



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Agronomia Animali Risorse Naturali e Ambiente

Corso di Laurea in Scienze e Cultura della Gastronomia

“la polenta tra tradizione e sostenibilità: impatto idrico, atmosferico ed energetico”

Relatore: Professore Franco Tagliapietra

Laureando: Pietro di Chiano

Matricola n. 2044289

A mia madre, che ci ha creduto prima che ci credessi io.

INDICE

Capitolo 1: Il mais tra agricoltura e cultura gastronomica

- 1.1 Origine e diffusione
 - 1.2 Il ruolo del mais in Italia
 - 1.3 Le varietà tradizionali per polenta
-

Capitolo 2: La filiera del mais

- 2.1 Coltivazione, raccolta, stoccaggio
 - 2.2 Trasformazione in farina (con accenni alle tecniche moderne e tradizionali)
 - 2.3 Distribuzione e consumo
-

Capitolo 3: Le farine di mais per la polenta

- 3.1 Tipologie di farine di mais (bianca, gialla, bramata, fioretto...)
 - 3.2 Qualità nutrizionali
-

Capitolo 4: La sostenibilità nella filiera del mais

- 4.1 perdite di azoto
 - 4.2 impronta carbonio e gas serra
 - 4.3 implicazioni per la sostenibilità agricola
 - 4.4 Analisi Ambientale Comparata dei Sistemi Cerealicoli LCA in pianura padana
 - 4.5 Analisi comparativa di ibridi di mais precoci (FAO 200-300-400) in Friuli Venezia Giulia \ anno 2024
-

Capitolo 5: discussione – la farina di mais

- 5.1 produzione agraria
 - 5.2 trasformazione in farina
 - 5.3 utilizzo domestico
-

Capitolo 6: Conclusioni e prospettive

- 6.1 limiti e conclusioni

6.2 bibliografia

RIASSUNTO

La presente tesi analizza il mais (*Zea mays L.*) nell'ambito della filiera alimentare, settore nel quale questa coltura riveste un ruolo quantitativamente secondario rispetto all'impiego zootecnico, ma comunque rilevante per quanto riguarda le pratiche agricole adottate e i processi di trasformazione industriale. Nonostante la quota destinata al consumo umano sia limitata, essa incide in modo significativo sulle modalità di coltivazione e sulle successive fasi produttive, con conseguenti effetti sull'utilizzo delle risorse naturali e sugli impatti ambientali complessivi. La domanda a cui voglio rispondere è su un kilogrammo di farina quanta acqua e energia consumo ed quanto gas serra produco.

CAPITOLO 1

Il mais tra agricoltura, cultura gastronomica e sostenibilità

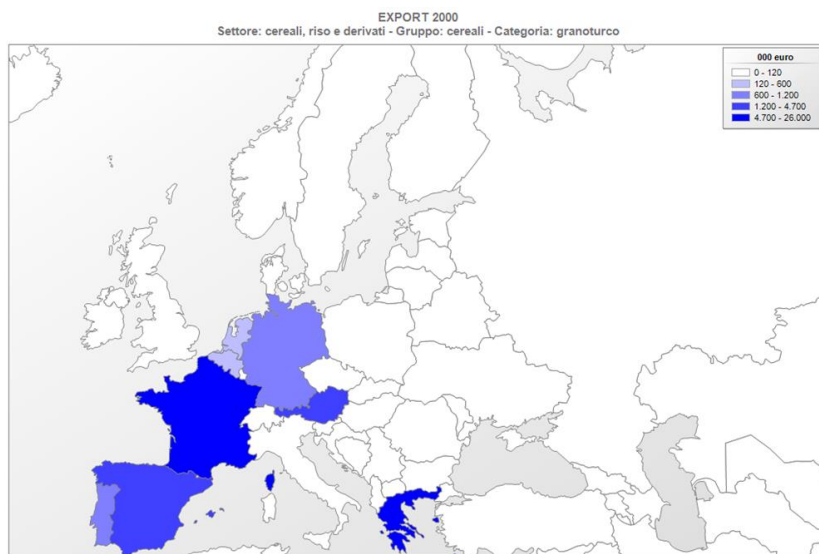
1.1 Contesto generale: l'importanza del mais a livello globale e nazionale

Il mais (*Zea mays L.*) rappresenta uno dei cereali più coltivati e consumati a livello mondiale, insieme a riso e frumento. La sua elevata versatilità d'impiego in ambito alimentare, zootecnico e industriale lo rende una coltura strategica. Secondo i dati FAO, nel 2022 la produzione mondiale di mais ha superato 1,2 miliardi di tonnellate, con Stati Uniti, Cina e Brasile tra i principali Paesi produttori. Il primo europeo a documentare la presenza del mais fu Cristoforo Colombo durante il suo arrivo a Cuba, dove le popolazioni indigene indicavano la pianta con il termine “maíz”, derivato dalla parola “mahis” della lingua taino, parlata dagli abitanti dei Caraibi. Il cereale rappresentava un elemento fondamentale dell'alimentazione delle popolazioni precolombiane, assumendo anche un rilevante valore simbolico e religioso. L'origine geografica della coltura è generalmente collocata in Messico, nella valle di Tehuacán (5200–2500 a.C.). Tuttavia, l'assenza di forme selvatiche di mais in quest'area ha portato alcuni studiosi a ipotizzare un'origine sudamericana.

Dopo l'introduzione in Europa nel 1492, il mais si diffuse inizialmente come pianta ornamentale, per poi affermarsi progressivamente come coltura agricola grazie ai commerci veneziani, con particolare diffusione tra il XVI e il XVII secolo nelle regioni del Veneto e del Friuli. I portoghesi contribuirono alla diffusione della coltura nelle colonie africane, mentre nel continente americano furono i coloni europei a favorirne l'espansione agricola, in particolare nelle colonie inglesi della Virginia a partire dal 1608.

In Italia il mais è conosciuto con numerose denominazioni locali, tra cui granturco, granone, frumentone. Attualmente la coltivazione interessa una superficie di circa 600.000 ettari, con una produzione complessiva di circa 7 milioni di tonnellate e rese medie comprese tra 100 e 110 quintali per ettaro. Tale produzione risulta tuttavia insufficiente a soddisfare il fabbisogno nazionale,

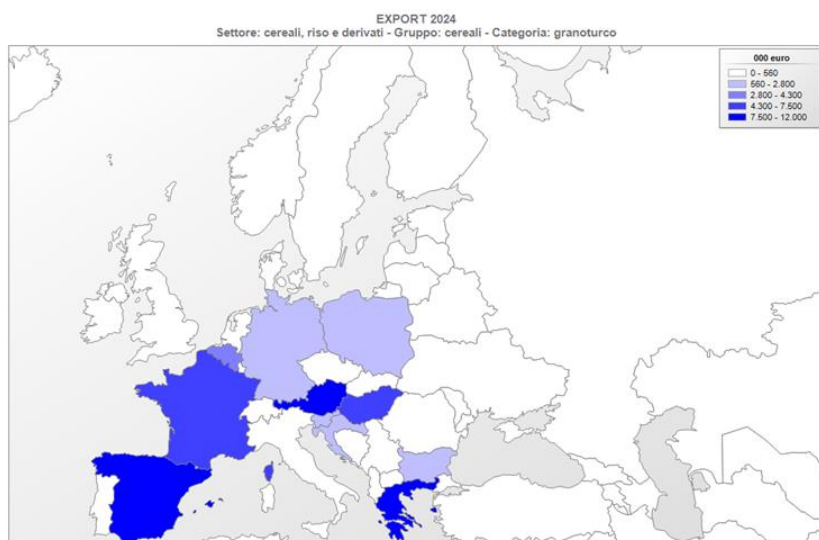
determinando un consistente ricorso alle importazioni, che nel 2020 hanno raggiunto circa 6 milioni di tonnellate. A livello mondiale, gli Stati Uniti rappresentano il principale produttore con circa 393 milioni di tonnellate, seguiti da Cina, Brasile e Argentina.



1.2 IL RUOLO DEL MAIS IN ITALIA

In Italia la coltivazione del mais presenta una lunga tradizione, strettamente legata sia all'alimentazione umana con particolare riferimento alla polenta, alimento simbolo delle regioni settentrionali, sia all'alimentazione animale. Negli ultimi decenni, tuttavia, il settore maidicolo nazionale ha registrato una progressiva contrazione delle

superfici coltivate, dovuta a criticità economiche, ambientali e fitosanitarie. Nonostante ciò, il mais continua a rappresentare una coltura cardine della pianura padana e del sistema agroindustriale italiano.



L'obiettivo della presente tesi consiste nella valutazione della sostenibilità ambientale della filiera del mais destinato all'alimentazione umana, con particolare riferimento alla produzione di farina di mais. In tale contesto, la tesi si propone di rispondere alla seguente domanda di ricerca: quali sono i consumi di acqua ed energia e quali le emissioni di gas a effetto serra associate alla produzione di un chilogrammo di farina di mais?

L'analisi si concentra sull'individuazione e sulla quantificazione dei principali flussi di materia ed energia lungo le diverse fasi della filiera, dalla produzione agricola alla trasformazione industriale. Il concetto di sostenibilità rappresenta oggi un tema centrale nel dibattito economico e ambientale, pur risultando caratterizzato da una definizione complessa e non univoca. Esso assume spesso un valore prevalentemente valutativo piuttosto che descrittivo, configurandosi come un contenitore concettuale suscettibile di interpretazioni differenti. Come evidenziato da Ciccarelli, «la definizione di sostenibilità, nelle sue diverse accezioni, sembra essere problematica, sia in pratica, sia in teoria. Esistono, infatti, divergenti visioni, non solo quando dalla teorizzazione si cerca di passare alla prescrizione della pratica, ma anche nella definizione stessa» (Ciccarelli, 2005, p. 41).

Tra gli strumenti maggiormente utilizzati per la rendicontazione della sostenibilità rientra il Bilancio di Sostenibilità basato sugli standard della Global Reporting Initiative (GRI), fondato su un insieme di regole che definiscono formati, contenuti informativi e indicatori di performance (Key Performance Indicators – KPI) da adottare (Ferrando, 2018). Tuttavia, una delle principali difficoltà nell'applicazione di tale modello è rappresentata dall'elevato numero di indicatori disponibili, che coprono ambiti disciplinari eterogenei. Ciò può condurre a una selezione parziale, seppur standardizzata, degli indicatori, che tende a descrivere l'impegno dell'impresa in specifiche aree di miglioramento piuttosto che fornire una misura integrata del benessere economico, sociale e ambientale generato dalle attività aziendali (Poma, 2014).

	Sup. investita (ettari)					Aziende (n.)				
	2000	2010	2020	Quota 2020	Var.% 20/00	2000	2010	2020	Quota 2020	Var.% 20/00
ITALIA	1.069.155	890.237	666.768	100,0%	-37,6	304.711	154.824	85.556	100,0%	-71,9
Lombardia	285.912	234.294	194.174	29,1%	-32,1	30.224	19.177	13.907	16,3%	-54,0
Veneto	292.911	255.779	161.648	24,2%	-44,8	100.861	57.843	28.042	32,8%	-72,2
Piemonte	178.009	164.519	147.038	22,1%	-17,4	35.831	21.400	15.167	17,7%	-57,7
Emilia-Romagna	104.132	97.629	68.607	10,3%	-34,1	18.866	11.887	6.448	7,5%	-65,8
Friuli V.G.	92.216	73.846	47.580	7,1%	-48,4	22.328	12.393	6.474	7,6%	-71,0
Lazio	17.749	11.720	9.654	1,4%	-45,6	14.938	5.085	2.590	3,0%	-82,7
Toscana	29.990	13.819	9.214	1,4%	-69,3	13.674	4.298	2.065	2,4%	-84,9
Campania	14.417	10.399	8.457	1,3%	-41,3	25.283	8.407	3.688	4,3%	-85,4
Umbria	18.525	8.768	5.942	0,9%	-67,9	7.216	2.914	1.497	1,7%	-79,3
Marche	15.220	6.622	3.669	0,6%	-75,9	9.280	3.396	1.335	1,6%	-85,6
Abruzzo	5.752	3.853	3.513	0,5%	-38,9	6.401	2.403	1.441	1,7%	-77,5
Sardegna	1.514	1.868	2.118	0,3%	39,9	436	258	269	0,3%	-38,3
Calabria	5.334	2.720	1.656	0,2%	-69,0	8.335	2.173	856	1,0%	-89,7
Altre regioni	7.475	4.400	3.498	0,5%	-53,2	11.038	3.190	1.777	2,1%	-83,9

Fonte: elaborazione ISMEA su dati Istat (Censimento Agricoltura)

Negli ultimi due decenni il settore del mais italiano ha inoltre risentito di una perdita di competitività che ha determinato una significativa riduzione delle superfici coltivate e della produzione disponibile per le filiere nazionali, comprese quelle di qualità certificata

DOP e IGP. Le superfici coltivate, superiori a un milione di ettari nel 2000, si sono ridotte a circa 564.000 ettari nel 2022, con una contrazione di oltre 500.000 ettari. Parallelamente, la produzione di granella è passata da 10,2 milioni di tonnellate a 4,7 milioni di tonnellate.

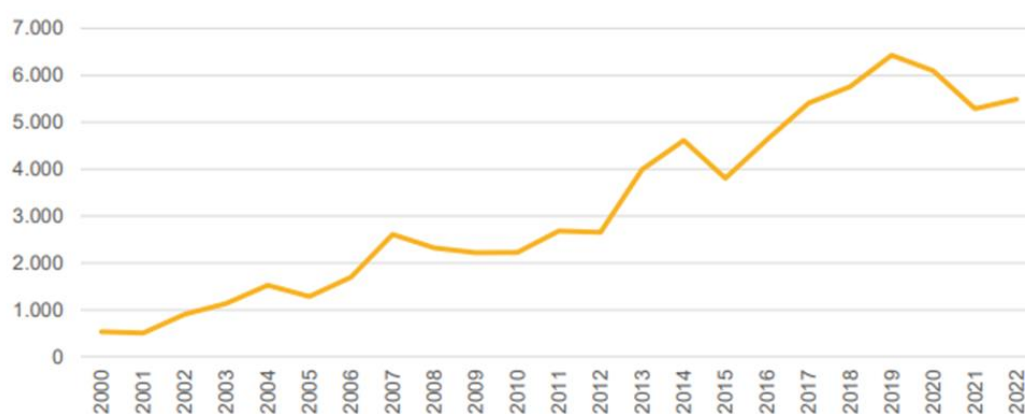
Le oscillazioni produttive risultano particolarmente marcate a causa della crescente variabilità climatica, in particolare degli eventi siccitosi che compromettono le rese per ettaro. La riduzione delle superfici e della produzione maidicola nazionale è attribuibile a diversi fattori, tra cui la volatilità dei prezzi internazionali, le modifiche alla Politica Agricola Comune con l'introduzione del disaccoppiamento degli aiuti, l'aumento del rischio fitosanitario legato alle micotossine, i costi elevati dell'irrigazione e la limitata innovazione tecnologica.

Fig. 5 – Evoluzione della produzione di mais (000 t)



Fonte: Elaborazione ISMEA su dati Istat

Fig. 7 – Evoluzione delle importazioni di mais (000 t)



Fonte: elaborazione ISMEA su dati Istat

1.3 LE VARIETA DI MAIS DESTINATO ALL'ALIMENTAZIONE UMANA

Il mais presenta un elevato polimorfismo morfologico e compositivo delle cariossidi, che consente di distinguere diverse tipologie varietali. Tra queste si individuano sette principali gruppi: mais dentato (*dentcorn*), mais vitreo o *flint corn*, mais tenero (*flourcorn*), mais dolce (*sweetcorn*), mais da scoppio (*popcorn*), mais ceroso (*waxycorn*) e mais vestito. Il mais dentato rappresenta la tipologia maggiormente coltivata a livello mondiale, seguito dal mais vitreo, particolarmente utilizzato nell'alimentazione umana e nella produzione di farine per polenta, oltre che nell'allevamento zootecnico. Le altre tipologie rivestono un ruolo più limitato e trovano prevalentemente applicazioni industriali specifiche. La FAO classifica il mais in otto classi, identificate con codici numerici da 100 a 800, che indicano la durata del ciclo colturale dalla semina alla maturazione delle cariossidi, generalmente compresa tra 85 e 140 giorni.

Il mais è ampiamente impiegato nell'alimentazione umana sia in forma diretta – ad esempio bollito o arrostito – sia sotto forma di prodotti trasformati quali polenta, popcorn, snack e prodotti per la prima colazione, oltre a numerose preparazioni gastronomiche tradizionali e innovative.

2.1 COLTIVAZIONE RACCOLTA E STOCCAGGIO

Il mais è una pianta erbacea annuale appartenente al gruppo delle specie fotosintetiche C4. Presenta foglie ampie, allungate e strette che si sviluppano alternativamente lungo il fusto. Grazie alla robustezza, la pianta può raggiungere un'altezza variabile tra 1 e 3 metri, in funzione della varietà e delle condizioni pedoclimatiche. L'apparato radicale è di tipo fascicolato, con radici che possono svilupparsi fino a circa 60 cm di profondità, contribuendo alla stabilità della pianta e all'assorbimento di acqua e nutrienti. Il mais è una specie monoica anemofila, ovvero impollinata dal vento. Ogni pianta produce infiorescenze maschili, rappresentate dal pennacchio apicale, e infiorescenze femminili, costituite dalla spiga o pannocchia. Sebbene la specie sia auto compatibile, solo una minima parte degli ovuli (circa il 5%) viene fecondata mediante autoimpollinazione, mentre la maggior parte (circa il 95%) deriva da impollinazione incrociata. Per favorire un'efficace impollinazione, la coltura viene generalmente seminata in appezzamenti compatti piuttosto che in file isolate.

Le varietà di mais di maggiore interesse economico e commerciale sono tradizionalmente suddivise in quattro gruppi principali: mais dentato, mais vitreo, mais da popcorn e mais zuccherino. Alcuni sistemi classificativi includono anche il mais ceroso e le varietà ad alto contenuto di amilosio. Tale classificazione si basa principalmente sulle caratteristiche morfologiche della cariosside. A seconda della destinazione finale, possono essere utilizzate sia la granella sia le parti vegetative della pianta.

La granella di mais trova impiego principalmente nei seguenti ambiti:

- alimentazione animale;
- alimentazione umana, essendo un alimento base in numerosi Paesi e naturalmente privo di glutine, oltre che materia prima per la produzione di olio alimentare;
- produzione industriale, ad esempio per la realizzazione di materiali biodegradabili, plastiche e adesivi.

Le parti vegetative residue della pianta, quali stocco, foglie e fusto, sono invece utilizzate per:

- produzione di foraggi;
- produzione di biocarburanti;
- applicazioni nell'industria chimica.

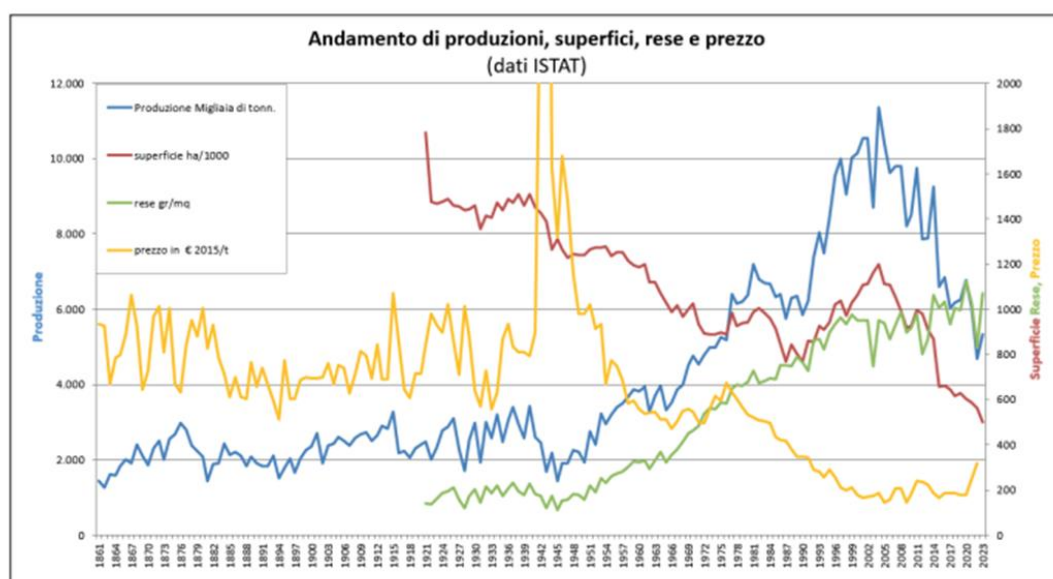
Negli Stati Uniti circa il 70% della produzione di mais è destinato all'alimentazione animale e alla produzione di bioetanolo. Nell'Unione Europea, invece, la destinazione prevalente rimane l'utilizzo mangimistico.

Il terreno e la preparazione alla semina

Il mais predilige terreni di medio impasto, ben aerati e caratterizzati da un adeguato drenaggio, ma al contempo capaci di trattenere una sufficiente disponibilità idrica nella zona radicale. I suoli eccessivamente compatti o, al contrario, troppo sabbiosi e poveri di sostanza organica risultano meno adatti alla coltivazione. La coltura si sviluppa preferibilmente in terreni con valori di pH superiori a 5,5; l'intervallo ottimale è compreso tra 5,8 e 6,8. Valori di pH prossimi a 5 possono determinare riduzioni produttive fino al 35%, risulta inoltre moderatamente sensibile alla salinità del suolo. Una corretta preparazione del letto di semina è fondamentale per garantire una germinazione uniforme e un adeguato sviluppo delle piante. Le operazioni colturali possono includere lavorazioni superficiali mediante coltivatori o erpici a dischi, finalizzate alla rottura delle zolle e al miglioramento della struttura del terreno. Tuttavia, lavorazioni eccessive, soprattutto in suoli sabbiosi o aridi, possono compromettere la struttura del suolo e favorire fenomeni di erosione.

La scelta dell'epoca di semina rappresenta un fattore agronomico determinante. Il mais, specie termofila, richiede temperature del suolo superiori a 8–10 °C per avviare la germinazione, mentre lo sviluppo ottimale delle plantule si verifica con temperature superiori a 16 °C. Le giovani piante sono particolarmente sensibili alle gelate tardive, mentre semine eccessivamente ritardate possono compromettere il completamento del ciclo vegetativo. È inoltre opportuno effettuare la semina quando il terreno presenta un adeguato grado di asciutta, generalmente alcuni giorni dopo eventi piovosi, quando lo strato superficiale risulta lavorabile.

L'utilizzo di sementi certificate è fortemente raccomandato, in quanto garantisce elevati standard di germinabilità (generalmente superiori all'85%), purezza varietale, assenza di patogeni e uniformità di sviluppo della coltura. Tali caratteristiche consentono di ottenere produzioni più omogenee e competitive nei confronti delle infestanti.



Andamento produzione, prezzo, superfici e rese dal 1861. Elaborazione dati Istat (serie storiche fino al 2015, dati Istat e, per il prezzo, Ager Bologna per gli anni seguenti).

Le varietà ibride di mais presentano generalmente maggiore vigore vegetativo e rese produttive superiori rispetto alle varietà tradizionali. Tuttavia, il seme ottenuto dalla granella di piante ibride non mantiene le caratteristiche produttive originarie, rendendo necessario l'acquisto annuale di nuovo materiale sementiero. L'introduzione degli ibridi ha rappresentato uno dei fattori chiave della cosiddetta "rivoluzione verde", contribuendo, insieme all'aumento dell'impiego di fertilizzanti di sintesi e allo sviluppo delle infrastrutture irrigue, a un incremento significativo delle rese, passate mediamente da 2 a circa 9 tonnellate per ettaro tra gli anni Cinquanta e Novanta del Novecento.

Raccolta e stoccaggio

La fase di raccolta e stoccaggio riveste un ruolo fondamentale nel mantenimento della qualità della granella. Generalmente la raccolta avviene quando il contenuto di umidità della granella è compreso tra il 20% e il 25%. Successivamente il prodotto viene sottoposto a essiccazione fino a raggiungere valori di umidità intorno al 14%, livello considerato idoneo per la conservazione e la commercializzazione.

Il processo di essiccazione deve essere condotto mantenendo temperature controllate e costanti, al fine di evitare danni qualitativi alla granella. Sbalzi termici eccessivi possono infatti alterare le caratteristiche fisiche e nutrizionali del prodotto. Un indicatore visivo di un'essiccazione non ottimale è rappresentato dalla comparsa di alterazioni cromatiche della cariosside, come arrossamenti laterali nel caso del mais giallo, dovuti a temperature troppo elevate.

Talvolta, per esigenze logistiche e di capacità di stoccaggio, gli impianti di essiccazione operano a temperature più elevate, con il rischio di compromettere la qualità tecnologica e commerciale della materia prima.

2.2 LA TRASFORMAZIONE DEL MAIS IN FARINA

L'ampia diffusione della coltivazione del mais si riflette nella molteplicità dei suoi utilizzi, che variano in funzione delle parti della pianta impiegate e dei processi di trasformazione adottati. La macinazione della granella può avvenire mediante processi a secco o a umido. La macinazione a secco consente di ottenere farine destinate alla preparazione di prodotti tradizionali quali polenta e tortillas. La macinazione a umido, invece, prevede la frantumazione della cariosside in presenza di acqua e, talvolta, di additivi tecnologici, consentendo la separazione delle principali frazioni della cariosside: crusca, germe ed endosperma. L'utilizzo prevalente del mais a livello globale è destinato alla produzione di mangimi per la zootecnia, la cui domanda è aumentata significativamente nel corso del XX secolo in seguito all'incremento del consumo di prodotti di origine animale. Il costo relativamente contenuto del mais e l'elevata digeribilità della granella ne hanno favorito l'impiego come alimento zootecnico, utilizzato sia sotto forma di granella intera sia come componente di mangimi composti o insilato. Tra gli altri impieghi rilevanti del mais rientrano la produzione di bioetanolo e di numerosi prodotti alimentari e industriali.

Dal punto di vista alimentare, uno dei principali derivati del mais è l'amido. Nel processo di trasformazione industriale, l'amido viene separato dalla cariosside attraverso operazioni di macinazione e separazione delle frazioni liquide e solide, per poi essere essiccato e trasformato in prodotto commerciale. L'amido di mais è ampiamente utilizzato nell'industria alimentare come addensante e stabilizzante in prodotti quali dolci, salse e piatti pronti. Un ulteriore prodotto di grande diffusione è lo sciroppo di glucosio ad alto contenuto di fruttosio (High Fructose Corn Syrup – HFCS), utilizzato come dolcificante in sostituzione del saccarosio. Esso si ottiene convertendo l'amido di mais in glucosio e successivamente trasformando parte di questo in fruttosio mediante processi enzimatici. Il prodotto finale è costituito generalmente da una miscela contenente circa il 42% di glucosio e il 55% di fruttosio. L'utilizzo dell'HFCS è particolarmente diffuso negli Stati Uniti, mentre in Europa e in Svizzera il suo impiego risulta più limitato, dove è maggiormente utilizzato lo sciroppo di glucosio tradizionale.

Macinazione a secco del mais

La macinazione a secco del mais rappresenta uno dei processi più diffusi e consolidati nell'industria molitoria cerealicola, in particolare quando l'obiettivo è ottenere farine, semole e grits destinati all'alimentazione umana o ad applicazioni industriali specifiche. A differenza della macinazione a umido, questo processo non prevede l'impiego di acqua nella fase di macerazione, ma si basa esclusivamente su operazioni meccaniche che consentono la separazione delle principali componenti della cariosside: pericarpo, endosperma e germe.

La cariosside di mais è costituita da un endosperma ricco di amido e proteine, da un germe contenente lipidi e micronutrienti e da un pericarpo fibroso. La separazione di tali componenti risulta fondamentale poiché ciascuna frazione possiede differenti destinazioni d'uso: il germe viene utilizzato per l'estrazione dell'olio; la crusca, ottenuta dalla decorticazione, viene aggiunta per produrre farine integrali; l'endosperma è invece destinato alla produzione di semole, grits e farine con granulometrie variabili. Il processo di macinazione a secco inizia con la pulitura della granella con le spazzole, che consente di eliminare impurità quali polveri e muffe, frammenti minerali e semi estranei. Successivamente il mais viene sottoposto a un leggero condizionamento, mediante incremento controllato del contenuto di umidità. Tale operazione favorisce l'ammorbidimento del

pericarpo e riduce il rischio di frammentazione del germe durante le successive fasi di lavorazione. La decorticazione rappresenta il primo passaggio di frazionamento e consiste nella rimozione meccanica dello strato esterno fibroso, che viene raccolto sotto forma di crusca. La cariosside decorticata è quindi sottoposta a degerminazione, processo che sfrutta le diverse proprietà meccaniche delle componenti della cariosside. Attraverso sistemi a rulli, il germe, più elastico, viene separato dall'endosperma, che viene progressivamente ridotto in particelle di dimensione controllata.

Successivamente, l'endosperma è sottoposto a macinazione a rulli e a successive operazioni di setacciatura, che consentono di ottenere prodotti caratterizzati da differenti granulometrie: dai grits grossolani destinati alla produzione di snack estrusi e cereali per la prima colazione, alle semole per polenta, fino alle farine. Le frazioni amidacee e proteiche residue contribuiscono inoltre alla valorizzazione complessiva dei sottoprodotti. Rispetto alla macinazione a umido, la macinazione a secco presenta diversi vantaggi, tra cui l'assenza di reflui liquidi, un minore fabbisogno energetico e una maggiore flessibilità operativa. Tuttavia, tale processo non consente l'isolamento di amido ad elevata purezza, ottenibile invece attraverso la macinazione a umido.

Macinazione a umido

La macinazione a umido rappresenta il principale processo industriale per la separazione selettiva delle componenti morfo-chimiche della cariosside, finalizzato alla produzione di amido ad elevata purezza e di numerosi co-prodotti ad alto valore commerciale. Il processo si basa su una sequenza integrata di operazioni che comprendono macerazione, degerminazione, macinazione differenziata e separazioni meccaniche e centrifughe.

La fase iniziale consiste nella macerazione delle cariossidi in acqua a circa 50 °C per un periodo compreso tra 30 e 50 ore, in presenza di biossido di zolfo (SO₂). L'aggiunta di SO₂ svolge una duplice funzione: limita lo sviluppo microbico e favorisce la solubilizzazione delle proteine e dei composti azotati. Durante questa fase, il contenuto di umidità della cariosside aumenta fino a circa il 45%, facilitando la successiva separazione delle componenti strutturali. Un sottoprodotto rilevante di questa fase è lo *steep liquor*, soluzione concentrata contenente proteine solubili, zuccheri e acido lattico, successivamente impiegata nella produzione di *corn gluten feed* o come substrato nei processi fermentativi. Dopo la macerazione, le cariossidi vengono sottoposte a degeminazione meccanica mediante mulini a piastre o a dischi, che consentono la separazione del germe, ricco in lipidi. La separazione del germe avviene tramite sistemi idraulici o centrifughi che sfruttano la minore densità di questa frazione rispetto alle altre componenti della cariosside. La frazione residua, costituita principalmente da endosperma ammorbidito, proteine e fibra, viene sottoposta a macinazione fine per liberare amido e proteine dalle strutture cellulari. La fibra viene successivamente separata mediante setacciatura e lavaggi e combinata con lo *steep liquor* per ottenere il *corn gluten feed*, mangime ad elevato contenuto fibroso destinato principalmente all'alimentazione dei ruminanti.

La sospensione ottenuta dalla macinazione viene poi sottoposta a centrifugazione ad alta velocità, che consente la separazione delle frazioni in base alla densità: l'amido tende a sedimentare, mentre la componente proteica rimane in sospensione. La frazione proteica, costituita prevalentemente da zeine, gluteline, albumine e globuline, viene essiccata e commercializzata come *Corn Protein Meal* (CPM) o *Corn Gluten Meal* (CGM). È opportuno precisare che il termine "corn gluten" rappresenta una denominazione tecnico-industriale e non indica la presenza di glutine dannoso per i soggetti celiaci.

Le principali destinazioni dell'amido ottenuto comprendono:

- produzione di amido nativo per industria alimentare, farmaceutica e cartaria;
- produzione di amidi modificati mediante trattamenti chimici, fisici o enzimatici;
- produzione di sciroppi di glucosio, maltodestrine e HFCS tramite processi di idrolisi enzimatica.

Produzione dell'olio di mais

L'olio di mais viene estratto dal germe della cariosside, che rappresenta la principale sede della frazione lipidica del cereale. La produzione si inserisce nel processo di macinazione a umido, durante il quale il germe viene separato dalle altre componenti della cariosside mediante operazioni meccaniche e trattamenti idrici.

Dopo la degerminazione, la frazione fibrosa residua viene separata tramite setacciatura e destinata alla produzione di *corn gluten feed*, ottenuto dalla miscelazione delle fibre con lo *steep liquor* concentrato. Anche questo prodotto è ampiamente utilizzato nell'alimentazione zootecnica.

La frazione rimanente viene sottoposta a separazione centrifuga che consente di isolare l'amido dalle proteine. L'amido può successivamente essere sottoposto a trattamenti tecnologici quali gelatinizzazione, essiccazione, idrolisi enzimatica ed esterificazione, trovando applicazione nei settori alimentare, cartario e tessile.

2.3 DISTRIBUZIONE E CONSUMO

Il mercato italiano del mais risulta fortemente influenzato dalle dinamiche del commercio internazionale, configurandosi come un mercato di derivazione a causa dell'elevata dipendenza dalle importazioni. Il mercato globale del mais, analogamente a quello degli altri cereali, è caratterizzato da elevata volatilità, determinata da fattori strutturali e congiunturali. Tra i fattori strutturali rientra l'aumento della domanda proveniente dai Paesi emergenti, associato alla crescita economica e alla modifica dei modelli alimentari, con maggiore consumo di prodotti di origine animale. Tra i fattori congiunturali si annoverano invece le fluttuazioni dell'offerta e delle scorte mondiali. Nel 2022 l'aumento generalizzato dei prezzi del mais è stato determinato da una combinazione di fattori, tra cui la ripresa della domanda globale nel periodo post-pandemico, l'incremento dei costi di trasporto e delle materie prime energetiche, il conseguente aumento dei prezzi dei fertilizzanti, la crescente domanda cinese di cereali e le dinamiche speculative nei mercati delle commodity. A tali fattori si è aggiunto il conflitto tra Russia e Ucraina, che ha ulteriormente accentuato l'instabilità dei mercati cerealicoli internazionali.

3.1 TIPOLOGIE DI FARINE DEL MAIS

La qualità della polenta dipende non solo dalla varietà di mais utilizzata, ma anche dalla granulometria della farina, ossia dalla dimensione delle particelle ottenute durante la macinazione. La granulometria influenza la consistenza, il profilo sensoriale, i tempi di cottura e gli impieghi gastronomici del prodotto finale. Nel corso della tradizione culinaria italiana si sono consolidate diverse tipologie di farina di mais, ciascuna associata a specifici utilizzi gastronomici. Parallelamente, la cucina contemporanea ha ampliato le possibilità di impiego di tali farine anche al di fuori della preparazione tradizionale della polenta. La farina bramata è caratterizzata da una granulometria grossolana e irregolare ed è spesso ottenuta mediante macinazione a pietra. La presenza parziale del germe conferisce al prodotto un profilo aromatico intenso e una consistenza rustica. Tradizionalmente viene utilizzata per la preparazione di polente compatte, spesso abbinate a preparazioni di carne, selvaggina e formaggi stagionati. In ambito gastronomico contemporaneo trova applicazione anche nella produzione di panature rustiche e prodotti da forno. La farina fioretto

presenta invece una granulometria fine e uniforme, che consente di ottenere polente morbide e vellutate. Tradizionalmente è associata a piatti più delicati, quali preparazioni a base di pesce, funghi e formaggi freschi. La sua texture la rende inoltre adatta alla preparazione di creme di mais e prodotti dolciari tradizionali. La farina integrale di mais conserva tutte le componenti della cariosside, inclusi crusca e germe, risultando più ricca di fibre e micronutrienti. Tale caratteristica conferisce un profilo aromatico più intenso, ma comporta una minore conservabilità a causa della presenza dei lipidi del germe. Attualmente viene valorizzata nella produzione di prodotti da forno senza glutine e alimenti funzionali ad elevato contenuto nutrizionale.

Il fumetto di mais è una farina caratterizzata da granulometria estremamente fine, impiegata prevalentemente nella pasticceria e nella preparazione di polente cremose, vellutate e salse.

Negli ultimi decenni si è inoltre diffusa la farina per polenta istantanea, ottenuta mediante processi di precottura ed essiccazione. Pur presentando caratteristiche sensoriali differenti rispetto alle farine tradizionali, essa consente una preparazione rapida e trova applicazione nella ristorazione moderna e nell'industria alimentare.

Nel contesto gastronomico contemporaneo, la scelta della granulometria della farina rappresenta uno strumento tecnico e creativo che consente di valorizzare differenti consistenze e profili nutrizionali, contribuendo al rinnovamento delle preparazioni tradizionali a base di mais.



➤ hominy o spezzati grossi (3.5-5.4 mm), per corn flakes e mangimifici;

➤ spezzati medi (1.6-3.4 mm), per mangimifici;

➤ grits fini (0.3-1.6 mm) per birrerie e distillerie;

➤ farine (bramata fine, bramata grossa e fioretto, per prodotti vari).

3.2 ASPETTO NUTRIZIONALE DEL MAIS

Il mais è ampiamente utilizzato nell'alimentazione umana sia in forma diretta – ad esempio bollito o arrostito – sia attraverso numerosi prodotti derivati quali popcorn, polenta, snack e cereali per la prima colazione, oltre che come ingrediente in diverse preparazioni gastronomiche. Tuttavia, l'ampia diffusione del suo consumo non implica necessariamente un elevato valore nutrizionale complessivo, poiché il mais rappresenta principalmente una fonte energetica ricca di carboidrati.

Dal punto di vista compositivo, 100 g di granella di mais apportano circa 361 kcal e contengono mediamente 12,5 g di acqua. Sulla sostanza secca, il contenuto nutrizionale risulta costituito da circa 9,2 g di proteine, 3,8 g di lipidi, 75,8 g di carboidrati, rappresentati per circa il 97% da amido e

2,9 g di fibra alimentare. Per quanto riguarda i micronutrienti, il mais contiene potassio, fosforo e, in quantità minori, ferro, calcio, sodio e zinco. Il contenuto vitaminico risulta invece relativamente modesto, in particolare per le vitamine del gruppo B, quali tiamina (B1), riboflavina (B2), niacina (B3 o vitamina PP) e piridossina (B6). Un limite nutrizionale rilevante del mais è rappresentato dal basso contenuto di alcuni amminoacidi essenziali, in particolare lisina e triptofano, che l'organismo umano non è in grado di sintetizzare autonomamente e che devono essere introdotti attraverso l'alimentazione.

Storicamente, il consumo quasi esclusivo di mais come alimento base ha determinato importanti conseguenze sanitarie. In diverse aree dell'Italia settentrionale, in particolare in Veneto e Friuli tra il XVII e il XIX secolo, si diffuse la pellagra, patologia causata dalla carenza di niacina e caratterizzata da dermatiti, disturbi gastrointestinali e alterazioni neurologiche. Tale malattia si sviluppò soprattutto in contesti di forte povertà, nei quali la dieta era basata prevalentemente su polenta e altri cereali poveri di vitamine del gruppo B e amminoacidi essenziali.

Diversa è invece la situazione tradizionalmente riscontrata in Messico, dove il mais rappresenta anch'esso un alimento base, ma viene sottoposto al processo tradizionale della nixtamalizzazione. Questa tecnica prevede la cottura e la macerazione delle cariossidi in soluzione alcalina, generalmente contenente idrossido di calcio. Tale trattamento migliora la biodisponibilità della niacina e di altri nutrienti, oltre a modificare le proprietà tecnologiche della granella. Dal nixtamal si ottengono prodotti tradizionali quali tortillas e, dopo fermentazione, il pozol, alimento storicamente rilevante nelle civiltà precolombiane.

Alcune varietà di mais presentano cariossidi di colore rosso, viola o nero, dovute alla presenza di pigmenti antocianici. Questi composti bioattivi sono oggetto di crescente interesse scientifico per le loro potenziali proprietà antiossidanti e per il possibile ruolo nella prevenzione di patologie cronico-degenerative.

Capitolo 4

LA SOSTENIBILITÀ NEL MAIS

Caso studio: produzione maidicola in Iran

Nell'agricoltura contemporanea il mais rappresenta una coltura caratterizzata da molteplici utilizzi. Sebbene la quota destinata all'alimentazione umana sia relativamente limitata rispetto all'impiego zootecnico e industriale, la coltura mantiene un ruolo rilevante all'interno dei sistemi produttivi agroalimentari.

Dal punto di vista della valorizzazione delle biomasse, la filiera del mais presenta un'elevata efficienza nell'utilizzo delle diverse componenti della pianta. Il germe viene destinato all'estrazione dell'olio di mais, mentre le frazioni non idonee al consumo alimentare, ad esempio per contaminazioni da micotossine, possono essere impiegate nella produzione di mangimi o nella generazione di biometano.

Dopo grano e riso, il mais rappresenta una delle colture più importanti anche in Iran, dove riveste un ruolo strategico per l'alimentazione umana, l'allevamento, l'industria alimentare, il settore farmaceutico e le applicazioni energetiche. La specie è inoltre caratterizzata da un'elevata capacità fotosintetica e di accumulo energetico, caratteristiche che hanno portato alcuni autori a definirla simbolicamente "re dei cereali".

Agricoltura e impatti ambientali

Il rapporto tra ambiente e agricoltura è caratterizzato da una forte interdipendenza, in quanto la produzione agricola si basa sull'utilizzo di risorse naturali e, allo stesso tempo, può generare effetti positivi o negativi sugli ecosistemi. Tra gli impatti ambientali negativi si annoverano l'uso intensivo di fertilizzanti e prodotti fitosanitari, il consumo di fonti energetiche non rinnovabili, la riduzione della biodiversità e l'alterazione degli habitat naturali.

L'attuale modello di produzione e consumo alimentare è sempre più oggetto di discussione in termini di sostenibilità, soprattutto in relazione alla crescita demografica globale, alla riduzione delle superfici coltivabili e all'aumento degli standard di vita. In questo contesto, l'incremento dell'uso di input energetici nei sistemi agricoli ha contribuito ad aumentare la produttività, ma ha anche accentuato problematiche ambientali quali l'inquinamento delle falde acquifere e l'aumento delle emissioni di gas serra.

L'inquinamento delle acque sotterranee può derivare da pratiche agricole diffuse, quali l'uso eccessivo o improprio di fertilizzanti e pesticidi, la gestione non ottimale dei reflui zootecnici e l'utilizzo di combustibili fossili. Una strategia efficace per ridurre tali impatti consiste nel miglioramento dell'efficienza produttiva, ovvero nell'aumento del rapporto tra output agricolo e input energetici, con benefici sia ambientali sia economici.

Un sistema agricolo sostenibile deve pertanto garantire la conservazione delle risorse naturali, la riduzione dell'inquinamento ambientale e la stabilità della produzione nel lungo periodo, conciliando sostenibilità economica e ambientale. Per tale motivo, gli impatti ambientali delle attività agricole devono essere analizzati su differenti scale spaziali, dal livello aziendale a quello nazionale.

Metodi di valutazione della sostenibilità

Esistono diversi strumenti metodologici per la valutazione degli impatti ambientali dei sistemi agricoli, tra cui la mappatura dei rischi ambientali (ERM), la valutazione di impatto ambientale (VIA), gli indicatori agro-ambientali (AEI) e la valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment – LCA).

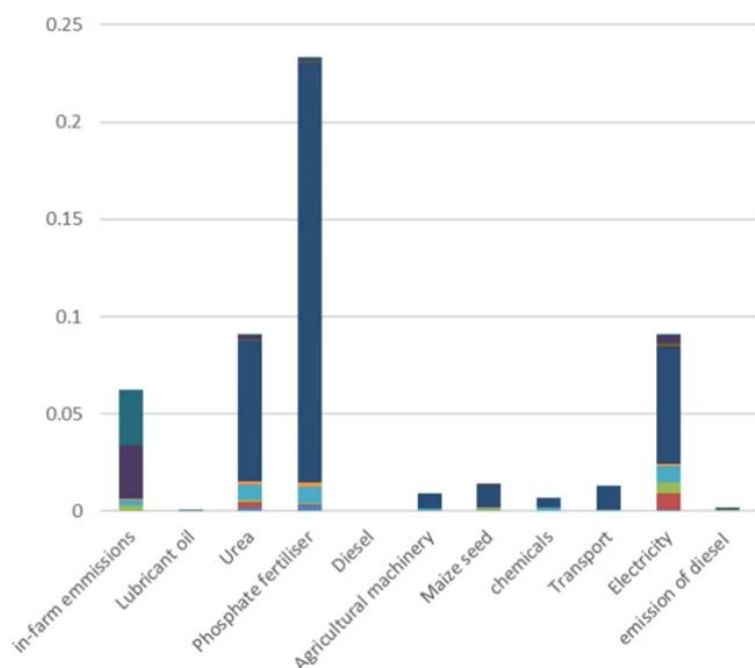
Il metodo LCA rappresenta una metodologia scientifica standardizzata a livello internazionale che consente di analizzare in modo quantitativo gli impatti ambientali associati a un prodotto, processo o servizio lungo l'intero ciclo di vita. Attraverso questo approccio è possibile valutare gli effetti sull'ambiente in termini di emissioni atmosferiche, consumo di risorse naturali e inquinamento del suolo e delle acque.

Numerosi studi hanno applicato l'LCA alla produzione agricola. In Iran, ad esempio, Taghavifar e Khoshnevisan hanno analizzato la produzione di grano, mentre Ghasempour e Ahmadi hanno valutato le prestazioni ambientali delle colture di mais, grano e soia nella provincia di Alborz, evidenziando come fertilizzazione e consumo energetico rappresentino le principali fonti di impatto ambientale. Ulteriori studi sulla produzione di mais da foraggio nell'area di Teheran hanno mostrato che l'ecotossicità acquatica rappresenta uno degli impatti ambientali più rilevanti. Sadeghi e collaboratori hanno inoltre evidenziato come l'aumento delle dosi di fertilizzanti azotati comporti un incremento delle emissioni di ammoniaca (NH₃), ossidi di azoto (NO_x), protossido di azoto (N₂O), anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e anidride solforosa (SO₂), senza necessariamente determinare un aumento proporzionale della resa produttiva. Analogamente, studi condotti nella regione di Kermanshah hanno dimostrato come la riduzione dell'impiego di fertilizzanti chimici e

combustibili fossili possa contribuire al miglioramento dell'efficienza energetica e alla riduzione del potenziale di riscaldamento globale.

Obiettivi del caso studio

Il crescente interesse delle comunità scientifiche, dei decisori politici e dei consumatori verso sistemi alimentari sostenibili rende sempre più necessario disporre di dati affidabili sui sistemi



produttivi agricoli. Il presente studio analizza la produzione di mais nella provincia di Ilam, in Iran, con particolare riferimento al consumo energetico e agli impatti ambientali, con l'obiettivo di individuare strategie utili a migliorare l'efficienza

energetica e a ridurre l'impiego complessivo di risorse.

Le evidenze riportate nella letteratura scientifica mostrano il contributo dei diversi input produttivi alle principali categorie di impatto ambientale associate alla coltivazione del mais. Secondo quanto riportato in *Scientific Reports* (ISSN 2045-2322), la Figura 2 evidenzia il ruolo predominante dell'elettricità in diverse categorie di impatto ambientale. In particolare l'energia elettrica risulta responsabile del;

- 67,5% dell'esaurimento delle risorse fossili
- 65,1% dell'ecotossicità terrestre
- 57,6% dell'assottigliamento dello strato di ozono
- 52,5% dell'ossidazione fotochimica
- 46,2% del potenziale di riscaldamento globale.

Tali risultati indicano come il consumo di elettricità rappresenti uno dei principali fattori di pressione ambientale nella produzione maidicola. La quota maggiore dell'energia elettrica impiegata nella coltivazione del mais è generalmente associata ai sistemi di irrigazione. Di conseguenza, l'introduzione di tecnologie irrigue più efficienti dal punto di vista idrico ed energetico rappresenta una strategia fondamentale per ridurre l'impatto ambientale complessivo. In questo contesto, l'impiego di fonti energetiche rinnovabili, come gli impianti fotovoltaici aziendali,

potrebbe contribuire in modo significativo alla riduzione del fabbisogno energetico derivante da fonti fossili.

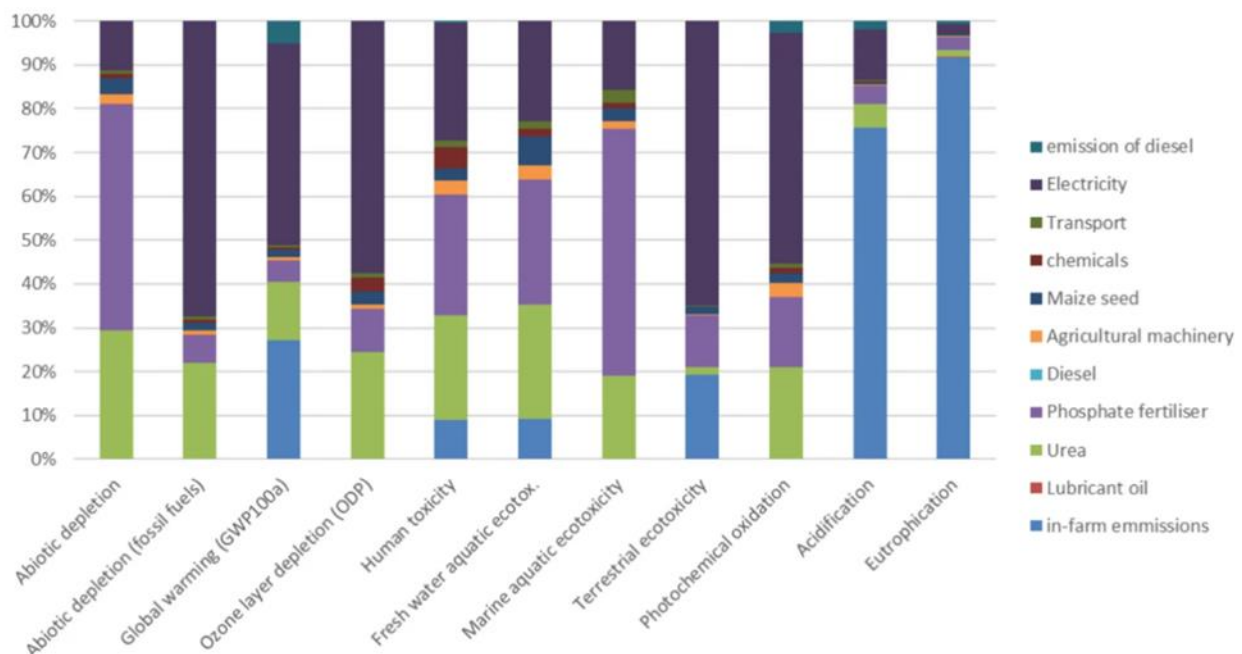
Oltre al consumo di energia elettrica, un ruolo rilevante nelle categorie di impatto ambientale è svolto dall'impiego di fertilizzanti chimici.

I fertilizzanti fosfatici risultano responsabili;

- 56,3% dell'ecotossicità acquatica marina
- 51,7% dell'esaurimento abiotico delle risorse,
- 28,6% dell'ecotossicità delle acque dolci
- 27,4% della tossicità umana
- 16,1% dell'ossidazione fotochimica

Analogamente, i fertilizzanti a base di urea contribuiscono al 29,3% dell'esaurimento abiotico, al 24,4% dell'assottigliamento dello strato di ozono, al 23,9% della tossicità umana, al 22% dell'esaurimento delle risorse fossili e al 20,9% dell'ossidazione fotochimica.

La progettazione di sistemi agricoli a basse emissioni deve pertanto considerare attentamente la gestione della fertilizzazione chimica. L'ottimizzazione delle dosi fertilizzanti, basata sulle caratteristiche pedologiche e sulle esigenze nutrizionali delle colture, rappresenta una delle principali strategie per ridurre le emissioni in campo e limitare il consumo di materie prime.



La Figura 3 evidenzia ulteriormente il contributo relativo dei diversi input produttivi nelle categorie di impatto ambientale, mostrando come fertilizzanti fosfatici, elettricità e fertilizzanti azotati rappresentino i fattori maggiormente responsabili degli impatti associati alla produzione di una

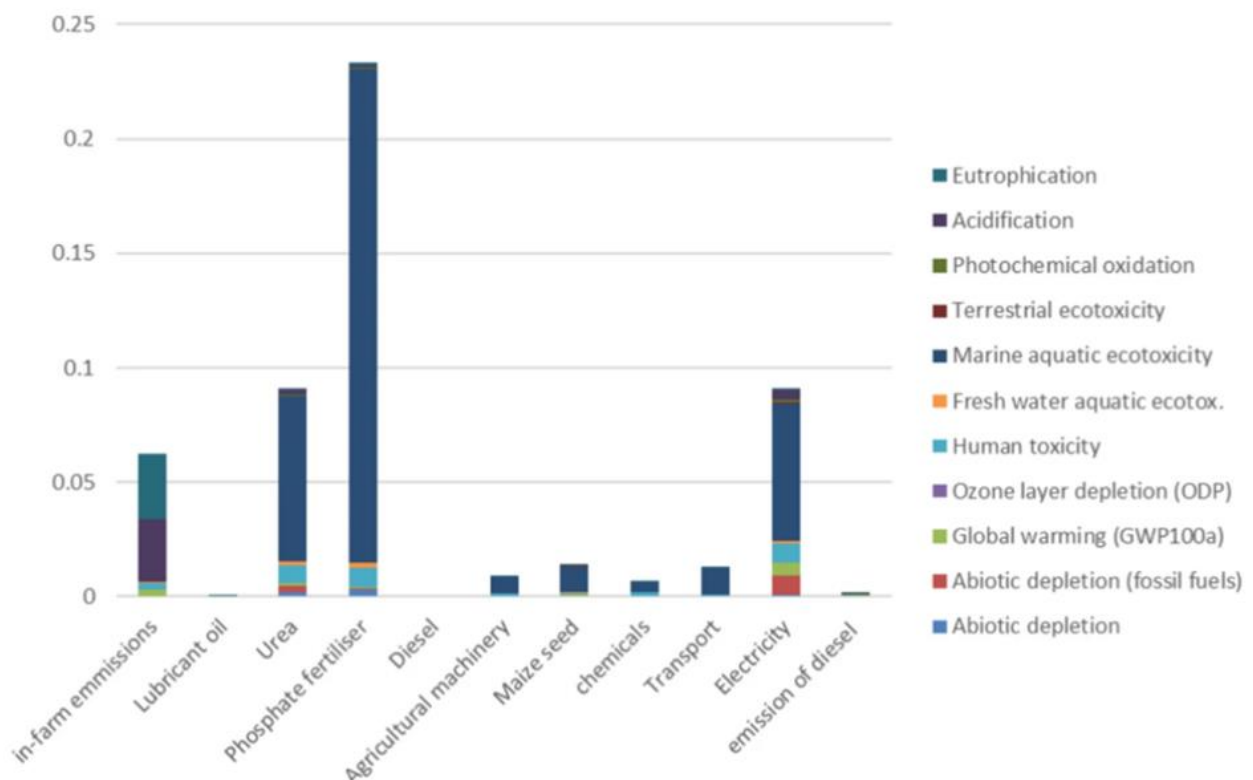
tonnellata di mais. L'elevato consumo energetico risulta principalmente correlato alle operazioni di irrigazione, confermando quanto riportato da numerosi studi presenti in letteratura.

Diversi autori hanno evidenziato come i fertilizzanti chimici costituiscano una delle principali fonti di emissioni climalteranti nei sistemi maidicoli. Pelton ha dimostrato che l'impiego di fertilizzanti azotati contribuisce in modo significativo al potenziale di riscaldamento globale nei sistemi di produzione del mais negli Stati Uniti. Analogamente, Holka e Bieńkowski hanno evidenziato come i processi di fertilizzazione chimica possano rappresentare una delle principali fonti di emissioni di gas serra in agricoltura.

Tra le strategie proposte per ridurre l'utilizzo di fertilizzanti chimici si annoverano la modulazione delle dosi in funzione delle reali esigenze delle colture, l'eliminazione dei sussidi che incentivano l'uso eccessivo di fertilizzanti e l'adozione di pratiche agronomiche sostenibili, quali il sovescio e l'introduzione di colture leguminose nelle rotazioni. Le leguminose, infatti, migliorano la fertilità del suolo attraverso la fissazione biologica dell'azoto atmosferico, favoriscono l'accumulo di carbonio organico nel terreno e riducono il fabbisogno complessivo di fertilizzanti minerali.

Ulteriori interventi per ridurre l'impatto ambientale della coltivazione del mais includono l'impiego di pompe idrauliche ad alta efficienza energetica e l'utilizzo di fonti di energia rinnovabile, quali energia solare ed eolica. Anche l'adozione di sistemi di agricoltura integrata può contribuire a migliorare la sostenibilità della produzione maidicola, grazie alla riduzione del consumo energetico e al miglioramento delle rese produttive.

Da: [Valutazione del ciclo di vita ambientale della produzione di mais nelle regioni tropicali](#)



Il ruolo di ciascun input nelle categorie di impatto nella produzione di una tonnellata di mais.

Uno studio recente pubblicato il 28 agosto 2024 su *Scientific Reports* ha analizzato la valutazione del ciclo di vita ambientale della produzione di mais nelle regioni tropicali della provincia di Ilam (Iran). I dati sono stati raccolti attraverso interviste dirette e questionari somministrati a 102 agricoltori. I risultati dell'analisi energetica hanno evidenziato che i principali input energetici erano rappresentati;

- fertilizzanti azotati (30,98%)
- carburante (26,59%)
- elettricità (20,75%)
- acqua per irrigazione (13,57%)

L'energia media in ingresso è risultata pari a 197.817,25 MJ per ettaro, mentre l'energia prodotta è stata stimata in 873.197,10 MJ per ettaro. Il rapporto tra energia in uscita ed energia in ingresso ha determinato un indice di efficienza energetica pari a 4,41, indicando una buona capacità del sistema colturale di convertire l'energia impiegata in produzione agricola. Il settore agricolo contribuisce in modo significativo alle emissioni di gas serra globali. I risultati dell'analisi LCA hanno confermato che i fertilizzanti chimici, in particolare quelli fosfatici, e il consumo di energia elettrica rappresentano i principali fattori di impatto ambientale nella coltivazione del mais. L'adozione di buone pratiche agricole può contribuire in modo sostanziale alla riduzione di tali impatti.

Tra le pratiche più efficaci si evidenziano l'impiego di fertilizzanti organici, quali letame avicolo opportunamente trattato, l'adozione di sistemi di irrigazione ad alta efficienza, la riduzione degli sprechi idrici e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Studio sulla riduzione dell'impronta di carbonio e azoto nella produzione di mais

Un ulteriore contributo alla comprensione della sostenibilità della coltivazione del mais è fornito da uno studio pubblicato su *Frontiers*, condotto con la collaborazione della Facoltà di Scienze delle Risorse e dell'Ambiente dell'Università Agraria della Mongolia Interna, del Laboratorio chiave per la qualità del suolo e delle risorse nutritive della Mongolia Interna e della Technische Universität München (Germania).

Lo studio ha analizzato la riduzione dell'impronta di carbonio (Carbon Footprint, CF) e dell'impronta di azoto (Nitrogen Footprint, NF) nella produzione di mais attraverso l'ottimizzazione della gestione della fertilizzazione azotata e dei sistemi irrigui. Le sperimentazioni sono state condotte tra il 2019 e il 2020 in sistemi di coltivazione maidicola irrigati mediante inondazione e irrigazione a goccia nella Cina nord-occidentale, utilizzando un approccio di valutazione del ciclo di vita (Life Cycle Assessment, LCA).

Oltre alla fertilizzazione azotata, il metodo di irrigazione rappresenta uno dei principali fattori che influenzano la crescita delle colture e la formazione della resa produttiva. La distribuzione disomogenea delle risorse idriche costituisce, infatti, uno dei principali limiti allo sviluppo agricolo regionale. Secondo la FAO (2020), oltre il 60% delle superfici irrigate nel mondo è soggetto a gravi fenomeni di scarsità idrica, con particolare incidenza nella Cina nord-occidentale, in alcune aree dell'Africa e nel Medio Oriente.

L'aumento della domanda alimentare globale e il cambiamento climatico hanno favorito lo sviluppo di sistemi irrigui più efficienti. Numerosi studi hanno dimostrato che l'ottimizzazione dei tempi e delle frequenze di irrigazione consente di incrementare significativamente la resa delle colture e l'efficienza nell'uso dell'acqua. In particolare, l'introduzione di tecniche di irrigazione a goccia e a

pioggia rappresenta una strategia efficace per affrontare la crescente scarsità idrica nelle regioni aride e semi-aride.

Lo studio evidenzia tuttavia la necessità di integrare sistemi irrigui efficienti con strategie di gestione dell'azoto adattate alle specifiche condizioni pedoclimatiche regionali, al fine di massimizzare le rese colturali riducendo al contempo il consumo di acqua e l'impatto ambientale.

4.1 PERDITE DI AZOTO REATTIVO

I risultati sperimentali hanno dimostrato che il consumo di energia elettrica per l'irrigazione, la lisciviazione dell'azoto e la volatilizzazione dell'ammoniaca (NH_3) rappresentano i principali fattori responsabili delle perdite di azoto reattivo (Nr) nei sistemi maidicoli.

Lo studio ha confrontato tre diversi trattamenti fertilizzanti:

- FP: fertilizzazione convenzionale praticata dagli agricoltori
- OM: fertilizzazione organo-minerale
- OMI: fertilizzazione organo-minerale con inibitore dell'ureasi

Nel sistema di irrigazione per inondazione, le perdite di azoto reattivo registrate sono risultate pari a: **Anno 2019**

- FP: 129,9 kg N ha⁻¹
- OM: 75,2 kg N ha⁻¹
- OMI: 69,6 kg N ha⁻¹

Anno 2020

- FP: 146,9 kg N ha⁻¹
- OM: 86,0 kg N ha⁻¹
- OMI: 80,0 kg N ha⁻¹

Rispetto al trattamento convenzionale (FP), i trattamenti OM e OMI hanno determinato una riduzione significativa delle perdite di azoto reattivo. In particolare, il trattamento OMI ha mostrato ulteriori riduzioni rispetto al trattamento OM, evidenziando l'efficacia dell'impiego di inibitori dell'ureasi nella limitazione delle perdite di azoto.

Nel sistema di irrigazione a goccia, le perdite di azoto reattivo sono risultate complessivamente inferiori rispetto all'irrigazione per inondazione. Nel 2019, le perdite sono state pari a 61,2 kg N ha⁻¹ per OM, 55,2 kg N ha⁻¹ per OMI e 97,4 kg N ha⁻¹ per FP. Nel 2020, i valori registrati sono stati rispettivamente pari a 63,8 kg N ha⁻¹, 60,5 kg N ha⁻¹ e 106,6 kg N ha⁻¹.

IMPRONTA AZOTO

L'impronta di azoto (NF) dei trattamenti OM e OMI è risultata inferiore rispetto alla fertilizzazione convenzionale senza compromettere la resa produttiva del mais. I valori più elevati di NF sono stati osservati nei sistemi irrigui per inondazione con fertilizzazione convenzionale, con valori pari a 9,0 kg N t⁻¹ nel 2019 e 16,7 kg N t⁻¹ nel 2020.

Nei sistemi irrigui a goccia, i valori di NF sono risultati inferiori. In particolare, i trattamenti OM e OMI hanno mostrato riduzioni dell'impronta di azoto comprese tra il 26% e il 37% rispetto al

trattamento convenzionale. Anche in questo caso, il trattamento OMI ha evidenziato prestazioni ambientali migliori rispetto al trattamento OM.

4.2 IMPRONTA CARBONIO E GAS SERRA

L'analisi LCA ha inoltre dimostrato che l'impiego combinato di fertilizzazione organo-minerale con inibitore dell'ureasi non ha comportato riduzioni significative della resa produttiva, ma ha consentito di ridurre in modo sostanziale:

- emissioni di protossido di azoto (N_2O)
- volatilizzazione di ammoniaca
- perdite complessive di azoto reattivo
- impronta di carbonio e impronta di azoto del sistema colturale

Lo studio ha evidenziato che i principali fattori responsabili dell'impronta di azoto nei sistemi maidicoli sono rappresentati dalla lisciviazione dell'azoto, dal consumo di energia elettrica per l'irrigazione e dalla volatilizzazione dell'ammoniaca. L'impronta di carbonio, invece, è risultata influenzata principalmente dall'utilizzo di fertilizzanti minerali (N, P_2O_5 e K_2O), dal consumo energetico per l'irrigazione e dalle emissioni di N_2O .

4.3 IMPLICAZIONI PER LA SOSTENIBILITÀ AGRICOLA

I risultati dello studio dimostrano che l'integrazione tra pratiche avanzate di gestione della fertilizzazione azotata e sistemi irrigui ad alta efficienza rappresenta una strategia efficace per migliorare la sostenibilità della produzione maidicola.

In prospettiva futura, la ricerca dovrebbe concentrarsi sull'ottimizzazione dell'apporto di fertilizzanti azotati attraverso sistemi di gestione di precisione, con l'obiettivo di minimizzare l'impatto ambientale e massimizzare la redditività economica dei sistemi agricoli.

4.4 Analisi Ambientale Comparata dei Sistemi Cerealicoli tramite LCA in pianura padana

Introduzione

La valutazione del ciclo di vita (**Life Cycle Assessment, LCA**) costituisce un approccio metodologicamente consolidato per quantificare gli impatti ambientali legati ai sistemi di produzione agricola nel loro complesso, dalla produzione di input alla coltivazione stessa, fino alla resa finale in prodotto secco. LCA è normato da norme internazionali (ISO 14040 e ISO 14044) e permette di confrontare sistemi colturali differenti su una base comune di unità funzionale. In questo studio, l'unità funzionale è definita come 1 tonnellata di granella secca destinata alla produzione di mangimi. Sono stati confrontati cinque sistemi di mais (classi 300–700), frumento e triticale coltivati nella Pianura Padana (Lombardia).

L'analisi qui riportata si concentra su tre dimensioni ambientali fondamentali:

- Consumo idrico
- Emissioni di gas a effetto serra (GHG)
- Input di fertilizzazione e relativa quota di impatto ambientale

Descrizione dei confini del sistema e dei sistemi colturali

Sono stati analizzati in dettaglio il frumento (*Triticum* spp. L.) e il tritcale (x *Triticosecale* Wittmack), entrambi colture invernali, e il mais (*Zea mais* L.) come coltura estiva.

In particolare, sono state considerate cinque classi di mais: mais 300, mais 400, mais 500, mais 600 e mais 700. Tutte le coltivazioni sono situate nell'area della Pianura Padana (45° 12' long. N, 10° 15' lat. E) nella regione Lombardia (Nord Italia). Le condizioni climatiche e pedologiche di questa regione sono favorevoli alla coltivazione dei cereali. Il clima locale è di transizione tra il clima mediterraneo e quello centroeuropeo, con una temperatura media annua di 12 °C. Le precipitazioni sono concentrate principalmente in autunno e primavera, con una media annua di 745 mm nella zona. La tessitura principale del terreno è: 52% sabbia, 30% limo e 17% argilla.

Come accennato in precedenza, questo studio è stato condotto tenendo conto di tutte le attività agricole che si svolgono all'interno delle piantagioni e prima della distribuzione dei cereali (prospettiva "dalla culla al cancello"). Pertanto, i confini di sistema di ciascun sistema agricolo comprendono tutte le attività o i processi, dalla preparazione del campo alla raccolta della biomassa. Inoltre, sono stati inclusi nei confini di sistema anche la produzione e l'utilizzo di input, la distribuzione alle aziende agricole, le emissioni nel suolo, nell'aria e nell'acqua derivanti dall'applicazione di prodotti fitosanitari e dall'uso di gasolio, nonché la produzione, la manutenzione, l'uso e lo smaltimento dei macchinari agricoli .

I diversi sistemi agricoli sono stati suddivisi in tre fasi principali: preparazione del campo (S1), crescita della coltura (S2) e raccolta della biomassa (S3).

Tabella 2. Cronologia delle operazioni sul campo e dati di inventario (per ettaro) per la coltivazione del mais (classi 300, 400, 500, 600 e 700).

Attività scenica		Tempo (mese)	Trattore (A)		Macchina operatrice			A + B		Tassi di input
			Peso (kg)	Potenza (kW)	Tipo	Peso (kg)	Potenza (kW)	Lavoro efficace (kg ha ⁻¹)	Consumo di gasolio (kg ha ⁻¹)	
Preparazione del campo	Fertilizzazione organica	Maggio	6500	120	Spandil etame	2500	40	2.5 2.2	4.71 5.36	45 t ha ⁻¹ Digestato ^a 85 t ha ⁻¹ Digestato ^b
	Aratura	Maggio	8500	150	Vomer e	2000	80	0,8	22.64	—
	Fertilizzazione minerale ^c	Maggio	5050	90	Spandiconcime	350	50	3.0	3.17	100 kg h ⁻¹ P 100 kg h ⁻¹ K
	Strazianti	Maggio	5050	90	Erpice rotante	1000	55	0,5	24.24	—
	Semina ^d	Maggio	6500	120	Semina trice di precisi	900	70	1.5	10.27	Semi·ha ⁻¹

Attività scenica	Temp o (mese)	Trattore (A)		Macchina operatrice			A + B		Tassi di input	
		Peso (kg)	Potenz a (kW)	Tipo	Peso (kg)	Potenz a (kW)	Lavoro efficace (kg ha ⁻¹)	Consumo di gasolio (kg ha ⁻¹)		
					one					
Crescita delle colture	Controll o degli erbicidi	Magg io	4580	80	Macchi na spruzza trice	500	45	3.0	3.32	4 kg h ⁻¹ Lumax ^e
	Controll o degli erbicidi	Giugn o	4580	80	Macchi na spruzza trice	500	45	3.0	3.32	1 kg ha ⁻¹ Dopp io (S- metolacior)
	Controll o degli erbicidi ^f	Giugn o	4580	80	Macchi na spruzza trice	500	45	3.0	3.32	1 kg ha ⁻¹ Dopp io (S- metolacior)
	Zappatur a	Giugn o	4580	80	macchi na sarchiat rice	500	25	3.0	2,75	—
	Fertilizza zione minerale	Giugn o	5050	90	Spandi concim e	350	50	3.0	3.17	200 kg ha ⁻¹ Urea ^e 60 kg ha ⁻¹ Urea ^f
	Irrigazio ne	Lugli o- agost o	4450	^N	Pompa	400	^N	0,83	10.13	800 m ³ ha ⁻¹ ^g
Raccolt a della biomass a	Raccolta	sette mbre	14.00 0	363	Mietitr ebbia	—	—	2,0 ^h 2,0 ⁱ 2,0 ^j 2,5 ^k 2,5 ^l	15.78 ^h 16.95 ⁱ 19.70 ^j 20.11 ^k 19.79 ^l	—

Tabella 1. Cronologia delle operazioni sul campo e dati di inventario (per ettaro) per la coltivazione di grano e tritiale.

F fase del ciclo di vita	Emissioni GHG (kg C O ₂ eq/kg farina)	Incidenza GHG (%)	Consumo energetico (MJ/kg farina)	Incidenza energia (%)	Consumo idrico (m ³ /kg farina)	Incidenza acqua (%)
Produzione agraria (coltivazione →	0,45 – 0,70	55 – 65%	3,5 – 6,0	40 – 50%	0,60 – 1,20	> 95%

raccolta)						
Trasformazione in farina (trasporto, macinazione, stoccaggio, commercializzazione)	0,10 – 0,20	10 – 20%	1,5 – 3,0	20 – 30%	0,02 – 0,05	2 – 4%
Utilizzo domestico (produzione della polenta)	0,15 – 0,30	15 – 30%	2,0 – 4,0	25 – 35%	0,004 – 0,006	< 1%
Totale	0,75 – 1,20	100%	7 – 13	100%	0,62 – 1,25	100%

Emissioni di Gas a Effetto Serra (GHG)

Le emissioni di gas a effetto serra, espresse come equivalenti di CO₂, ovvero sommandone l'effetto con unità omogenee sono uno degli indicatori di impatto ambientale più utilizzati nelle LCA in agricoltura. Le principali fonti di emissioni nei sistemi colturali sono:

Sistema colturale	GHG (kg CO ₂ eq/t)	% rispetto a Mais 300
Mais classe 300	631	100
Mais classe 600	379	60
Mais classe 700	372	59
Frumento	498	79
Triticale	492	78

- la produzione dei fertilizzanti minerali (processo energivoro)
- le emissioni in campo (in particolare N₂O derivanti dall'applicazione di fertilizzanti azotati)
- l'uso di carburanti fossili (lavorazioni meccaniche)

I sistemi colturali di mais con maggiore intensità di fertilizzazione e resa più bassa (come la classe 300) presentano impatti significativamente più elevati in termini di gas serra per unità di prodotto. Le classi di mais 600 e 700 evidenziano impatti ridotti di oltre il 40% rispetto alla classe 300, principalmente grazie a rese maggiori e minori quantità di fertilizzanti minerali applicati. Frumento e tritiale, pur non essendo irrigati, mostrano impatti intermedi, che riflettono l'elevato contributo delle emissioni di N₂O derivanti dalla fertilizzazione minerale invernale.

Consumi Idrici

Nella valutazione LCA, la categoria di impatto “water depletion” tiene conto del consumo di risorse idriche legate all'irrigazione e al ciclo produttivo. Nei sistemi studiati, il mais richiede irrigazione (fino a circa 3200 m³/ha), mentre frumento e tritiale non sono irrigati.

Sistema	Consumo idrico (m ³ /t)
Mais classe 300	301
Mais 600–700	~220
Frumento	~0 (non irrigato)
Tritiale	~0 (non irrigato)

I risultati evidenziano che il consumo idrico è un fattore discriminante tra colture irrigue e non irrigue. Nel contesto della Pianura Padana, la coltura di mais dipende in modo significativo da risorse idriche superficiali o sotterranee durante la stagione di crescita, mentre frumento e tritiale sfruttano in prevalenza l'acqua piovana. Ciò conferma che l'irrigazione costituisce una componente ambientale critica nei sistemi maidicoli.

Input di Concimazione e Impatti Correlati

La fertilizzazione minerale è una componente cruciale delle LCA agricole, in quanto la produzione di fertilizzanti è spesso associata a consumi energetici elevati e, una volta applicati al suolo, a emissioni di gas a effetto serra (soprattutto N₂O), volatilizzazioni di NH₃ e perdite di nutrienti. La letteratura indica che l'uso di azoto sintetico è frequentemente la principale sorgente di emissioni nei sistemi cerealicoli convenzionali.

Confronto delle quantità di fertilizzanti

Sistema	Urea (kg/ha)	Altri N	Emissioni N ₂ O (kg/ha)
---------	--------------	---------	------------------------------------

Sistema	Urea (kg/ha)	Altri N	Emissioni N ₂ O (kg/ha)
Mais 300	200	P + K	1.29
Mais 600–700	60	—	0.56
Frumento	60	60 nitrato ammonico	0.72
Triticale	Simile al frumento		

L'aumento della quantità di fertilizzante azotato minerale si associa direttamente a maggiori emissioni di N₂O dal suolo, confermando una relazione ben documentata in letteratura secondo cui l'intensità di fertilizzazione è il principale driver delle emissioni di gas serra nei sistemi cerealicoli. Inoltre, la produzione stessa di fertilizzanti contribuisce in modo rilevante all'impronta di carbonio complessiva dei sistemi agricoli.

Discussione Scientifica

I risultati dell'analisi comparativa mostrano che:

-La resa produttiva è inversamente correlata all'impatto ambientale per unità di prodotto: sistemi con rese maggiori (come mais classi 600–700) mostrano impatti inferiori quando espressi per tonnellata prodotta.

-La fertilizzazione minerale azotata costituisce la principale fonte di impatto nel contesto delle emissioni di gas serra. Interventi di efficienza nella gestione dell'azoto rappresentano quindi leve fondamentali per la mitigazione degli impatti.

-La dipendenza dall'irrigazione rappresenta un fattore ambientale critico per il mais, accentuando il consumo di risorsa idrica rispetto alle colture non irrigate come frumento e triticale.

-Queste evidenze sono coerenti con la letteratura scientifica che individua la fertilizzazione e l'uso di input energetici come principali driver degli impatti ambientali nei sistemi agricoli intensivi.

sistema di coltivazione		Resa (t _{WM} /ha)
Grano	Grano	6.55
	Paglia	6,99
Triticale	Grano	6.72
	Paglia	7.45
Classe di mais 300	Grano	6.71
	Paglia	8.59

sistema di coltivazione		Resa (t _{WM} /ha)
Classe di mais 400	Grano	9.27
	Paglia	12.21
Classe di mais 500	Grano	12.72
	Paglia	15.09
Classe di mais 600	Grano	14.78
	Paglia	17.69
Classe di mais 700	Grano	13,98
	Paglia	16.01

Conclusioni

In questo studio, i sistemi colturali delle più estese colture cerealicole coltivate nel Nord Italia interamente dedicate alla produzione di granella per mangimi (grano, tritcale e cinque diverse classi di mais) sono stati valutati e confrontati in dettaglio da una prospettiva ambientale. L'obiettivo era identificare l'opzione più sostenibile e le attività critiche coinvolte. In base ai risultati ambientali, la selezione del miglior sistema di produzione cerealicola dipende da diversi assunti metodologici come l'unità funzionale (UF) e i criteri di allocazione considerati. Si può concludere che la produzione di prodotti agrochimici e le emissioni in campo derivanti dalla loro applicazione rappresentano *punti critici* ambientali in tutti i sistemi colturali oggetto di valutazione. Pertanto, la produzione e l'uso di fertilizzanti minerali esercitano un contributo notevole sul profilo ambientale. Dal punto di vista dell'allocazione economica e di massa, la classe di mais 300 è stata il cereale con il profilo ambientale peggiore, poiché ha mostrato i maggiori impatti in tutte le categorie ambientali oggetto di valutazione. La necessità di pratiche agricole più intensive (principalmente attività di fertilizzazione) e le minori rese di biomassa sono state responsabili dei risultati ambientali negativi per la classe di mais 300. Al contrario, le classi di mais 600 e 700 sono state le colture cerealicole con i migliori risultati ambientali in quasi tutte le categorie studiate, a causa della minore necessità di fertilizzazione e della maggiore resa di biomassa. Tuttavia, i risultati cambiano sostanzialmente se si considera un'UF basata sul terreno (ad esempio 1 ha). In questo caso, la classe 500 del mais sarebbe l'opzione peggiore a causa dei maggiori requisiti di attività agricole e agrofarmaci rispetto alle altre colture. Infine, è stata considerata una valutazione di sensibilità basata sull'allocazione degli oneri ambientali al digestato utilizzato come fertilizzante organico, in quanto prezioso coprodotto del processo di digestione anaerobica. Secondo i risultati, la fertilizzazione organica dovrebbe essere un passaggio fondamentale in tutti i sistemi colturali oggetto di valutazione. Pertanto, gli oneri ambientali associati alla produzione di fertilizzanti organici dovrebbero richiedere particolare attenzione. Infatti, nei sistemi colturali oggetto di analisi, gli impatti ambientali potrebbero aumentare dall'8% al 3000% rispetto alla mancata considerazione degli impatti legati alla produzione di digestato. Questa conclusione potrebbe essere estrapolata ad altri sistemi che eliminano questi oneri aggiuntivi attribuiti alla produzione di fertilizzanti organici.

ANALISI COMPARATIVA DI IBRIDI DI MAIS PRECOCI (FAO 200–300–400) IN FRIULI VENEZIA GIULIA – ANNO 2024

Il presente elaborato analizza le performance produttive ed ambientali di ibridi di mais precoci (classi FAO 200, 300 e 400) coltivati in Friuli Venezia Giulia nell'anno 2024. Sono state confrontate le rese medie di due località sperimentali e stimati il consumo idrico stagionale, l'efficienza idrica e le emissioni di gas serra per ettaro. I risultati evidenziano un incremento della

resa con l'aumentare della classe FAO, accompagnato tuttavia da un aumento del fabbisogno idrico e delle emissioni climalteranti. L'analisi indica che la classe FAO 300 rappresenta il miglior compromesso tra produttività e sostenibilità ambientale nelle condizioni pedoclimatiche considerate. la classificazione FAO identifica la precocità degli ibridi in funzione della durata del ciclo vegetativo. Le classi oggetto di studio sono:

- FAO 200: ibridi molto precoci
- FAO 300: ibridi precoci
- FAO 400: ibridi medio-precoci

La scelta della classe FAO influisce su resa, contenuto idrico alla raccolta, fabbisogno irriguo e impatto ambientale. L'obiettivo dello studio è valutare comparativamente:

- la resa produttiva
- il consumo idrico stimato
- l'efficienza nell'uso dell'acqua
- le emissioni di gas serra per ettaro

DATI PRODUTTIVI

Sono stati utilizzati dati medi di resa (t/ha al 15,5% di umidità) relativi a due località del Friuli Venezia Giulia nell'anno 2024: Castions di Strada e Rivignano. Le rese medie per classe FAO risultano:

- Classe FAO 200: 11,3 t/ha
- Classe FAO 300: 12,2 t/ha
- Classe FAO 400: 14,1 t/ha

STIMA DEL CONSUMO IDRICO

Il fabbisogno idrico stagionale è stato stimato sulla base di dati agronomici medi per il Nord Italia.

- FAO 200: 450 mm (4.500 m³/ha)
- FAO 300: 550 mm (5.500 m³/ha)
- FAO 400: 650 mm (6.500 m³/ha)

Si considera che 1 mm di acqua corrisponde a 10 m³/ha.

EFFICIENZA IDRICA

L'efficienza idrica è stata calcolata come tonnellate prodotte per 1000 m³ di acqua utilizzata.

- FAO 200: 2,51 t/1000 m³
- FAO 300: 2,22 t/1000 m³
- FAO 400: 2,17 t/1000 m³

EMISSIONI DI GAS SERRA

Le emissioni sono state stimate utilizzando un fattore medio di 0,41 kg CO₂ equivalente per kg di granella prodotta (410 kg CO₂e per tonnellata), derivato da studi di Life Cycle Assessment.
Emissioni per ettaro:

-FAO 200: 4.633 kg CO₂e/ha

-FAO 300: 5.002 kg CO₂e/ha

-FAO 400: 5.781 kg CO₂e/ha

I risultati evidenziano un compromesso tra produttività e sostenibilità ambientale. Gli ibridi FAO 400 garantiscono la massima resa ma comportano maggior consumo idrico e maggiori emissioni per ettaro. Gli ibridi FAO 200 risultano più efficienti sotto il profilo idrico ma meno produttivi. La classe FAO 300 rappresenta il miglior equilibrio tra resa, consumo di risorse ed emissioni, risultando particolarmente adatta alle condizioni pedoclimatiche del Friuli Venezia Giulia. Dall'analisi comparativa emerge che: La classe FAO 400 presenta la maggiore produttività ma anche il più elevato impatto ambientale per ettaro.
La classe FAO 200 garantisce la migliore efficienza idrica ma rese inferiori.
La classe FAO 300 rappresenta il miglior compromesso tra produttività e sostenibilità.

In un contesto di cambiamento climatico e crescente pressione sulle risorse idriche, la scelta varietale deve considerare non solo la resa ma anche l'efficienza nell'uso delle risorse.

Capitolo 5

DISCUSSIONE

L'analisi del ciclo di vita della polenta, condotta attraverso una valutazione di tipo screening, ha permesso di stimare l'impatto ambientale associato alle principali fasi della filiera: produzione agraria del mais, trasformazione in farina e utilizzo domestico. L'unità funzionale considerata è pari a 1 kg di farina di mais destinata al consumo sotto forma di polenta. I risultati ottenuti, basati su dati medi di letteratura scientifica e database LCA, consentono di individuare sia gli ordini di grandezza degli impatti ambientali, sia il contributo percentuale delle singole fasi lungo l'intero ciclo di vita.

5.1 produzione agraria

La fase di produzione agraria del mais risulta essere la più impattante dal punto di vista ambientale. In termini di emissioni di gas a effetto serra, essa contribuisce mediamente tra 0,45 e 0,70 kg CO₂ equivalente per kg di farina, rappresentando circa il 55–65% delle emissioni complessive associate al ciclo di vita della polenta. Questo risultato è pienamente coerente con la letteratura LCA relativa alle colture cerealicole, che identifica nella fase agricola il principale hotspot climatico.

Per quanto riguarda il consumo energetico, la produzione agraria richiede mediamente 3,5–6 MJ per kg di farina, pari a circa il 40–50% del consumo energetico totale. Tale energia è principalmente associata all'uso di carburanti per le lavorazioni meccaniche del suolo, alla produzione dei fertilizzanti e, nei sistemi irrigui, all'energia necessaria per il pompaggio dell'acqua.

Il consumo idrico risulta fortemente concentrato in questa fase: la produzione agraria del mais comporta un utilizzo compreso tra 0,6 e 1,2 m³ di acqua per kg di farina, che corrisponde a oltre il 95% del consumo idrico totale dell'intera filiera. Questo dato evidenzia come la disponibilità di risorse idriche e le pratiche di irrigazione siano fattori chiave per la sostenibilità ambientale della polenta.

Dal punto di vista gastronomico e culturale, questi risultati mettono in discussione la percezione della polenta come alimento a basso impatto ambientale per definizione. Sebbene si tratti di un prodotto semplice e tradizionale, la sua sostenibilità dipende in modo determinante dalle pratiche agricole adottate, dalla gestione dei fertilizzanti e dall'efficienza nell'uso dell'acqua.

5.2 trasformazione in farina

La fase di trasformazione del mais in farina, che comprende il trasporto della granella, la macinazione, lo stoccaggio e la commercializzazione, presenta un impatto ambientale inferiore rispetto alla produzione agraria, ma comunque rilevante. Le emissioni di gas serra associate a questa fase sono stimate tra 0,10 e 0,20 kg CO₂eq per kg di farina, pari a circa il 10–20% delle emissioni complessive.

Il consumo energetico della trasformazione è compreso tra 1,5 e 3 MJ per kg di farina, rappresentando circa il 20–30% del fabbisogno energetico totale. Tale energia è principalmente legata all'elettricità utilizzata nei processi di macinazione e alle attività logistiche lungo la filiera. Il consumo di acqua risulta invece molto contenuto, stimabile tra 0,02 e 0,05 m³ per kg, con un'incidenza percentuale marginale rispetto alla fase agricola.

Codesti dati sottolineano l'importanza delle scelte legate all'organizzazione della filiera. L'adozione di filiere corte, la localizzazione dei mulini in prossimità delle aree di produzione e l'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili possono ridurre significativamente l'impatto ambientale della trasformazione, rafforzando al contempo il legame tra prodotto, territorio e identità alimentare.

5.3 utilizzo domestico

Un elemento di particolare interesse emerge dall'analisi della fase di utilizzo domestico, spesso sottovalutata nelle valutazioni ambientali degli alimenti di base. La preparazione della polenta comporta emissioni di gas serra comprese tra 0,15 e 0,30 kg CO₂eq per kg di farina, corrispondenti a circa il 15–30% delle emissioni totali del ciclo di vita. Questo contributo è fortemente influenzato dal tipo di fonte energetica utilizzata (gas o elettricità) e dalla durata della cottura.

Dal punto di vista del consumo energetico, la fase domestica richiede mediamente 2–4 MJ per kg di farina, pari a circa il 25–35% del consumo energetico complessivo. La polenta, rispetto ad altri alimenti a base di cereali come pasta o couscous, presenta tempi di cottura più lunghi, che si traducono in un maggiore utilizzo di energia in fase di preparazione.

Il consumo di acqua associato alla cottura risulta invece molto ridotto, stimabile tra 0,004 e 0,006 m³ per kg di farina, con un'incidenza inferiore all'1% del totale. Tuttavia, anche in questo caso, il ruolo del consumatore risulta centrale: pratiche come l'uso del coperchio durante la cottura o la riduzione dei tempi di preparazione possono contribuire a diminuire il consumo energetico senza alterare significativamente le caratteristiche gastronomiche del prodotto.

ANALISI COMPARATIVA E IMPLICAZIONI

Considerando l'intero ciclo di vita, l'impatto ambientale complessivo della polenta risulta compreso tra 0,75 e 1,20 kg CO₂eq per kg di farina, con un consumo energetico totale di circa 7–13 MJ e un consumo idrico di 0,62–1,25 m³. La distribuzione percentuale degli impatti mostra chiaramente

come la fase agricola rappresenti il principale hotspot ambientale, seguita dall'uso domestico e, infine, dalla trasformazione industriale.

Questa ripartizione risulta analoga a quella osservata per altri alimenti a base di cereali, ma evidenzia alcune specificità della polenta, in particolare l'incidenza relativamente elevata della fase di cottura. Tali risultati permettono di leggere la sostenibilità della polenta non solo come questione produttiva, ma come esito di un insieme di scelte agricole, tecnologiche e culturali.

CONCLUSIONI

I risultati ottenuti devono essere interpretati alla luce dei limiti metodologici dello studio, legati all'uso di dati medi di letteratura e all'assenza di una caratterizzazione specifica della filiera analizzata. Tuttavia, l'approccio adottato risulta efficace nel mettere in evidenza le tendenze principali e i contributi relativi delle diverse fasi del ciclo di vita.

In conclusione, l'analisi mostra come le strategie di riduzione dell'impatto ambientale della polenta debbano concentrarsi prioritariamente sulla produzione agraria, attraverso una gestione più efficiente dell'acqua e dei fertilizzanti, senza trascurare il potenziale di miglioramento legato alle modalità di trasformazione e di consumo domestico. La polenta emerge così come un alimento emblematico per comprendere il rapporto tra tradizione gastronomica e sostenibilità ambientale, dimostrando come anche gli alimenti più semplici possano offrire spunti di riflessione complessi e attuali.

BIBLIOGRAFIA

- FAO – Report su food loss&waste
- ISMEA – Report sulla produzione cerealicola in Italia
- EFSA – Studi sulle micotossine (aflatossine nel mais)
- Scopus / Google Scholar – Articoli scientifici
- Ministero dell’Agricoltura (MASAF) – Dati aggiornati
- Dunford, N. T. (Ed.). Food and Industrial Oilseeds. AOCS Press.

- Eckhoff, S. R., & Bothast, R. J. (pubblicazioni su wetmilling). Cereal Chemistry; Starch/Stärke.
- Fellows, P. J. Food Processing Technology: Principles and Practice. Woodhead Publishing.
- Hui, Y. H. (Ed.). Bailey's Industrial Oil and Fat Products. Wiley.
- Nagaraj, G. Oilseeds: Properties, Processing, Products and Uses. New India Publishing Agency.
- Ramaswamy, H. S., & Marcotte, M. Food Processing: Principles and Applications. CRC Press.
- Watson, S. A., & Ramstad, P. E. (Eds.). Corn: Chemistry and Technology. AACC.
- Macinazione del mais – rese di germe, crusca, grits e farine
- Abbas, H.K. et al. (2018). Fumonisin distribution in maize dry-milling products. Food Additives & Contaminants.
- Riporta rese: 26–48% grits grossi, 10% germe, 5% farina fine.
- Cereal & Grains Association (1995). Non-Wheat Grains and Products: Corn Dry Milling.
- CRA – Consiglio per la Ricerca in Agricoltura (CREA). Tecnologia di macinazione del mais (schede tecniche 2014–2020).
- Baldini, M., Vannozzi, G. (2019). Mais: agronomia, qualità e filiere. Edagricole.
- Food Hub Italia – “I sottoprodotti della macinazione dei cereali.”
- Slow Food Italia – dossier su mais autoctoni (Ottofile, Marano, Biancoperla).
- Noya, I., et al. Comparative life cycle assessment of three representative feed cereals production in the Po Valley (Italy). Journal of Cleaner Production, 99:250–265 (2015).
- Lares-Orozco, R., et al. Life Cycle Assessment on Agricultural Production: A Mini Review. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(16), 9817 (2022)
- FAO, 2011. The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Rome.
- IPCC, 2019. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- ISPRA, 2023. Inventario Nazionale delle Emissioni in Atmosfera.
- Mekonnen M.M., Hoekstra A.Y., 2011. The green, blue and grey water footprint of crops. Water Resources Management, 25: 1577–1600.
- CREA, 2024. Rete nazionale di confronto varietale mais.
- CarbonCloud, 2022. Carbon footprint benchmark for maize production.
- ENEA, 2022. Energia e agricoltura in Italia.

Ringraziamenti

A mio padre, per avermi trasmesso i valori di un uomo. A mia madre, per il suo amore incondizionato, presenza costante e silenziosa in ogni passo del mio cammino.

A mio fratello, per la lealtà che lo contraddistingue e per essere sempre al mio fianco.

Ad Alice che in questi anni è stata più che una fidanzata ma bensì anche una mia compagna universitaria, grazie per aver studiato con me, grazie per aver creduto in me anche quando facevo fatica a farlo io, grazie per aver portato pazienza nelle sessioni con me, grazie per aver attraversato insieme a me ogni esame ogni vittoria e ogni sconfitta.

Con te questi anni sono stati meno pesanti, io ti ringrazio e continuerò a farlo. Su questa laurea c'è scritto anche il tuo nome.

Ai miei amici, con cui ho costruito ricordi indelebili in questo capitolo della mia vita: grazie per il vostro sostegno, la vostra lealtà e per far parte della mia vita.

In particolare, grazie a Jacopo ed Errico, compagni di avventure; a Eddy e Leonardo, compagni di merende; a Mattia ed Edoardo, per il tempo condiviso.

A Chiara e Giulia, per aver percorso insieme a me questa strada universitaria, tra momenti bellissimi e difficoltà affrontate insieme.

A Riccardo, per i pomeriggi passati a studiare, cercando sempre di aiutarci a vicenda.

Un grazie anche agli amici dell'Happy Box, con cui ho vissuto tanti momenti speciali.

Infine, ringrazio me stesso, per aver continuato nonostante le difficoltà: un percorso impegnativo ma ricco di soddisfazioni, fatto di ostacoli che mi hanno insegnato molto su come affrontare le sfide della vita.

Ringrazio anche tutte le persone che mi hanno sconsigliato di intraprendere l'università: sono state la mia rivincita.

Concludo dicendo che le mie ambizioni hanno superato di gran lunga il mio talento.