrefaciens and Cronobacter Dublinensis Enhance Drought Tolerance of Pearl Millet by Modulating Hormones and Stress-Responsive Genes." (February): 1–14.
- Taak, P., Koul, B. 2018. "Comparative Assessment of Drought and Salt Stress Tolerance in Three Varieties of Pearl Millet (Pennisetum Glaucum L.)." *Annals of Biology* 34(2): 119–25.
- Ullah, A., Ahmad, A., Khaliq, T., Akhtar, J. 2017. "Recognizing Production Options for Pearl Millet in Pakistan under Changing Climate Scenarios." *Journal of Integrative Agriculture* 16(4): 762–73.
- Uppal K., R., Wani P., S., Garg K., K., Alagarswamy, G. 2015. "Field Crops Research Balanced Nutrition Increases Yield of Pearl Millet under Drought." *Field Crops Research* 177: 86–97.
- Vadez, V., Hash, T., Bidinger, R. F., Kholova, J. 2012. "II.1.5 Phenotyping Pearl Millet for Adaptation to Drought." *Frontiers in Physiology* 3 OCT(October): 1–12.
- Varshney K., R., Shi, C., Thudi, M., Mariac, C., Wallace, J., Qi, P., Zhang, H., Zhao, Y., Wang, X., Rathore, A., Srivastava, K., R., Chitikineni, A., Fan, G., Bajaj, P., Punnuri, S., Gupta, K., S., Wang, H., Jiang, Y., Couderc, M., Katta A. V. S. K., M., Paudel R., D., Mungra D., K., Chen, W., Harris-Shultz R., K., Garg, V., Desai, N., Doddamani, D., Kane Ardo, N., Conner A., J., Ghatak, A., Chaturevedi, P., Subramaniam, S., Yadav Parkash, O., Berthouly-Salazar, C., Hamidou, F., Wang, J., Liang, X., Clotault, J., Upadhaya D., H., Cubry, P., Rhonè, B., Gueye Codou, M., Sunkar, R., Dupuy, C., Sparvoli, F., Cheng, S., Mahala S., R., Singh, B., Yadav S., R., Lyons, E., Datta K., S., Hash, T., Devos M., K., Buckler, E.,



- Bennetzen L., J., Patterson H., A., Ozias-Akins, P., Grando, S., Wang, J., Mohapatra, T., Weckwerth, W., Reif C., J., Liu, X., Vigouroux, Y., Xu, X. 2017. "Pearl Millet Genome Sequence Provides a Resource to Improve Agronomic Traits in Arid Environments." *Nature Biotechnology* 35(10): 969–76.
- Yadav, O. P., Singh, V., Vadez, V., Gupta, S. K., Rajpurohit, S. B., Shekhawat S. P. 2017. "Improving Pearl Millet for Drought Tolerance- Retrospect and Prospects." *Indian Journal of Genetics and Plant Breeding* 77(4): 464–74.
- Yadav, O. P., Rai, N. K. 2013. "Genetic Improvement of Pearl Millet in India." *Agricultural Research* 2(4): 275–92.
- Yadav, O. P., Gupta, S. K., Govindaraj, M., Sharma, R., Varshney, K. R., Rathore, A., Mahala Singh, R. 2021. "Genetic Gains in Pearl Millet in India: Insights Into Historic Breeding Strategies and Future Perspective." *Frontiers in Plant Science* 12(March).
- Yadav, O. P., Rai, N. K., Rajpurohit, B. S., Hash, C. T., Mahala, R. S., Gupta, S. K., Shetty, H. S., Bishnoi, H. R., Rathore, M. S., Kumar, A., Sehgal, S., Raghvani, K. L. 2012. "Twenty-five years of Pearl Millet Improvement in India" *All India Coordinated Pearl Millet Improvement Project*
- Zhang, A., Ji, Y., Sun, M., Lin, C., Zhou, P., Ren, J., Luo, D., Wang, X., Ma, C., Zhang, X., Feng, G., Nie, G., Huang, L. 2021. "Research on the Drought Tolerance Mechanism of Pennisetum Glaucum (L.) in the Root during the Seedling Stage." *BMC Genomics* 22(1): 1–14.

## 11. SITOGRAFIA

[http://www.sias.regione.sicilia.it/Manuale\\_fitofarmaci/Manuale\\_prodotti\\_fitosanitari\\_01.pdf](http://www.sias.regione.sicilia.it/Manuale_fitofarmaci/Manuale_prodotti_fitosanitari_01.pdf)

<https://www.collinsdictionary.com/it/dizionario/inglese/creep-grazing>

<http://www.aicpmip.res.in/pathogical.html>

<https://www.feedipedia.org/node/399>