

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA, ANIMALI, ALIMENTI, RISORSE
NATURALI E AMBIENTE**

**CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN
SCIENZE E TECNOLOGIE AGRARIE**

**Relazione fra nutrizione e mitigazione di stress ambientali in
pomodoro (*Solanum lycopersicum* L.)**

Relatore:

Prof. Piergiorgio Stevanato

Laureando:

Simone Faretra

Matricola n. 2032814

ANNO ACCADEMICO 2023 - 2024

Sommario

| | |
|---|-----------|
| RIASSUNTO | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| SCOPO DEL LAVORO | 3 |
| 1. INTRODUZIONE | 4 |
| 1.1. Storia e domesticazione | 4 |
| 1.2. Produzione | 7 |
| 1.2.1. Produzione globale..... | 7 |
| 1.2.2. Produzione italiana..... | 8 |
| 1.3. Caratteristiche morfologiche della pianta | 11 |
| 1.4. Fisiologia e aspetti pedoclimatici..... | 13 |
| 1.5. Tipologie merceologiche..... | 14 |
| 1.5.1. Pomodoro da mensa | 14 |
| 1.5.2. Pomodoro da industria | 15 |
| 1.6. Valori nutrizionali e importanza della dieta | 17 |
| 2. NUTRIZIONE DEL POMODORO | 19 |
| 2.1. Concetti generali | 19 |
| 2.2. Macronutrienti..... | 20 |
| 2.3. Micronutrienti | 23 |
| 2.4. Relazione tra nutrienti e pH del suolo..... | 26 |
| 3. ESIGENZE TERMICHE E IDRICHE..... | 30 |
| 4. STRATEGIE PER CONTRASTARE GLI STRESS ABIOTICI | 36 |
| 4.1. Frazionamento dei macronutrienti | 36 |
| 4.2. Calcio, boro, zinco | 39 |
| 4.3. Biostimolanti..... | 41 |
| 4.3.1. Estratti di alghe marine | 42 |
| 4.3.2. Idrolizzati proteici | 42 |
| 4.3.3. Sostanze umiche..... | 43 |
| 4.3.4. Microrganismi del suolo | 44 |
| CONCLUSIONI..... | 48 |
| BIBLIOGRAFIA..... | 49 |
| RINGRAZIAMENTI..... | 51 |

RELAZIONE FRA NUTRIZIONE E MITIGAZIONE DI STRESS AMBIENTALI IN POMODORO

RIASSUNTO

Il pomodoro è uno degli alimenti più consumati e diffusi in tutto il mondo per via delle sue spiccate proprietà nutrizionali, oltre che organolettiche, e della sua versatilità di utilizzo. Originario dell'America centrale è diventato, ormai da secoli, anche uno dei simboli della dieta mediterranea visto il suo adattamento alle condizioni climatico-ambientali di tale areale. Al giorno d'oggi, i cambiamenti climatici e in particolare l'aumento delle temperature medie e dei periodi di prolungata assenza di precipitazioni piovose rendono ancor più complicato il lavoro dei coltivatori di pomodoro ai quali vengono chieste produzioni sempre maggiori in termini di rese, per far fronte al continuo aumento della popolazione mondiale, e di qualità per rispondere alle esigenze di un mercato di consumatori sempre più esigente. Date tali premesse, lo scopo di questo lavoro è stato quello di evidenziare come una corretta gestione nutrizionale possa consentire di ottenere produzioni ottimali in termini quantitativi e qualitativi in un contesto in cui, per via dei cambiamenti climatici, si è inevitabilmente costretti a coltivare il pomodoro in un situazioni di stress abiotici ricorrenti dovuti a temperature estreme, carenze idrico-nutrizionali e pH subottimali.

RELATIONSHIP BETWEEN NUTRITION AND MITIGATION OF ENVIRONMENTAL STRESS IN TOMATO

ABSTRACT

Tomato is one of the most consumed and widespread foods throughout the world due to its excellent nutritional, as well as organoleptic, properties and its versatility of use. Originally from Central America, it has also become, for centuries, one of the symbols of the Mediterranean diet because of its adaptation to the climatic-environmental conditions of this area. Nowadays, climate changes and in particular the increase in average temperatures and periods of prolonged absence of rainfall make the work of tomato growers even more complicated who are asked to produce ever greater production in terms of yields, for cope with the continuous increase in the world population, and quality to meet the needs of an increasingly demanding consumer market. Given these premises, the aim of this work was to highlight how correct nutritional management can allow for optimal production in quantitative and qualitative terms in a context in which, due to climate change, we are inevitably forced to grow tomatoes in situations of recurring abiotic stress due to extreme temperatures, water-nutritional deficiencies, and suboptimal pH.

SCOPO DEL LAVORO

Nel momento in cui si decide di coltivare una qualsiasi specie di interesse agrario si è consapevoli dalle numerose insidie e difficoltà, dovute a cause biotiche e/o abiotiche, che potrebbero manifestarsi compromettendo l'operato dell'agricoltore e quello che dovrebbe essere il normale sviluppo della coltura in atto. Adottare un approccio basato sull'adozione di tecniche agronomiche specifiche che rispondano alle reali esigenze fisiologiche della pianta nel corso del suo naturale ciclo biologico di sviluppo, risulta di primaria importanza per cercare di arginare eventuali problematiche dovute a fenomeni che non è possibile controllare, esattamente come quelli ambientali.

In questo lavoro l'attenzione sarà incentrata sul pomodoro (*Solanum lycopersicum* L.), ossia una delle specie vegetali di interesse agrario che più rappresentano l'Italia nel mondo, ma che allo stesso tempo è anche molto vulnerabile a stress abiotici legati alla sua coltivazione su terreni con pH sub-ottimali o dovuti a eventi climatici estremi, come caldo eccessivo e prolungati periodi di siccità.

Lo scopo di questa tesi è quello di delineare i principi generali che regolano una delle tematiche più importanti in agronomia legata alla coltivazione del pomodoro, ovvero la nutrizione minerale. Si esaminerà come una gestione ottimale di questa possa portare a risultati ottimali in termini di resa, sia quantitativa che qualitativa, anche coltivando in contesti dove potrebbero manifestarsi facilmente stress abiotici.

1. INTRODUZIONE

1.1. Storia e domesticazione

Il pomodoro coltivato appartiene alla famiglia delle Solanacee, la quale contiene più di 3000 specie incluse molte piante di notevole importanza economica come la patata, la melanzana, il peperone e il tabacco. Sin dalla sua introduzione nel contesto europeo, avvenuta nel corso del sedicesimo secolo, il pomodoro fu ritenuto appartenente al genere *Solanum* e identificato inizialmente come *Solanum pomiferum*. Successivamente, nel 1753 Linneo classificò per la prima volta il pomodoro con il binomio che tutt'ora viene utilizzato, ossia *Solanum lycopersicum* (Bergougnoux, 2013)

Per capire l'oramai ampia ed eterogenea variabilità nelle diverse tipologie di pomodoro che ad oggi vengono coltivate e che sono presenti sul mercato e per capire poiché tale pianta presenta specifiche caratteristiche botaniche, che verranno trattate in seguito, è fondamentale far riferimento alla sua origine, alla sua diffusione e alla sua evoluzione avvenuta nel corso dei secoli.

Il pomodoro coltivato deriva da specie selvatiche che si sono sviluppate, a partire da circa 7 milioni di anni fa, in una varietà di habitat molto eterogenei tra loro lungo la costa Ovest dell'America Latina dal livello del mare a oltre 2500m di altitudine, dall'Ecuador al Cile includendo Bolivia, Colombia, Perù e le isole Galàpagos. È probabile che proprio la diversità ambientale e pedo-climatica di questi territori contribuì all'enorme diversità tra le varie specie selvatiche del pomodoro, dovuta anche alla presenza in tali specie di una delle barriere genetiche più comuni nel regno delle piante, ossia l'auto-incompatibilità gametofitica che si basa sul meccanismo per il quale una pianta è incapace di autofecondare e quindi, per riprodursi, è "costretta" ad incrociarsi con piante diverse generando così variabilità. Tuttavia, questa caratteristica si è attenuata nel corso dei secoli a seguito del processo di domesticazione, che ha portato, tra gli aspetti positivi, notevoli cambiamenti in termini di resa, caratteristiche chimico-fisiche e capacità di adattamento agli stress biotici e abiotici.

Nonostante siano passati ormai secoli da quando il pomodoro fu introdotto in Europa, le origini della sua domesticazione sono ancora non del tutto chiare poiché esistono due teorie diverse che dividono l'opinione generale: la teoria Peruviana e quella Messicana (Bauchet et al., 2012).

Il botanico svizzero DeCandolle nel 1886 espose per la prima volta l'origine Peruviana della domesticazione del pomodoro, e le sue conclusioni erano principalmente basate sul fatto che: a) la specie ancestrale del pomodoro coltivato è quella dello "cherry tomato" (chiamato così per via delle dimensioni molto piccole delle bacche), originario proprio del Perù; b) i primi termini con cui veniva

identificato il pomodoro erano “mala peruviana” e “pomi del Perù”, suggerendo la sua iniziale domesticazione in Perù e il suo successivo trasporto in Europa (Bergougnoux, 2013). La teoria Messicana, invece, fu proposta dal botanico Jenkins nel 1948. Dai suoi studi, egli giustificò tale teoria poiché: a) non vi era alcuna evidenza effettiva di una coltivazione del pomodoro in Sud-America antecedente a quella effettuata dai messicani; b) il termine “tomato” deriva dalla parola messicana “tomatl” con cui si indicava una pianta che portava frutti globosi e succosi, caratteristiche che quindi potrebbero tranquillamente riferirsi ai pomodori (Bauchet et al., 2012).

Ad oggi nessuna delle due ipotesi circa l’origine della domesticazione del pomodoro può essere ritenuta più valida rispetto all’altra, poiché è possibile che la domesticazione si sia verificata in entrambe le zone. In effetti, per via della sua elevata diffusione nel centro-America, si ritiene che il più probabile antenato del pomodoro oggi coltivato sia lo “cherry tomato”, identificato come *S.lycopersicum var.cerasiforme*, e che la sua domesticazione sia iniziata in Perù e si sia completata successivamente in Messico, (Bauchet et al., 2012) seguita dalla sua introduzione in Europa per mano degli Spagnoli e dalla sua successiva diffusione in tutto il mondo.

Con il suo arrivo in Europa, e come conseguenza al processo di domesticazione, è possibile tracciare anche la storia circa l’utilizzo del pomodoro. Riguardo quest’ambito fondamentale fu l’opera del botanico statunitense George McCue, pubblicata nel 1952, nella quale egli spiega di come il condottiero spagnolo Herman Cortes fu il primo ad introdurre un piccolo pomodoro giallo in Spagna dopo la conquista nel 1521 di Tenochtitlan, l’antica città azteca corrispondente all’attuale Città del Messico (Bergougnoux, 2013). Dalla penisola iberica successivamente il pomodoro raggiunse l’Italia attraverso Napoli, città a quel tempo di dominio spagnolo. La prima descrizione del pomodoro in Europa fu trovata in un erbario scritto nel 1544 dal botanico italiano Pietro Andrea Mattioli, in cui egli lo descrive come una pianta molto simile alla mandragora e con dei frutti dalla forma schiacciata come delle mele rosse fatte a spicchi, di colore prima verdi, e una volta maturi, in alcune piante rosse come sangue, e in altre di color oro (Bergougnoux, 2013). Sulla base di questa descrizione in Italia fu attribuito, a questa nuova pianta importata dall’America, il nome di “pomo d’oro” diventato poi “pomodoro”. Tuttavia, è bene specificare che, per via della sua somiglianza con le altre specie di piante tossiche appartenenti al genere *Solanum* come la mandragora e la belladonna, il pomodoro fu per molti decenni utilizzato solo come pianta ornamentale, finché in Italia non fu impiegato come alimento tra la fine del XVII e l’inizio del XVIII secolo. Sfatata la sua ipotizzata tossicità e scoprite le sue notevoli qualità organolettiche portò, nel corso del Settecento, il pomodoro a diventare un alimento centrale in quasi tutti i paesi europei e in particolare in Inghilterra, da dove fu esportato nell’Asia medio-orientale e nell’America del nord tramite le colonie inglesi (Bergougnoux, 2013).

Riguardo le cultivar coltivate fino a quel momento, quelle disponibili si erano formate principalmente grazie a mutazioni spontanee o ricombinazioni naturali delle specie allora diffuse; infatti, uno dei primi veri esempi di incrocio volontario effettuato dall'uomo avvenne alla fine del XIX secolo per mano di Alexander Livingston, che cercò di ottenere piante con pomodori di forme più uniformi e con migliori caratteristiche organolettiche. Al termine di questo lavoro di miglioramento genetico, nel 1870 egli introdusse la cultivar "Paragon", ancora oggi coltivata negli USA (Bergougnoux, 2013). Con la crescente diffusione del pomodoro nella dieta della maggior parte della popolazione mondiale, il XX secolo è stato segnato dallo sviluppo delle industrie sementiere private, che hanno applicato al pomodoro il principio dell'ibrido F1 per sfruttare l'eterosi, ossia l'aumento di vigore in alcuni caratteri fenotipici degli ibridi. Gli ibridi combinano i tratti agronomici dei due genitori, ma poiché questi caratteri si segregano nella progenie, gli agricoltori non possono mantenere queste peculiarità positive tipiche degli ibridi raccogliendo i semi e seminando nuovamente, essendo quindi obbligati ad acquistare nuovi semi ogni stagione. Dal punto di vista evolutivo, grazie a questi programmi di miglioramento genetico basati principalmente sull'incrocio, si sono ottenuti drastici cambiamenti in positivo dal punto di vista fisiologico e morfologico che, però, allo stesso tempo hanno determinato una notevole riduzione della diversità genetica del pomodoro coltivato (Bergougnoux, 2013). Si stima, infatti, che l'intero pool di germoplasma coltivato oggi contenga meno del 5% della variabilità genetica complessivamente rilevabile nelle specie selvatiche.

1.2. Produzione

1.2.1. Produzione globale

Facendo riferimento ai dati FAO, la produzione mondiale di pomodoro nel 2023 si è attestata attorno ai 186 milioni di tonnellate. Il primo produttore mondiale è la Cina, seguita da India e Turchia, mentre l'Italia occupa la sesta posizione.

Tabella 1. Principali produttori mondiali di pomodoro nel 2023 (Fonte: elaborazione dati FAO)

| Area | Production | | Area Harvested | |
|----------------------------|--------------------|----------|------------------|-----------|
| | Value | Unit | Value | Unit |
| China, mainland | 68.241.811 | t | 1.137.416 | ha |
| India | 20.694.000 | t | 843.000 | ha |
| Türkiye | 13.000.000 | t | 158.719 | ha |
| United States of America | 10.199.753 | t | 106.757 | ha |
| Egypt | 6.275.444 | t | 143.618 | ha |
| Italy | 6.136.380 | t | 97.610 | ha |
| Mexico | 4.207.889 | t | 90.696 | ha |
| Brazil | 3.809.986 | t | 54.502 | ha |
| Nigeria | 3.684.566 | t | 702.275 | ha |
| Spain | 3.651.940 | t | 45.150 | ha |
| Iran (Islamic Republic of) | 3.400.000 | t | 77.000 | ha |
| Russian Federation | 2.645.662 | t | 78.300 | ha |
| Uzbekistan | 2.191.153 | t | 64.226 | ha |
| Algeria | 1.661.664 | t | 25.050 | ha |
| Mozambique | 1.599.051 | t | 60.570 | ha |
| Portugal | 1.406.280 | t | 16.580 | ha |
| Argentina | 1.393.000 | t | 19.445 | ha |
| Morocco | 1.388.542 | t | 14.956 | ha |
| Ukraine | 1.257.470 | t | 51.500 | ha |
| Cameron | 1.219.046 | t | 66.977 | ha |
| Total Top 20 | 158.063.638 | t | 3.854.347 | ha |
| Total World | 186.107.973 | t | 4.917.534 | ha |

Da questi dati emerge come l'Asia contribuisca in modo significativo alla produzione globale di pomodori con 119 milioni di tonnellate all'anno, seguita dall'Europa con 24 milioni di tonnellate. L'Asia, guidata da Cina e India, è di fatto il più grande continente produttore di pomodori, con entrambi i paesi collettivamente responsabili di una parte sostanziale della produzione mondiale di pomodori. L'Europa, d'altro canto, vanta produttori chiave come Italia e Spagna, noti per le loro varietà di pomodori di alta qualità, in particolare quelli adatti alla trasformazione in prodotti come concentrato di pomodoro e salse. Anche il Nord America, in particolare gli Stati Uniti e il Messico, è un importante continente produttore di pomodori, con gli Stati Uniti che sono una delle principali fonti di pomodori freschi e trasformati.

1.2.2. Produzione italiana

Riguardo la produzione di pomodoro in Italia, primo produttore europeo e quinto a livello mondiale, essa si aggira attorno alle 6,1 milioni di tonnellate complessive nel 2023. Tale quantitativo è il risultato dei dati riferiti alla produzione delle due categorie di prodotto relative al pomodoro: da mensa, il quale viene coltivato sia in pieno campo che in ambiente protetto; da industria, coltivato invece solo in campo aperto.

Fatta eccezione delle regioni dell'arco alpino in cui vi è un clima che non permette la coltivazione di questa coltura, il pomodoro rappresenta una delle eccellenze dell'agricoltura del belpaese tanto da venir coltivato praticamente in tutte le regioni. Più nello specifico, dall'analisi dei dati emerge che la produzione nazionale sia realizzata soprattutto nelle regioni del sud-Italia (Puglia, Sicilia e Campania) per via della vocazione climatico-ambientale che si sposa perfettamente con quelle che sono le esigenze specifiche del pomodoro, anche se non mancano regioni del nord-Italia (Emilia-Romagna e Lombardia) che hanno anch'esse un ruolo fondamentale nel contesto nazionale.

Analizzando la situazione in termini quantitativi, la maggior parte della produzione italiana deriva dalla coltivazione del pomodoro da industria da cui derivano circa 5 milioni di tonnellate di pomodori sulle 6,1 milioni di tonnellate complessive.

Tabella 2. Produzione italiana del pomodoro da industria (Fonte: elaborazione dati ISTAT)

POMODORO DA INDUSTRIA (TRASFORMAZIONE) IN PIENA ARIA

| | 2022 | | | 2023 | | |
|--------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | superficie totale - ettari | produzione totale - quintali | produzione % sul totale | superficie totale - ettari | produzione totale - quintali | produzione % sul totale |
| Italia | 74.041 | 52.115.125 | 100 | 74.579 | 50.875.913 | 100 |
| Emilia-Romagna | 25.334 | 19.299.720 | 37,0 | 26.159 | 19.118.125 | 37,6 |
| Puglia | 16.610 | 14.673.500 | 28,2 | 15.470 | 13.987.500 | 27,5 |
| Lombardia | 7.053 | 5.614.475 | 10,8 | 8.244 | 5.461.504 | 10,7 |
| Campania | 3.884 | 2.344.941 | 4,5 | 3.824 | 2.330.541 | 4,6 |
| Toscana | 2.431 | 1.509.090 | 2,9 | 2.402 | 1.439.260 | 2,8 |
| Lazio | 1.805 | 1.376.680 | 2,6 | 1.751 | 1.342.280 | 2,6 |
| Piemonte | 2.728 | 1.359.025 | 2,6 | 2.851 | 1.340.280 | 2,6 |
| Veneto | 1.764 | 1.200.090 | 2,3 | 1.812 | 1.206.625 | 2,4 |
| Basilicata | 2.083 | 1.160.563 | 2,2 | 2.083 | 1.160.563 | 2,3 |
| Calabria | 2.682 | 1.098.620 | 2,1 | 2.682 | 1.098.620 | 2,2 |
| Sicilia | 4.750 | 755.700 | 1,5 | 4.450 | 737.000 | 1,4 |
| Molise | 960 | 658.800 | 1,3 | 940 | 609.000 | 1,2 |
| Abruzzo | 1.343 | 585.400 | 1,1 | 1.343 | 585.400 | 1,2 |
| Sardegna | 419 | 389.184 | 0,7 | 355 | 333.900 | 0,7 |
| Umbria | 177 | 83.040 | 0,2 | 193 | 116.100 | 0,2 |
| Marche | 12 | 4.797 | 0,0 | 13 | 6.970 | 0,0 |
| Trentino A.A. / Südtirol | 6 | 1.500 | 0,0 | 6 | 1.500 | 0,0 |
| Trento | 6 | 1.500 | 0,0 | 6 | 1.500 | 0,0 |
| Friuli-Venezia Giulia | .. | .. | | 1 | 745 | 0,0 |

Riguardo il pomodoro da industria, se si prende in considerazione la quota che esprime la quantità di pomodori prodotti rispetto al totale nazionale, si nota come due regioni, ossia l'Emilia-Romagna (37,6%) e la Puglia (27,5%), siano protagoniste indiscusse del panorama nazionale. Considerando anche il non indifferente contributo della Lombardia (10,7%), si delinea la situazione complessiva che vede un'elevata concentrazione produttiva con queste tre regioni in cui si ottiene circa il 75% del quantitativo totale di pomodoro da industria italiano.

Per il pomodoro da mensa, considerando la coltivazione in piena aria, si evince che oltre il 50% della produzione nazionale sia realizzata al sud-Italia e nello specifico tra Sicilia (28,6%), Puglia (13,8%) e Campania (10,8%). La situazione varia, però, se per il pomodoro da mensa viene presa in considerazione la coltivazione in ambiente protetto. Infatti, in questo caso, si può notare una ancor maggiore concentrazione produttiva solamente in alcune regioni, con la Sicilia che si conferma leader (41,4%), seguita da Lazio (25,8%) e Campania (13,5%). Importante è evidenziare, quindi, come in questo caso regioni come la Puglia e l'Abruzzo, che nella coltivazione in campo aperto rivestono un ruolo centrale in termini produttivi, contribuiscano in maniera decisamente inferiore per le produzioni in serra, a differenza di altre regioni come il Lazio, il Veneto e la Sardegna che in piena aria sviluppano quantitativi decisamente modesti mentre in ambiente protetto concorrono in maniera sicuramente non trascurabile alla produzione complessiva

Tabella 3. Produzione italiana del pomodoro da mensa (Fonte: elaborazione dati ISTAT)

| | 2022 | | | 2023 | | |
|------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | superficie totale - ettari | produzione totale - quintali | produzione % sul totale | superficie totale - ettari | produzione totale - quintali | produzione % sul totale |
| Italia | 16.754 | 5.013.246 | 100 | 17.303 | 5.509.089 | 100 |
| Sicilia | 7.775 | 1.532.450 | 30,6 | 7.805 | 1.578.350 | 28,6 |
| Puglia | 1.455 | 641.750 | 12,8 | 1.435 | 761.250 | 13,8 |
| Campania | 1.109 | 531.516 | 10,6 | 1.048 | 568.866 | 10,3 |
| Abruzzo | 1.236 | 535.730 | 10,7 | 1.236 | 535.730 | 9,7 |
| Calabria | 1.939 | 475.060 | 9,5 | 1.939 | 475.060 | 8,6 |
| Lazio | 1.105 | 465.400 | 9,3 | 1.113 | 453.400 | 8,2 |
| Basilicata | 884 | 366.001 | 7,3 | 884 | 366.001 | 6,6 |
| Toscana | 283 | 92.345 | 1,8 | 480 | 178.531 | 3,2 |
| Marche | 106 | 72.950 | 1,5 | 257 | 146.504 | 2,7 |
| Emilia-Romagna | 171 | 101.295 | 2,0 | 217 | 128.931 | 2,3 |
| Piemonte | 194 | 57.800 | 1,2 | 271 | 123.750 | 2,2 |
| Sardegna | 194 | 67.438 | 1,3 | 193 | 72.123 | 1,3 |
| Lombardia | 72 | 31.500 | 0,6 | 137 | 52.455 | 1,0 |
| Umbria | 55 | 16.000 | 0,3 | 82 | 29.800 | 0,5 |
| Liguria | 129 | 14.080 | 0,3 | 128 | 17.730 | 0,3 |
| Friuli-Venezia Giulia | 2 | 546 | 0,0 | 31 | 8.591 | 0,2 |
| Molise | 27 | 5.200 | 0,1 | 28 | 5.400 | 0,1 |
| Veneto | 14 | 4.885 | 0,1 | 15 | 5.317 | 0,1 |
| Trentino A.A./Südtirol | 4 | 1.300 | 0,0 | 4 | 1.300 | 0,0 |
| Trento | 4 | 1.300 | 0,0 | 4 | 1.300 | 0,0 |

Tabella 4. Produzione italiana del pomodoro in serra (Fonte: elaborazione dati ISTAT)

**POMODORO IN SERRA
(DA MENSA - CONSUMO FRESCO)**

| | 2022 | |
|-----------------------|---------------------------------|----------------------------|
| | produzione totale - quintali | produzione % sul totale |
| Italia | 4.903.730 | 100 |
| Sicilia | 2.032.230 | 41,4 |
| Lazio | 1.266.600 | 25,8 |
| Campania | 660.030 | 13,5 |
| Veneto | 300.970 | 6,1 |
| Sardegna | 177.470 | 3,6 |
| Toscana | 169.395 | 3,5 |
| Emilia-Romagna | 95.814 | 2,0 |
| Puglia | 92.500 | 1,9 |
| Calabria | 49.000 | 1,0 |
| Lombardia | 32.030 | 0,7 |
| Abruzzo | 10.823 | 0,2 |
| Liguria | 7.350 | 0,1 |
| Marche | 6.350 | 0,1 |
| Valle d'Aosta | 1.460 | 0,0 |
| Friuli-Venezia Giulia | 808 | 0,0 |
| Molise | 600 | 0,0 |
| Umbria | 300 | 0,0 |

1.3. Caratteristiche morfologiche della pianta

Il pomodoro coltivato, insieme a tutte le specie simili e ancestrali, si presenta in forma diploide, con formula genomica $2n = 2x = 24$ e una struttura cromosomica piuttosto simile tra le diverse specie. (Soressi et al., 2022).

La pianta ha una crescita indeterminata che le dà un aspetto teoricamente perenne, anche se nelle aree temperate segue un classico ciclo annuale (Soressi et al., 2022). La fioritura avviene spontaneamente, senza dipendere dal fotoperiodo. Dopo una fase di crescita vegetativa (8-12 foglie, o meno in condizioni ambientali particolari come temperature basse), la pianta produce la prima infiorescenza. In seguito, una nuova infiorescenza compare ogni tre internodi (foglie). Sebbene sembri monopodiale, lo sviluppo del pomodoro è effettivamente simpodiale; ogni segmento termina con un'infiorescenza e la crescita prosegue dalla gemma ascellare più alta. (Soressi et al., 2022) L'infiorescenza viene spinta lateralmente e la ripetizione indefinita di questo sviluppo conferisce un habitus di crescita indeterminato. Le specie con questo tipo di accrescimento sono generalmente scelte per la coltivazione in ambienti chiusi, dove è più semplice adottare un sistema di allevamento in forma eretta con il supporto di tutori. Esistono anche genotipi con habitus di crescita determinato, in cui il ritmo di emissione delle infiorescenze è più rapido e la crescita simpodiale si arresta a un certo punto, rendendo queste specie più adatte per la coltivazione in pieno campo.

Le specie di pomodoro coltivate sono autofertili, quindi le piante sono geneticamente capaci di autofecondarsi. Tuttavia, per garantire una impollinazione uniforme, si utilizzano arnie con insetti impollinatori (tipicamente bombi), particolarmente importanti nelle coltivazioni in ambiente chiuso e quando le piante presentano fiori brevistilo; in pieno campo, con piante a fiore longistilo, è sufficiente l'azione del vento per una corretta impollinazione.

Analizzando le principali caratteristiche morfologiche della pianta di pomodoro:

- Apparato radicale fibroso e fascicolato, che si sviluppa a una profondità di 30-40 cm nel suolo. Radici avventizie possono formarsi facilmente dalle numerose gemme presenti nella parte basale del fusto.
- Il fusto è pubescente e cresce con un andamento strisciante. Per evitare il deterioramento dei frutti dovuto al contatto con il suolo, è preferibile utilizzare sostegni per far crescere la pianta verticalmente.
- Le foglie sono composte, alterne, picciolate, irregolarmente pennatosette e pubescenti, con peli che producono secrezioni aromatiche.

- All'ascella della foglia immediatamente sottostante l'infiorescenza, e successivamente anche in quelle inferiori, si sviluppa normalmente un germoglio che reitera lo sviluppo simpodiale dello stelo principale. Tali germogli laterali dovrebbero essere rimossi manualmente (scacchiatura o sfemminellatura) nei tipi indeterminati allevati su tutori, per evitare la competizione tra crescita vegetativa e sviluppo dei frutti per l'approvvigionamento e redistribuzione di acqua e nutrienti.
- L'infiorescenza è un racemo ascellare o terminale composto da 4-12 fiori ad antesi scalare; il più delle volte è semplice, raramente può assumere una struttura ramificata (Soressi et al., 2022).
- Il fiore, tipicamente rivolto verso il basso, è pentamero (cioè con 5 petali e 5 sepali) e ha una corolla di colore giallo intenso. Gli stami sono saldati tra loro per formare un cono terminante in un apice, mentre lo stilo può essere più o meno lungo rispetto agli stami. In base a questa caratteristica, il fiore può essere: a) brevistilo, se lo stilo è più corto delle antere, condizione per la quale il polline non sempre raggiunge lo stilo; b) longistilo, se lo stilo è più lungo delle antere, situazione che permette una migliore fecondazione poiché il polline raggiunge più facilmente lo stilo. Il pistillo ha ovario supero, con un numero di carpelli variabile da due a dieci. Terminata la fecondazione, i petali perdono acqua e cadono, mentre il calice è persistente (Soressi et al., 2022).
- Il frutto che si sviluppa è una bacca che cresce rapidamente, richiedendo circa 35-60 giorni per raggiungere la maturazione fisiologica, a seconda della tipologia della bacca. Essa assume una colorazione rossa a maturazione, sebbene esistano mutazioni o introgressioni di alleli selvatici che conferiscono in alcuni casi un colore giallo o arancione. Oltre alla pigmentazione, il processo di maturazione comporta il rammollimento del frutto e l'accumulo di zuccheri e acidi, il cui rapporto conferisce l'aroma e il tipico sapore leggermente acidulo alla bacca. La forma e le dimensioni della bacca variano a seconda delle cultivar, con ampia variabilità; l'epicarpo è liscio e sottile, il mesocarpo è polposo e sugoso, e l'endocarpo è costituito da tessuto placentare nel quale sono immersi i semi, più o meno numerosi. Questi sono piatti, tondeggianti, ruvidi, ricchi di lipidi, di colore giallo e di dimensioni molto contenute, con un peso di circa 2,5-3,5 grammi per mille semi.

1.4. Fisiologia e aspetti pedoclimatici

Il ciclo biologico delle varietà comuni termina con il disseccamento delle foglie, iniziando da quelle basali per concludersi con il disseccamento del fusto; l'intero ciclo richiede in coltura da 140 a 170 giorni, a seconda del tipo di sviluppo e delle condizioni di coltivazione. Nello specifico, il tempo necessario affinché un ovario fecondato si sviluppi in un pomodoro maturo varia tra le sette e le nove settimane, e la crescita e la maturazione delle bacche possono avvenire in maniera diversa all'interno della pianta, principalmente in funzione della posizione del grappolo. Infatti, i grappoli basali producono bacche di dimensioni e peso maggiori a causa di una maggiore concentrazione di auxine, ossia quegli ormoni specifici prodotti naturalmente dagli apici vegetativi della pianta che determinano lo sviluppo dei tessuti e che, potendo essere traslocati solo unidirezionalmente dall'alto verso il basso, tendono ad accumularsi nelle parti basali della pianta.

L'ambiente di coltivazione ottimale per il pomodoro si trova nelle regioni calde e temperato-calde, poiché il clima e soprattutto la temperatura influenzano lo sviluppo della pianta. Il fotoperiodo può modificare la morfologia generale della pianta; infatti, nonostante la specie sia neutrodiurna, l'intensità e la qualità della luce sembrano influenzare l'epoca di fioritura, il grado di allegagione e la colorazione delle bacche. In generale, il pomodoro è una pianta che non tollera le basse temperature e che, al contrario, richiede un'ottima esposizione solare, anche se condizioni di caldo eccessivo o di aridità sono altrettanto negative. I limiti termici del pomodoro sono indicativamente i seguenti:

- Germinazione: T minima = 10-12 °C ; T ottimale = 25-28 °C
- Accrescimento: T minima = 8-10 °C ; T ottimale = 20-25 °C
- Fioritura: T minima = 8-10 °C ; T ottimale = 22-26 °C
- Maturazione: T minima = 12-15 °C ; T ottimale = 22-30 °C

Temperature superiori a 30-35 °C influiscono negativamente sull'allegagione, sull'accumulo di licopene e potrebbero causare alterazioni nella pigmentazione delle bacche.

Per quanto concerne l'ambiente ideale per la coltivazione del pomodoro, e facendo riferimento specificamente al suolo adatto, è importante notare che oggi esistono cultivar capaci di adattarsi a qualsiasi tipologia di suolo. Tuttavia, in generale, il terreno ideale per la coltivazione del pomodoro dovrebbe avere un pH neutro o sub-acido (valori compresi tra 5,5 e 7,5), essere non troppo tenace per favorire la radicazione e avere un'ottima porosità per evitare ristagni idrici che potrebbero favorire l'insorgenza di patologie. In conclusione, il pomodoro può resistere a una salinità con un valore massimo di conducibilità elettrica pari a 12,5 mS/cm.

1.5. Tipologie merceologiche

Le principali varietà di pomodoro si distinguono tra loro per dimensioni, peso, forma e colore delle bacche, parametri fondamentali per determinare le caratteristiche varietali, la qualità del prodotto e l'uso finale cui esso è destinato. È opportuno specificare che le cultivar attualmente utilizzate a fini produttivi derivano da programmi di miglioramento genetico condotti nel corso degli anni, finalizzati a ottenere piante ibride F1 che presentano specifiche caratteristiche agronomiche spesso assenti nelle linee parentali da cui originano, le quali possono essere così riassunte (Sansavini et al, 2012):

- Resistenza alle fitopatie (tracheomicosi, stemfiliosi, alternariosi, picchettatura, maculatura batterica, nematodi, alcune virosi);
- Crescita determinata della pianta e portamento vegetativo compatto con cicli di maturazione differenziati in termini di durata (cultivar precoci e tardive);
- Elevata sincronia di maturazione;
- Resa elevata e stabile;
- Alta qualità tecnologica del prodotto: eccellente consistenza delle bacche, alto grado zuccherino, elevata viscosità, alta percentuale di polpa, elevato contenuto di licopene, facilità di pelatura, assenza di peduncolo (carattere jointless, fondamentale soprattutto in fase di raccolta meccanica), uniformità nella colorazione delle bacche.

Analizzando più nel dettaglio le principali tipologie di pomodoro coltivato, è essenziale delineare innanzitutto l'esistenza di due grandi categorie di prodotto: il pomodoro da mensa, destinato al consumo fresco o tal quale, e il pomodoro da industria, destinato alla trasformazione industriale per la produzione di una vasta gamma di prodotti derivati.

1.5.1. Pomodoro da mensa

Nel caso del pomodoro da mensa, le categorie merceologiche includono tipologie innovative insieme a quelle tradizionali. Una caratteristica comune del pomodoro da mensa è la "long shelf life", che permette di posticipare la raccolta (anche a maturità piena) e di conservarlo più a lungo dopo la raccolta. Di seguito, le principali categorie di questa tipologia di pomodoro:

- “A grappolo” (cluster tomato): tipologia più diffusa, con frutti tondo-lisci di 50-150g, consistenti e di colore rosso intenso, commercializzati a grappolo intero e a completa maturazione. Il grappolo deve essere compatto, con frutti che maturano simultaneamente e

rachide turgido, poiché quest'ultimo rappresenta un carattere di freschezza del prodotto agli occhi dell'acquirente. Ogni grappolo è composto da 5-8 frutti (Sansavini et al, 2012).

- “Tondo liscio” (round tomato): sono simili alla precedente tipologia, ma hanno un peso unitario maggiore (120-220g per bacca), sono commercializzati a frutto singolo e sono tra i più coltivati in coltura protetta (Sansavini et al, 2012).
- “Insalataro” (beef tomato): si tratta di frutti raccolti nel momento in cui le bacche sono nella fase dell'invasatura (colorazione verde-rosata). Presentano generalmente forma tonda o leggermente appiattita con calibri piuttosto elevati; infatti, le pezzature sono comprese tra 120 e 350g. Caratteristica è la polpa molto soda che presenta ottima sapidità, con elevati parametri di dolcezza e acidità. Esempi noti sono: l'ibrido “Camone” tradizionalmente coltivato in Sardegna e in Sicilia, “Costoluto” e “Cuor di bue” (Sansavini et al, 2012).
- “Allungato” (elonged tomato): si distinguono due sub-tipologie cioè il “S. Marzano”, il glorioso e rinomato pomodoro a cui va riconosciuto il merito di aver fatto conoscere il pomodoro italiano in tutto il mondo, e il tipo “plum” che si contraddistingue per la sua forma ovale; si tratta di tipologie derivanti dal pomodoro destinato all'inscatolamento e utilizzate successivamente come pomodoro da mensa. Hanno una forma allungata, dimensioni variabili e peso tra 80 e 140g e vengono coltivati sia in pieno campo che in serra (Sansavini et al, 2012).
- “Cilieginò” (cherry tomato): ha forma sferica, dimensioni modeste e peso tra 15 e 40g. Molto apprezzati per la maggiore sapidità delle loro bacche e per la versatilità di utilizzo al momento del consumo. Commercializzato a grappolo o a frutto singolo in vaschette trasparenti. Sono inclusi in questa tipologia anche gli ibridi di pezzatura e calibro simili ai ciliegini tradizionali, ma con forma diversa, come i “Datterini” (baby-plum tomato) e l'allungato “baby San Marzano” (Sansavini et al, 2012).

1.5.2. Pomodoro da industria

Il pomodoro da industria, invece, presenta caratteristiche che lo rendono ideale per la trasformazione industriale da cui si ottiene un'ampia gamma di derivati: succhi, pelati (interi, tritati, ecc.), concentrati, passate, polveri e pomodori secchi. Relativamente alla gamma varietale essa è più limitata e le principali cultivar, che vengono coltivate esclusivamente in piena aria, sono rappresentate solo da alcune tipologie di prodotto:

- A frutto liscio di forma allungata (elonged tomato): destinati alla preparazione di pelati, con buccia facilmente distaccabile e integrità uniforme del prodotto, che si può avere se vi è

assenza di cicatrici di varia natura, assenza di marciume apicale e assenza di logge vuote interne (scatolatura). Esempi: Ercole, Ulisse, Hypeel 244, Pull e Incas; si differenziano principalmente nel periodo di maturazione (da precoce a tardivo) (Sansavini et al, 2012)..

- A frutto liscio di forma prismatica/squadrata (blotchy tomato): per ogni tipo di trasformazione industriale eccetto i pelati. Esempi: Advance, CLX 38196, Dexter, Fuzzer, Enterprise, Fonzix, Heinz 4107, Gamlex (Sansavini et al, 2012).
- A frutto “tuttapolpa” (all-flesh): per polpe e filetti, con bacche caratterizzate da un’elevata consistenza dovuta all’elevato spessore del pericarpo e poco liquide. Esempi: Allflesh 905, Allflesh 915, Allflesh 935, Elliot, Gades, Najal, Revenge, Allflesh 1000 (Sansavini et al, 2012).
- A frutto con elevato contenuto di licopene: per l’ottenimento di prodotti con più alto valore nutraceutico. Esempi: Augusto, Medley, Tiziano, Dracula, Kalvert, Brixsol (Sansavini et al, 2012).

1.6. Valori nutrizionali e importanza della dieta

Sotto il profilo nutrizionale, il pomodoro rappresenta una fonte ricca di sostanze che rivestono ruoli estremamente positivi per la salute umana ed è uno degli alimenti simbolo della dieta mediterranea, quindi strettamente associato alle proprietà salutistiche di tale regime alimentare. La composizione e l'equilibrio tra i vari costituenti conferiscono al pomodoro un notevole valore nutrizionale ed alimentare. In termini generali, l'importanza del pomodoro sotto il profilo nutrizionale risiede nell'elevato contenuto di vitamine e minerali, in particolare vitamina C, carotenoidi, folati e potassio. È stato rilevato che il pomodoro rappresenta la seconda fonte di vitamina C nella dieta mediterranea, dopo l'arancia.

Più nello specifico, il pomodoro presenta un valore energetico piuttosto modesto (22 kcal/100 g di parte edibile), così come un contenuto ridotto di proteine (1 g/100 g) e carboidrati (4 g/100 g), mentre è elevato il suo apporto idrico (94 g/100 g). Tuttavia, esso è considerato un ortaggio con un eccellente valore nutrizionale grazie alla presenza in quantità significative di numerose sostanze nutraceutiche, quali vitamine (A, C, B1, B2, K, P, PP), carotenoidi, flavonoidi e sali minerali. I carotenoidi più importanti contenuti nel pomodoro sono il licopene (3-200 mg/100 g), che rappresenta l'80-90% del totale, e il beta-carotene. (Sansavini et al, 2012).

Per quanto riguarda i carotenoidi, ossia i pigmenti presenti nel pomodoro, il licopene è il principale responsabile della caratteristica colorazione rossa della bacca matura ed è anche uno dei nutrienti più significativi di questo frutto, grazie alle sue proprietà biologiche e fisico-chimiche. In particolare, questo carotenoide suscita notevole interesse nella comunità scientifica e tra i consumatori soprattutto per la sua elevata capacità antiossidante, che contribuisce alla prevenzione di diverse forme tumorali che colpiscono l'esofago, lo stomaco, l'intestino, il pancreas e il midollo osseo. (Sansavini et al, 2012).

Sottolineare che il licopene non può essere prodotto dal nostro corpo e deve essere assunto tramite il consumo di alimenti vegetali, in primis il pomodoro, è essenziale. In natura, il licopene si trova nella forma chimica "trans", ma a seguito dell'esposizione al calore (come durante la cottura o i processi industriali), la sua struttura si trasforma in isomeri "cis". Questa trasformazione ne migliora l'assorbimento da parte del nostro organismo; infatti, diversamente da molte vitamine e minerali, la cottura aumenta la stabilità e la biodisponibilità di questo composto. Rispetto ad altri carotenoidi, il licopene ha una capacità antiossidante superiore nel combattere i radicali liberi, molecole che si formano all'interno del corpo umano e che presentano elettroni spaiati, rendendole molto reattive e potenzialmente nocive per le cellule, causando malattie degenerative, invecchiamento e tumori.

Questi radicali liberi possono essere neutralizzati grazie alla cessione di elettroni da parte del licopene, che stabilizza così le molecole libere, rendendole inattive. L'effetto finale è quindi la prevenzione dell'insorgenza di malattie dannose per l'uomo.

Un'altra caratteristica di primaria importanza del licopene è la sua capacità protettiva contro l'ossidazione del colesterolo LDL, considerata una delle principali cause nella formazione della placca aterosclerotica. Questa condizione è responsabile di diversi disturbi vascolari, inclusi l'ostruzione delle arterie coronariche, le arteriopatie in generale e lo sviluppo dell'arteriosclerosi. È quindi fondamentale evidenziare il potenziale benefico del licopene anche nella prevenzione di infarti e ictus (Sansavini et al, 2012).

Durante il processo di maturazione del frutto, la concentrazione di carotenoidi, compreso il licopene, aumenta significativamente. Questo è dovuto alla trasformazione dei cloroplasti in cromoplasti e all'incremento progressivo dei pigmenti carotenoidi. Nella fase di maturazione completa della bacca, la concentrazione di carotenoidi è 10-14 volte superiore rispetto alle fasi fenologiche precedenti, quando le bacche mostrano ancora una colorazione verde (Sansavini et al, 2012).

In conclusione, si può affermare che una regolare assunzione di pomodoro nella propria dieta è di fondamentale importanza per la prevenzione di svariate malattie e problemi che possono compromettere la salute umana; inoltre, questo frutto, sia consumato tal quale che attraverso la sua ampia gamma di derivati, si combina perfettamente con molti alimenti, in particolare quelli tipici della dieta mediterranea (cereali e derivati, verdure, legumi, pesce), consentendo di ottenere pietanze non solo benefiche per la salute, ma anche di elevata qualità gustativa al momento del consumo.

2. NUTRIZIONE DEL POMODORO

2.1. Concetti generali

Il pomodoro, come emerso dunque dalla parte introduttiva precedente, lo si può considerare senza ombra di dubbio una delle specie vegetali più importanti e più diffuse in tutto il mondo, tanto da diventare uno degli emblemi dell'ormai rinomata dieta mediterranea, per via della sua versatilità di utilizzo in campo culinario, della sua presenza sul mercato per tutto l'anno e per le sue eccelse proprietà nutrizionali.

Affrontando nello specifico la questione in campo tecnico-agronomico è bene fare riferimento innanzitutto al fatto che, così come vale per un po' per tutte le altre colture, anche per il pomodoro l'obiettivo da perseguire per rendere sostenibile dal punto di vista economico la sua coltivazione, così da permettere agli agricoltori di continuare a dedicarvi le proprie risorse in maniera continuativa nel tempo, è quello di ottenere rese ottimali dal punto di vista quantitativo con frutti che racchiudano allo stesso tempo anche le migliori caratteristiche qualitative. Per fare ciò è quindi imprescindibile gestire al meglio tutto ciò che ha a che fare con la corretta gestione degli aspetti nutrizionali e idrici delle piante di pomodoro, così da far fronte contemporaneamente anche ai possibili stress abiotici che potrebbero manifestarsi a seguito del contesto eco-ambientale odierno che, a seguito dell'innalzamento generale della temperatura globale, impatta negativamente sulle risorse di cui la pianta necessita per svilupparsi correttamente.

Alla base, quindi, dell'ottima gestione agronomica del pomodoro vi è sicuramente una corretta concimazione. Questo termine fa riferimento all'operazione agronomica che si basa sulla distribuzione di concimi cioè di sostanze di forma, natura e origine diversa, che per le loro caratteristiche chimico-fisiche-biologiche, contribuiscono al nutrimento delle piante coltivate in modo da permettere il loro migliore sviluppo. Sostanzialmente con la concimazione, quindi con la distribuzione di elementi minerali, si vanno a distribuire quelle sostanze che la pianta asporterà dal terreno e utilizzerà per il proprio sviluppo vegetativo-riproduttivo. Nell'insieme il pomodoro necessita di dodici nutrienti, detti "essenziali", per una crescita ed uno sviluppo ottimale. Essi, in funzione delle quantità di cui la coltura necessita, e quindi non in relazione ad una loro maggiore o minore importanza, vengono classificati in macro e micro nutrienti.

2.2. Macronutrienti

Vengono definiti macronutrienti quegli elementi minerali che vengono prelevati e utilizzati dalla pianta in elevate quantità e che, di conseguenza, saranno maggiormente presenti anche all'interno dei frutti prodotti. Oltre ai tre che costituiscono il famoso acronimo NPK, e quindi azoto, fosforo e potassio, altri macronutrienti che giocano un ruolo fondamentale nel ciclo biologico del pomodoro sono anche il calcio, il magnesio e lo zolfo.

- Azoto (N): come per tutte le colture agrarie in generale, anche per il pomodoro, è l'elemento minerale che più di tutti influisce sulla crescita delle piante. Questo poiché l'azoto è richiesto per la sintesi proteica, e quindi anche per la produzione di tutti gli enzimi che regolano le corrette attività metaboliche della pianta; è presente all'interno degli acidi nucleici (dna ed rna) quindi è fondamentale per la produzione di nuove cellule e per lo sviluppo dei tessuti; è contenuto all'interno della molecola della clorofilla e di molti composti ormonali naturalmente prodotti dalla pianta. Una corretta dotazione di azoto permette di avere un'ottima vigoria vegetativa della pianta, una colorazione più verde delle foglie, un accrescimento rapido e frutti con pezzatura maggiore, mentre non favorevoli sono le situazioni in cui vi è carenza o eccesso di azoto. Le carenze di N portano ad una crescita stentata della pianta, alla presenza di germogli esili, ad un ingiallimento fogliare che si manifesta prima nelle foglie più vecchie e a bacche con dimensioni minori. Al contrario, l'eccesso di azoto causa uno sviluppo vegetativo troppo eccessivo a discapito dello sviluppo riproduttivo, l'accumulo di nitrati nei frutti e perdite di prodotto che determinano l'inquinamento dell'ecosistema. L'azoto può essere assorbito dalla pianta sia in forma ammoniacale (NH_4^+) che nitrica (NO_3^-): la forma ammoniacale ha il vantaggio di essere più persistente nel terreno poiché è trattenuta dalle superfici colloidali, però, è meno solubile nella soluzione idrica del suolo rispetto al nitrato e alte concentrazioni possono essere tossiche per la pianta; la forma nitrica ha un'elevata solubilità nella soluzione idrica del suolo quindi viene assorbita molto facilmente dalla pianta determinando una maggiore rapidità d'effetto, in concentrazioni elevate non causa problemi di tossicità, però, lo svantaggio è che, proprio per via della sua elevata solubilità e per via della sua configurazione elettronica, non viene trattenuta dal potere adsorbente del terreno, quindi è molto suscettibile alla perdita per lisciviazione che porta a conseguenze negative su tutto l'ecosistema.

- Fosforo (P): è un altro macro-elemento presente in molte biomolecole di fondamentale importanza per le attività metaboliche della pianta. In particolare, il fosforo si trova sotto forma di gruppo fosfato (PO_4^{3-}) nelle molecole di ATP (adenosina trifosfato), le quali rappresentano la principale fonte di energia chimica per tutti gli organismi viventi, all'interno degli acidi nucleici e come uno dei costituenti primari delle membrane cellulari in forma di fosfolipidi. In più, il fosforo aiuta lo sviluppo dell'apparato radicale nelle giovani piante (Sainju et al., 2003) raggiungendo una vigoria tale da consentire rifornimenti idrici e nutrizionali nella maniera più efficiente e meno dispendiosa possibile. L'ottima dotazione di fosforo consente di avere, quindi, un migliore metabolismo energetico nelle piante e un aumento nel numero di bacche di pomodoro contraddistinte da caratteristiche qualitative superiori a livello di colorazione dell'epicarpo, consistenza della polpa e contenuto di vitamina C (Sainju et al., 2003). Sintomi della carenza di questo nutriente sono la crescita stentata, la ridotta crescita dell'apparato radicale, il ritardo nello sviluppo vegetativo della pianta, la comparsa di bordi dal color rossastro/violaceo nelle foglie più vecchie e la scarsa fruttificazione. Gli eccessi sono rari poiché, per via della sua bassa solubilità, non è quasi mai presente in concentrazioni tali che la pianta ne possa assorbire in quantità superiori rispetto al suo fabbisogno.
- Potassio (K) = insieme al calcio, è l'elemento minerale maggiormente richiesto in termini quantitativi. A differenza degli altri macro nutrienti, però, il potassio non è un elemento strutturale delle biomolecole, ma è l'attivatore di processi enzimatici molto importanti (Kumari et al., 2022): a) il potassio permette l'attività della poligalatturonasi, enzima coinvolto nello sviluppo dei tessuti meristemati e quindi della crescita generale della pianta; b) regola il turgore della pianta in quanto, accumulandosi nel vacuolo delle cellule, determina una diminuzione del potenziale idrico di queste ultime che porta al richiamo di acqua; c) stimola l'attività dell'amido sintetasi, enzima responsabile della produzione di polisaccaridi che si accumuleranno nei frutti, e della nitrato reductasi, enzima coinvolto nella sintesi proteica. Complessivamente, quindi, con un'adeguata nutrizione di potassio è possibile migliorare le caratteristiche qualitative dei pomodori, i quali avranno una maggiore concentrazione di carotenoidi, di zuccheri totali, di acido citrico e malico e una migliore shelf-life (R. L. Mikkelsen, 2005). La carenza di potassio nella pianta si manifesta con una clorosi seguita da necrosi che interessa i margini delle foglie più vecchie, con una generale riduzione nello sviluppo dei tessuti e con la presenza di frutti di ridotta pezzatura o che maturano precocemente. Così come nel caso dell'azoto, anche il potassio ha un'elevata solubilità nella

soluzione idrica del suolo quindi distribuzioni in eccesso di questo nutriente determinano la sua perdita per lisciviazione, dannosa per tutto l'ecosistema.

- Calcio (Ca) = è tra tutti i macronutrienti quello richiesto in misura maggiore e che più influisce in maniera diretta sull'ottimale sviluppo delle bacche di pomodoro. Ciò è dovuto innanzitutto al fatto che il calcio è in grado di costituire una sorta di ponte che permette l'unione tra le pectine, ossia i composti principali delle pareti cellulari, di cellule vegetali vicine tra loro in modo da formare un vero e proprio reticolo che possa conferire resistenza, stabilità e quindi una migliore shelf-life alle bacche (Hocking et al., 2016). Oltre a questa funzione fisico-meccanica, il calcio promuove la traslocazione dei carboidrati all'interno dei frutti e promuove la crescita dei tessuti vegetali poiché le vie ormonali che controllano la divisione e l'espansione cellulare sono influenzate positivamente, oltre che da una serie di fattori biotici intrinseci alla pianta, anche da un'adeguata concentrazione di calcio (Hocking et al., 2016). Soddisfare le esigenze di calcio è, quindi, di primaria importanza se l'obiettivo è ottenere pomodori contraddistinti da spiccate caratteristiche qualitative. D'altra parte, invece, la carenza di questo nutriente determina una problematica ricorrente nei pomodori, ossia il marciume apicale che si presenta con la comparsa di un'area di tessuto molle che va incontro a necrosi in corrispondenza della parte terminale inferiore delle bacche (Sainju et al., 2002). Continuando l'analisi del calcio è bene specificare, però, che per soddisfare le esigenze di cui la pianta necessita, non è sufficiente solamente distribuire quantità adeguate di fertilizzante poiché un altro fattore che influisce direttamente sulla nutrizione di calcio nelle piante è l'acqua. Questo perché il calcio, per via delle sue caratteristiche chimico-fisiche, è un elemento molto poco mobile all'interno dei tessuti vascolari della pianta vista la tendenza delle membrane cellulari delle cellule che formano i vasi conduttori a trattenere e quindi ad impedire il suo movimento. Emerge, quindi, come sia indispensabile un'adeguata fornitura di acqua nel momento in cui si effettua la fertilizzazione a base di calcio per evitare che tale elemento nutritivo resti immobile all'interno della pianta e per consentire ad esso di raggiungere, quindi, i frutti.
- Magnesio (Mg) = è anch'esso un elemento richiesto per la sintesi di biomolecole essenziali per la pianta. La prima fra tutte è la clorofilla, il pigmento principalmente coinvolto nella più importante via metabolica dei vegetali, ossia la fotosintesi clorofilliana, in cui è presente come atomo centrale. In aggiunta a ciò, il magnesio insieme al potassio contribuisce ad aumentare la concentrazione di minerali presenti nel vacuolo così da determinare un maggiore afflusso

di acqua all'interno delle cellule che si traduce in un aumento generale del turgore della pianta in generale (Kumari et al., 2022) e, quindi, anche dei pomodori che appariranno più consistenti e in grado di mantenere inalterate le proprie caratteristiche fisiche dopo la raccolta. Uno scarso approvvigionamento di magnesio da parte delle piante porta alla manifestazione di una clorosi internervale che si presenta a partire dalle foglie più vecchie.

- Zolfo (S) = è un macronutriente che contribuisce in maniera non trascurabile al corretto sviluppo vegetativo delle piante di pomodoro essendo coinvolto direttamente nella sintesi proteica poiché costituente di molti amminoacidi, come nel caso della cisteina (Kumari et al., 2022). Tuttavia, carenze di questo elemento nutritivo sono abbastanza rare poiché solitamente è presente in quantità sufficienti e disponibili nel suolo o all'interno dei fertilizzanti contenenti azoto, fosforo o potassio (Sainju et al., 2002).

2.3. Micronutrienti

Questi elementi nutritivi sono contraddistinti dal prefisso “micro” nella loro definizione poiché, non essendo dei costituenti significativi dal punto di vista quantitativo delle principali biomolecole che costituiscono i tessuti vegetali, le concentrazioni che vengono asportate dal suolo sono inferiori se paragonate a quelle dei macronutrienti e, per questo, altrettanto minori sono le quantità che dovranno essere restituite al terreno in fase di concimazione. Ciò non toglie, però, l'importanza indiscussa che tali micronutrienti svolgono per garantire il corretto sviluppo delle piante.

Tale constatazione trova, infatti, le sue basi teoriche e sperimentali in quella che è la “teoria del minimo” enunciata dal chimico tedesco Justus von Liebig nel 1940. In particolare, egli evidenzia di come lo sviluppo complessivo di una pianta non sia influenzato dall'ammontare complessivo delle risorse disponibili, ma dalla disponibilità della risorsa più scarsa. In altre parole, lo sviluppo di una coltura è condizionato dall'elemento nutritivo presente in quantità insufficiente, indipendentemente dall'abbondanza degli altri nutrienti. Questo principio è comunemente rappresentato tramite la metafora di un barile con doghe di diverse altezze, in cui la capacità del barile di trattenere acqua è limitata dalla dogha più corta, simbolizzando l'elemento più scarso.

Dall'interpretazione di tale legge si può capire come l'aumento delle sostanze nutritive già abbondantemente disponibili non incrementa la crescita della pianta, mentre è l'aumento della

somministrazione delle risorse nutritive meno presenti a determinare il netto miglioramento delle produzioni finali. Per tale motivo si capisce come distribuire quantità eccessive rispetto alle reali esigenze della coltura di azoto, fosforo, potassio o altri macroelementi non influisca positivamente sul suo sviluppo. Al contrario, garantendo la disponibilità dei microelementi, quindi i nutrienti richiesti in quantitativi minori ma come si è detto in precedenza altrettanto essenziali, è possibile realmente migliorare le rese finali.

- Ferro (Fe) = è il microelemento quantitativamente più richiesto dalle piante di pomodoro. Esso è un costituente dei ribosomi, organuli in cui avviene la sintesi proteica, e di enzimi di primaria importanza per la pianta (Sainju et al., 2002). Tra questi ve ne sono alcuni che fanno parte di grandi famiglie enzimatiche: a) perossidasi, enzimi in grado di inattivare i perossidi cioè composti chimicamente instabili che se non controllati potrebbero liberare forme reattive dell'ossigeno; b) catalasi, enzima specifico coinvolto anch'esso nelle reazioni metaboliche finalizzate a rendere inattivi gli eventuali radicali liberi che, se presenti nelle piante, possono portare all'ossidazione e quindi alla morte delle cellule vegetali. Da ciò emerge come il ferro sia un elemento di non trascurabile rilevanza in quelle che sono le capacità di difesa intrinseche della pianta contro eventuali situazioni di stress ossidativo che potrebbero manifestarsi durante il ciclo biologico del pomodoro. La carenza di ferro porta alla manifestazione di una clorosi che interessa l'intera pagina delle foglie più giovani.
- Boro (B) = è fortemente complessato a livello delle pareti delle cellule vegetali che costituiscono l'apparato radicale (Kumari et al., 2022), dove contribuisce a svolgere un importante ruolo di regolazione del flusso di minerali che vengono assorbiti dal suolo. Il boro, inoltre, assume un ruolo chiave anche nell'attività riproduttiva della pianta di pomodoro poiché è in grado di promuovere la fertilità del polline e la germinazione del tubetto pollinico. Un'adeguata disponibilità di boro, quindi, permette di avere piante con un apparato radicale ben strutturato e funzionale nella sua attività di assorbimento di minerali dal suolo e che siano in grado di affrontare al meglio i momenti fondamentali del loro sviluppo riproduttivo, cioè l'impollinazione e la fecondazione, in modo da ottenere una maggiore quantità di bacche di pomodoro alla raccolta (Sainju et al., 2002). D'altra parte, invece, la carenza di questo micronutriente determina la deformazione o il raggrinzimento delle foglie giovani con comparsa di aree necrotiche in corrispondenza delle nervature e può causare ritardi o squilibri durante la germinazione del polline e il suo trasporto all'interno degli organi riproduttivi della pianta, che si traducono in una formazione ridotta e non uniforme delle bacche.

- Manganese (Mn) = non è un elemento strutturale delle biomolecole; infatti, la sua funzione primaria è quella di sostenere lo svolgimento di molte reazioni enzimatiche che avvengono nella pianta. In particolare, il manganese è il cofattore della superossido dismutasi (SOD), enzima che neutralizza i radicali liberi (Waraich et al., 2012) che potrebbero portare all'ossidazione delle cellule vegetali a livello del cloroplasto, cioè l'organulo in cui avviene la fotosintesi clorofilliana. Da ciò si evince come anche il manganese sia coinvolto nella via metabolica più importante delle piante. L'ingiallimento internervale delle foglie giovani è segnale di una nutrizione insufficiente di manganese.
- Zinco (Zn) = è un costituente di molti enzimi essenziali per le attività metaboliche secondarie del pomodoro, di cui i principali sono: a) l'anidrasi carbonica, enzima che svolge una funzione tampone poiché in grado di convertire la CO₂ captata dall'atmosfera in acido carbonico quando bisogna regolare il livello di pH all'interno delle cellule; b) l'alcol deidrogenasi (Kumari et al., 2022) che trasforma i composti contenenti il gruppo ossidrilico, tossici per la pianta e che si originano dalle varie attività metaboliche, in acetaldeide. In aggiunta al ruolo di attivatore dei processi enzimatici appena descritti, lo zinco è richiesto per la sintesi del triptofano, precursore delle auxine cioè gli ormoni naturalmente prodotti dalla pianta e responsabili dello sviluppo dei tessuti. Rifornimenti non ottimali di zinco determinano la presenza di internodi corti e sulle foglie la comparsa di macchie necrotiche brune, accartocciamento delle lamine e una loro possibile caduta prematura.
- Molibdeno (Mo) = è il micronutriente quantitativamente meno richiesto; quindi, rare sono le situazioni in cui la pianta può non soddisfare le proprie esigenze. Detto ciò, nel pomodoro il molibdeno è richiesto per il metabolismo dell'azoto (Sainju et al., 2002) poiché è presente nel complesso enzimatico della nitrato reductasi, il quale è responsabile della reazione di riduzione con cui il nitrato che arriva tramite il flusso xilematico nelle foglie viene convertito in azoto organico che verrà utilizzato per la biosintesi delle proteine. La carenza di molibdeno porta alla comparsa di margini fogliari necrotici e di foglie strutturalmente più esili.

2.4. Relazione tra nutrienti e pH del suolo

Strettamente correlata alla tematica riguardante la funzione e l'importanza di tutti gli elementi minerali è l'analisi di una delle caratteristiche che più influisce sulla loro biodisponibilità nel suolo, e di conseguenza sull'assorbimento da parte delle piante, ossia il pH.

Il pH è una proprietà chimica che è presente, e a cui si fa riferimento in qualsiasi ambito di applicazione, ogni qual volta si prende in considerazione una soluzione composta da acqua e altri elementi minerali e sta ad indicare la concentrazione di idrogenioni (ioni H^+) che in essa sono presenti. Per capire il motivo dell'importanza di questa proprietà chimica è bene tener presente che nel mondo vegetale le piante sono in grado di assorbire, attraverso il loro apparato radicale, gli elementi nutritivi dal terreno solo se essi sono presenti come ioni liberi nella soluzione circolante. Quindi, poiché ogni suolo ha tra i suoi maggiori elementi costitutivi proprio l'acqua, emerge come il suo pH abbia enorme influenza sulla disponibilità o meno dei nutrienti di cui la pianta ha bisogno e su molti processi biogeochimici che interessano anch'essi il corretto sviluppo e la produzione complessiva di biomassa da parte delle piante di pomodoro (Neina, 2019). Tra questi vi è l'influenza del pH sulla presenza dei principali microrganismi del terreno, ossia funghi e batteri, i quali svolgono la fondamentale operazione di mineralizzazione a carico delle sostanze organiche ed inorganiche che arrivano nel suolo, che termina con la loro degradazione e con la liberazione di elementi minerali potenzialmente disponibili per l'assorbimento da parte delle piante. Riguardo questo fenomeno svolto dai microrganismi, il più delle volte attraverso la produzione di enzimi extracellulari, esso è generalmente favorito in suoli in cui vi è un pH compreso tra 5.5 e 8.8; più nello specifico, in condizioni di pH tendente all'acidità vi è una maggiore attività da parte dei funghi a differenza dei batteri, invece, la cui funzionalità è incrementata quando il pH tende all'alcalinità (Neina, 2019).

La spiccata rilevanza del pH, come una delle caratteristiche che maggiormente si considerano nella valutazione complessiva di un terreno agrario, sta nel fatto che esso condiziona considerevolmente la solubilità degli elementi nutritivi in forme chimiche più o meno disponibili e la loro possibile lisciviazione verso gli orizzonti più profondi del suolo. Si desume, quindi, che valori anomali di pH portano a fenomeni di precipitazione chimica degli elementi minerali di cui la pianta necessita che si traducono in situazioni di carenze nutrizionali e alterazioni nel corretto sviluppo vegetativo e riproduttivo.

La concentrazione di idrogenioni nella soluzione circolante del suolo, appurata tramite specifiche analisi di laboratorio, viene espressa attraverso un numero compreso, in quasi la totalità dei casi, tra 3.5 e 9.5 e sulla base di tale valore un terreno può essere definito in diverso modo come riportato nella tabella seguente:

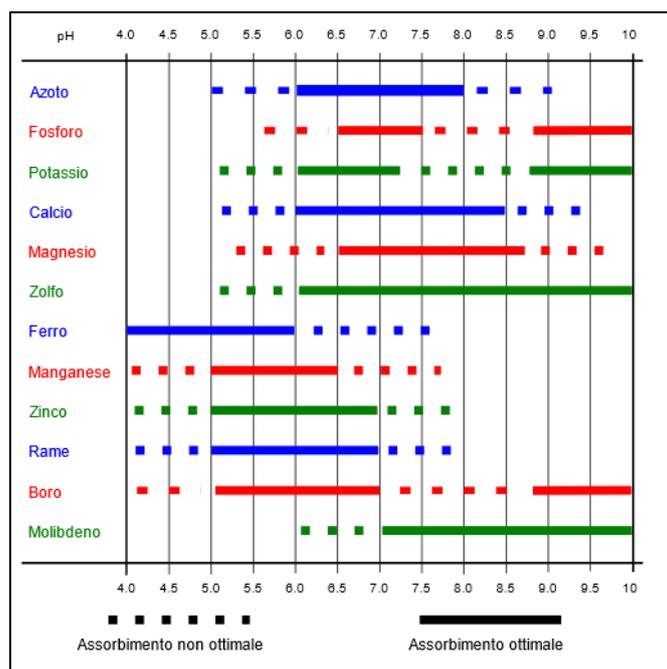
Tabella 5. Classificazione del terreno in base al pH (ARPAV, L'interpretazione delle analisi del terreno, 1990)

| Classi | pH |
|-------------|---------|
| molto acido | <5,4 |
| acido | 5,4-5,9 |
| subacido | 6,0-6,6 |
| neutro | 6,7-7,2 |
| subalcalino | 7,3-8,0 |
| alcalino | 8,1-8,6 |
| m. alcalino | >8,6 |

- Suoli acidi (pH < 5.9): si contraddistinguono per l'elevata concentrazione di ioni H⁺ nella soluzione idrica, fenomeno che può essere dovuto principalmente a cause geologiche e in particolare ai processi pedogenetici che hanno interessato la roccia madre nel corso dei millenni. In questo caso, quindi, il suolo deriva da rocce madri ricche di minerali che, dopo essere stati degradati dai vari agenti biotici e abiotici, in soluzione acquosa rendono disponibili ioni minerali come il ferro, l'alluminio, il boro e il manganese. Tali ioni tenderanno ad unirsi ai gruppi ossidrilici (OH⁻) delle molecole di acqua, liberando in questo modo gli ioni H⁺ che determineranno la riduzione complessiva del pH. Oltre che a queste cause geologiche, l'acidità di un suolo la si può correlare anche a specifiche condizioni climatico-ambientali e in particolare all'elevata piovosità. La pioggia arriva al terreno sotto forma di acido carbonico H₂CO₃, in seguito all'unione tra l'acqua e l'anidride carbonica atmosferica, contribuendo quindi a liberare ioni H⁺ che acidificano, quindi, la soluzione. Per quanto riguarda la nutrizione vegetale, nei terreni con pH acido vi è nel complesso un'ottima disponibilità degli ioni che si presentano solubili e liberi nella soluzione circolante in tali condizioni, ossia il ferro, il boro, il manganese, lo zinco e il molibdeno. Tali minerali saturano quindi le superfici colloidal del suolo rendendo molto poco disponibili, invece, nutrienti come il calcio, il potassio, il magnesio, lo zolfo e il fosforo.

- Suoli basici o alcalini ($\text{pH} > 8.1$): il più delle volte il loro valore del pH è dovuto a cause telluriche e nello specifico al fatto che questi terreni si originano a partire da rocce madri calcaree costituite principalmente da carbonati di calcio e magnesio. La degradazione di questi minerali porta alla liberazione di ossidi, cioè composti che nella soluzione circolante tendono a dissociarsi favorendo così la maggiore disponibilità di ioni ossidrilici OH^- , i quali comportano un aumento del pH complessivo. I terreni con questi valori di pH presentano, quindi, una buonissima concentrazione di elementi minerali come il calcio, il magnesio, il potassio e lo zolfo che saturano i siti di scambio del suolo a discapito, quindi, dei cationi che invece caratterizzano i suoli acidi ossia il ferro, il boro, il manganese e lo zinco che formano complessi insolubili e quindi non disponibili per l'assorbimento da parte delle piante.
- Suoli neutri ($6.5 < \text{pH} < 7.5$): rappresentano la situazione ideale per la coltivazione di una qualsiasi coltura. Sono terreni nella cui soluzione circolante si è creata una situazione di equilibrio tale da non determinare né la presenza in eccesso degli ioni H^+ , che causerebbe aumento dell'acidità, né la maggior concentrazione di ioni OH^- , che invece favorirebbe l'alcalinità. Nei suoli neutri, quindi, tutti gli elementi minerali possono essere disponibili in forme libere e solubili per essere assorbiti dall'apparato radicale delle piante. Unica eccezione è per il ferro, il quale presenta la sua massima solubilità e quindi biodisponibilità per i vegetali ad un livello di pH pari a 4, quindi anche nei suoli neutri potrebbero manifestarsi condizioni di carenza. Inoltre, riguardo questa tipologia di terreni, è bene considerare come essi rappresentino l'unica condizione in cui il fosforo, assorbito dalle piante sotto forma di ione fosfato $(\text{PO}_4)^{3-}$, è libero nella soluzione circolante e quindi disponibile per le piante poiché, essendo per via delle sue caratteristiche chimico-fisiche un composto molto poco solubile, tende a dare origine molto facilmente a composti altamente insolubili infatti in condizioni di pH acido precipita andando a formare fosfati di ferro e di alluminio e in situazioni di pH basico costituisce fosfati di calcio.

Figura 1. Disponibilità degli elementi minerali in funzione dei diversi valori di pH del suolo (Wikipedia)



Partendo da questi concetti generali si può spostare il focus sulle esigenze specifiche del pomodoro in termini di pH del suolo. Essendo una specie vegetale molto esigente in termini di richieste nutrizionali, i terreni che presentano la migliore attitudine ad ospitare la coltivazione del pomodoro sono quelli con valori di pH neutri o al massimo sub-acidi, quindi compresi tra 5.5 e 7.5 (Sansavini e Ranaldi, 2021), in cui vi è la biodisponibilità della quasi totalità degli elementi minerali. Tuttavia, il pomodoro in Italia viene coltivato in maniera significativa nel meridione, area in cui i suoli presentano un pH il più delle volte alcalino (> 8.1) innanzitutto per motivi geologici, quindi, poiché derivano da rocce madri calcaree, ma anche per via del tipico clima arido con poche precipitazioni che tende ad accentuare tale fattore data la scarsa presenza di piogge che contribuirebbero ad apportare acido carbonico al terreno, utile per mitigare il pH alcalino per costituzione. Di fronte a questa situazione, ma anche nel caso in cui ci si ritrovi a dover coltivare il pomodoro su terreni che presentano un pH acido (< 5.9), risulta fondamentale la corretta interpretazione dell'analisi effettuata in precedenza circa le diverse tipologie di suolo. Una possibile soluzione, quindi, per prevenire l'insorgenza di eventuali carenze nutrizionali che potrebbero manifestarsi sulle piante di pomodoro è quella di soddisfare in primis le richieste nutrizionali degli elementi minerali che potrebbero essere presenti in quantità non sufficienti o in forme insolubili tali da non poter soddisfare le esigenze delle piante.

3. ESIGENZE TERMICHE E IDRICHE

Il pomodoro, come è stato evidenziato già nella parte introduttiva di questo lavoro, è una specie vegetale natia dell'America centrale, territorio che si contraddistingue per il suo clima tipicamente caldo che si protrae per gran parte dei mesi dell'anno. Quindi, è proprio con l'analisi di quelle che sono le origini storiche della coltivazione e della domesticazione del pomodoro che è possibile comprendere quali siano le sue esigenze climatiche e di come questa specie vegetale si sia adattata egregiamente all'ambiente mediterraneo.

Prendendo in considerazione la coltivazione in pieno campo, che è strettamente dipendente dalle condizioni ambientali, il pomodoro compie il suo ciclo biologico nel periodo primaverile-estivo, tipicamente compreso tra marzo-aprile e giugno-luglio. Va da sé, quindi, come questa coltura temi le basse temperature e prediliga quelle medio-alte abbinate ad un'ottima esposizione solare per sostenere uno sviluppo vegetativo e riproduttivo ideale che possa portare ad ottenere rese elevate alla raccolta. Analizzando nel dettaglio, le esigenze termiche sono di 18-20 °C per la fioritura e di 23-24 °C per la maturazione (Sansavini e Ranali, 2021), mentre le condizioni di stress da caldo o da freddo si manifestano quando le temperature aumentano o diminuiscono rispetto ai valori medi ottimali dell'ordine dei 10-12 °C.

Mettendo in relazione le temperature che il pomodoro richiede per compiere il suo ciclo biologico con la sua situazione climatica attuale, si evince come la coltivazione del pomodoro possa divenire sempre più difficile. La temperatura atmosferica media è in costante aumento con un incremento stimato di 2,6-4,8 °C tra il 2081 e il 2100 (Parvin et al., 2019) e inoltre sempre più frequenti sono le situazioni in cui si manifestano condizioni climatiche non in linea con quelli che dovrebbero essere gli andamenti stagionali previsti, come ad esempio i ritorni di freddo che si verificano soprattutto nella stagione primaverile durante la quale si svolge una fase cruciale della fenologia del pomodoro, cioè la fioritura. Le basse temperature determinano l'irrigidimento delle membrane cellulari, che quindi si traduce in una minor permeabilità, e la denaturazione di molte proteine ed enzimi fondamentali per le attività metaboliche della pianta. Lo stress da freddo durante le fasi riproduttive della pianta, in funzione dell'intensità e della durata, può quindi influire negativamente sulla fertilità del polline, sulla germinazione del tubetto pollinico e determinare la caduta dei fiori o una ridotta futura pezzatura dei frutti (Waraich et al., 2012), tutti fattori che concorrono alla diminuzione complessiva della resa finale. Rispetto alle possibili situazioni di stress che potrebbero manifestarsi in seguito alle basse temperature in fioritura, ancora più frequenti e probabili sono le condizioni di

stress da caldo che si concentrano sostanzialmente nei mesi estivi e quindi in concomitanza con la maturazione del pomodoro. Le problematiche insorgono quando si arriva a temperature uguali o superiori ai 35°C, situazione ormai sempre più frequente nell'areale mediterraneo, poiché ciò corrisponde ad un aumento oltre i 10-12°C rispetto alle temperature ottimali richieste in maturazione. Lo stress da caldo, in funzione dell'intensità e della durata, provoca innanzitutto un notevole incremento dell'evapotraspirazione della pianta, condizione che determina una diminuzione del contenuto di acqua presente nel terreno, da cui si origina anche lo stress salino dovuto all'aumento della concentrazione di minerali in soluzione, e nella biomassa vegetale. Ciò causa una serie di conseguenze negative: la perdita di turgore e il progressivo avvizzimento dei tessuti, con un ingente danno economico se ciò si verifica a carico delle bacche; la riduzione delle attività enzimatiche e quindi del metabolismo complessivo della pianta che porta al peggioramento degli aspetti qualitativi dei pomodori per via della minor produzione e del minor accumulo di fotosintetati; la degradazione di biomolecole, come le clorofille o i lipidi, in seguito a cui si liberano le specie reattive dell'ossigeno (ROS) cioè composti altamente instabili dal punto di vista chimico-fisico responsabili dell'ossidazione delle cellule che si manifesta con la comparsa di imbrunimenti sugli organi della pianta; una minore attività dell'apparato radicale.

Bene è specificare, però, come tutte queste possibili problematiche legate alle condizioni ambientali diventino di marginale importanza nelle coltivazioni di pomodoro in ambiente protetto, dove è possibile modificare e monitorare in qualsiasi momento i fattori ambientali per soddisfare al meglio le esigenze specifiche del pomodoro in corrispondenza di ogni fase del suo ciclo di sviluppo. Considerando, però, tutti gli eventuali effetti negativi relativi sia alla resa che alla qualità dei frutti, nelle coltivazioni di pomodoro in pieno di campo risulta fondamentale cercare di mitigare il più possibile l'insorgenza di situazioni di stress mediante una corretta gestione delle pratiche agronomiche da eseguire in fase di coltivazione. In quest'ambito, la corretta gestione della nutrizione in termini di scelta dei giusti elementi minerali e di frazionamento delle dosi, tematica che verrà approfondita più dettagliatamente nei capitoli successivi di questo lavoro, risulta essere decisiva per la mitigazione degli stress ambientali dovuti sia alle alte che alle basse temperature.

Ponendo, invece, in maniera più oculata l'attenzione sullo stress da caldo, poiché nel bacino mediterraneo ormai sempre più frequenti sono le stagioni primaverili-estive in cui vi sono temperature più alte della media e periodi con scarse precipitazioni piovose, oltre che alla gestione dell'aspetto nutrizionale, una pratica agronomica su cui focalizzarsi per preservare lo sviluppo del pomodoro è la corretta gestione della tecnica irrigua. L'acqua, infatti, è uno dei fattori che influisce direttamente

sullo sviluppo dei frutti poiché la produzione di nuove cellule e il loro aumento in volume è determinato dalla pressione di turgore interna della pianta, la quale esercita una pressione meccanica verso la parete cellulare causando così l'incremento delle loro dimensioni. (Stikic et al., 2015).

Per raggiungere l'obiettivo di massimizzare le rese e la qualità nella coltivazione del pomodoro è, quindi, essenziale soddisfare le notevoli esigenze idriche richieste da questa pianta, che secondo i dati di letteratura sono dell'ordine di 5000-7000 m³/ha per il pomodoro da industria e di 1500-2000 m³/ha per il pomodoro da mensa (Sansavini e Ranali, 2021). Considerando gli scarsi apporti di acqua provenienti dalle precipitazioni piovose, situazione ormai sempre più frequente nei mesi estivi, i fabbisogni idrici del pomodoro devono essere soddisfatti quasi completamente con gli interventi irrigui (Rinaldi e Rana, 2004). Risulta, perciò, fondamentale adottare un approccio che sia il più analitico e preciso possibile nell'eseguire un corretto piano che stabilisca tutti i parametri relativi agli interventi irrigui da eseguire.

Nello specifico, affrontando la tematica dell'irrigazione, una delle principali variabili che maggiormente influisce sull'efficacia e sulla sostenibilità economica ed ambientale degli interventi è la corretta stima del volume irriguo da distribuire. Il dato finale lo si ottiene incrociando dati relativi alle caratteristiche fisiche e idrologiche del suolo su cui si sta coltivando, alle esigenze specifiche del pomodoro durante il suo ciclo biologico e al metodo irriguo adottato.

Riguardo le proprietà idrologiche di un terreno, che dipendono strettamente dalle sue caratteristiche fisico-strutturali, possono essere ricavate dalla letteratura e si possono esprimere in termini % o in m³/ha. Nello specifico bisogna far riferimento a:

- Capacità di campo (CC): essa esprime la quantità totale di acqua che un terreno è in grado di trattenere per lunghi periodi di tempo in modo da poter essere disponibile per l'assorbimento da parte delle piante.
- Punto di appassimento (PA): esprime la quantità di acqua presente in un terreno ma che non è disponibile per l'assorbimento da parte delle piante poiché trattenuta in maniera permanente dalle superfici colloidali e dalla microporosità del suolo.
- Acqua disponibile massima (ADM): la si calcola facendo la differenza tra la capacità di campo e il punto di appassimento e corrisponde alla frazione di acqua che effettivamente può essere assorbita dalle piante.

L'obiettivo che si intende raggiungere attraverso l'irrigazione è quello di distribuire il corretto quantitativo di acqua necessario a riportare alla capacità di campo lo strato di terreno in cui si concentra l'apparato radicale, in modo da garantire un'ottimale disponibilità idrica alle piante di pomodoro in ogni momento del loro ciclo di sviluppo. Per fare ciò bisogna, quindi, eseguire un bilancio idrico monitorando quotidianamente gli output e gli input idrici del sistema. L'acqua che viene persa dal sistema, e che quindi dovrà essere compensata tramite l'irrigazione, è dovuta principalmente al fenomeno dell'evapotraspirazione.

L'evapotraspirazione è un dato che esprime la perdita di acqua che si verifica per via dei processi contemporanei di evaporazione dal suolo e traspirazione dalla pianta. Per calcolare l'evapotraspirazione effettiva (ETe) del pomodoro in un qualsiasi momento del suo ciclo così da capire la quantità di acqua che viene persa dal suolo, bisogna partire dalla stima dell'evapotraspirazione di riferimento (ETo). Quest'ultima indica la quantità di acqua che viene persa per evapotraspirazione considerando solo le variabili climatico-ambientali senza considerare le esigenze specifiche del pomodoro e può essere calcolata applicando la formula di Hargreaves:

$$ETo \text{ (mm/d)} = 0,0023 * (RA/\lambda) * (\Delta T)^{-1} * (Tm + 17,8)$$

- RA (MJ/m²d)= radiazione extraterrestre, dipende unicamente dalla latitudine e dal giorno dell'anno, si ricava da riferimenti bibliografici;
- λ = calore latente di vaporizzazione = $2,501 - 0,00236 * Tm$;
- ΔT = differenza tra temperatura massima e minima del giorno considerato;
- Tm = temperatura media del giorno considerato.

Ottenuta l'ETo, si passa alla stima dell'ETp, l'evapotraspirazione potenziale, parametro che esprime la quantità massima di acqua che può essere persa dalle piante nella condizione ideale in cui vi sia una disponibilità idrica nel terreno ottimale:

$$ETp \text{ (mm/d)} = ETo * Kc$$

L'ETp, quindi, è strettamente correlata al valore del coefficiente colturale Kc che tiene in conto della quantità di acqua persa dalla pianta in funzione della fase fenologica in cui si trova nel momento in cui si esegue il calcolo, poiché le richieste idriche sono variabili durante l'intero ciclo biologico. I valori del Kc per il pomodoro, estrapolati dalla letteratura sono:

Tabella 6. Valori del coefficiente colturale K_c per il pomodoro (Fonte: Francesco Tei, Università degli studi di Perugia)

| FASE DEL CICLO BIOLOGICO | K_c |
|---|-------|
| Trapianto – ricoprimento del terreno del 10% | 0,4 |
| Ricoprimento 10% - inizio crescita rapida | 0,6 |
| Rapida crescita apparato fogliare - Fioritura | 0,8 |
| Fioritura – comparsa primi frutti | 1,0 |
| Ingrossamento bacche/massima copertura | 1,05 |
| Massima copertura – maturazione 30% bacche | 0,9 |
| Maturazione 30% bacche - raccolta | 0,6 |

Infine, per ottenere la reale perdita di acqua dalle piante di pomodoro considerando allo stesso tempo le condizioni ambientali, la fase fenologica in cui si trova la coltura e le condizioni di rifornimento idrico del terreno, si calcola l' E_{Te} , ossia l'evapotraspirazione effettiva:

$$E_{Te} \text{ (mm/d)} = E_{Tp} * K_s$$

Nel complesso, quindi, moltiplicando l' E_{Tp} per il coefficiente di stress K_s si esprime quello che è il consumo idrico effettivo della pianta considerando anche le condizioni idriche del terreno. Il valore del K_s , infatti, dipende strettamente dall'umidità attuale del terreno messa in relazione con il limite critico d'intervento secondo cui, per il pomodoro, la pianta può iniziare a manifestare problematiche da stress idrico. Tale situazione si verifica quando l'umidità attuale del terreno scende al di sotto del 50% dell'acqua disponibile massima, quindi:

- $K_s = 1$ (se l'umidità del terreno è maggiore del limite critico di intervento);
- $K_s = (U_{att} - PA) / (ADM - PA)$ (se l'umidità del terreno è inferiore al limite critico d'intervento).

Il valore dell' E_{Te} , quindi, rappresenta l'output reale di acqua che si ha dalla coltivazione di pomodoro in atto e può essere inserito all'interno del bilancio idrico così da relazionarlo con le voci degli input costituite, invece, dall'acqua arrivata al terreno tramite gli eventi piovosi e/o l'acqua apportata al terreno in seguito ad interventi irrigui. Con il costante aggiornamento del bilancio idrico, dunque, è possibile stabilire il momento in cui il processo evapotraspirativo delle piante, pur compensato parzialmente dagli apporti idrici naturali, ha consumato una certa frazione delle riserve idriche del

suolo oltre cui la coltura diventa suscettibile ai problemi dovuti allo stress idrico. Superata questa soglia limite bisogna intervenire distribuendo un volume d'acqua pari a:

$$V = [S * h * dapp * (CC-Uatt)/100] * eff$$

- V = volume d'acqua da distribuire
- S = superficie del suolo (m²)
- h = profondità del suolo esplorata dalle radici (m)
- CC = capacità di campo del terreno (%)
- Uatt = umidità del suolo attuale (%)
- eff = efficienza dell'impianto irriguo

4. STRATEGIE PER CONTRASTARE GLI STRESS ABIOTICI

Nel contesto odierno l'agricoltura non è intesa più solamente come un'attività finalizzata ad ottenere solo la maggiore quantità possibile di prodotti derivati dalle varie colture, indipendentemente dalle tecniche adottate. Infatti, oltre a questo primario obiettivo, il settore primario deve far fronte ad un contesto climatico-ambientale in continua evoluzione e indirizzato verso l'aumento generale delle temperature globali e la manifestazione sempre più frequenti di eventi climatici estremi, fenomeni che rendono sempre più difficoltosa la gestione delle principali colture agricole.

Trovare una soluzione certa ed efficace in ogni situazione per coltivare le varie specie vegetali è pressoché impossibile, vista l'enorme variabilità di fenomeni che potrebbero presentarsi, per questo risulta fondamentale adottare un approccio che integri al meglio tutte le possibili strategie che possono aiutare a prevenire e a contrastare i possibili stress abiotici dovuti principalmente alle variabili ambientali. Di seguito, si analizzeranno alcune metodiche di mitigazione ai vari stress, ottenute da ricerche bibliografiche specifiche, che possono essere applicate in pomodoro per ottimizzare le rese in termini quantitativi e qualitativi.

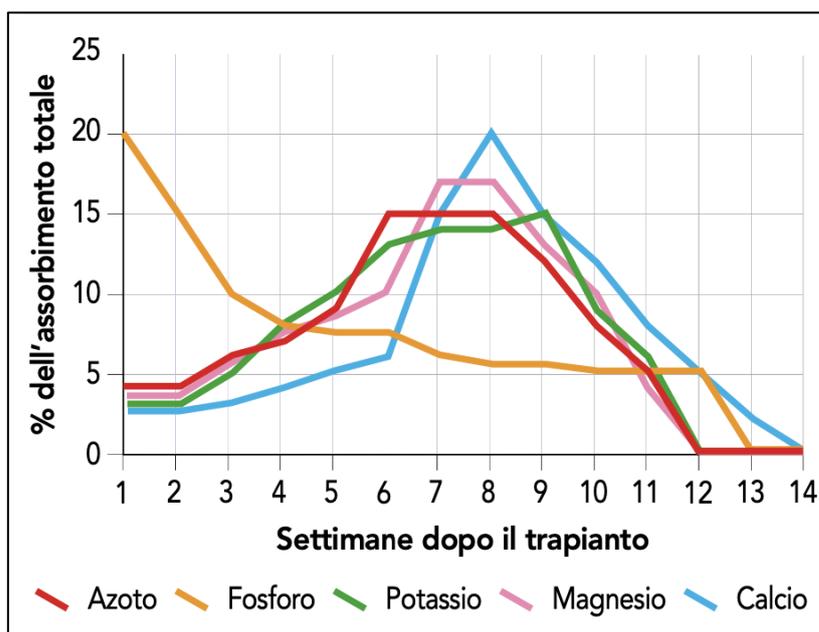
4.1. Frazionamento dei macronutrienti

Il pomodoro è tra le specie vegetali maggiormente esigenti in termini di input esterni, se l'obiettivo è quello di massimizzare le produzioni sia dal punto di vista quantitativo che qualitativo, in modo da rendere il più redditizia possibile la coltivazione per l'agricoltore e per avere sul mercato prodotti con caratteristiche organolettiche e nutrizionali ottimali. Soddisfare le esigenze idriche del pomodoro, come già analizzato in precedenza, risulta imprescindibile per evitare che le piante durante il loro ciclo primaverile-estivo debbano fronteggiare lo stress idrico. Oltre all'irrigazione, un'altra tematica chiave per fare in modo che non insorgano possibili situazioni negative per via delle eventuali condizioni ambientali negative che potrebbero manifestarsi, è la corretta gestione degli elementi nutritivi di cui la pianta necessita. Il focus è rivolto sulla distribuzione delle giuste quantità di ogni elemento minerale e sul loro frazionamento, poiché affrontando al meglio queste variabili è possibile raggiungere molteplici obiettivi, tra cui vi è il soddisfacimento delle esigenze nutrizionali specifiche del pomodoro in funzione delle varie fasi del suo ciclo biologico di sviluppo ed evitare l'inutile apporto di elementi minerali in momenti in cui non verrebbero assorbiti dalle piante e, quindi, persi nell'ambiente con conseguenze negative su tutto l'ecosistema e sui costi sostenuti dall'agricoltore per l'acquisto dei fertilizzanti e per la loro distribuzione.

La base di un ottimo piano di nutrizione per il pomodoro inizia dalla stima precisa delle asportazioni che si avranno in seguito alla raccolta delle bacche, così da fornire al terreno la giusta quantità di nutrienti che poi effettivamente verranno utilizzati dalle piante. I valori numerici precisi possono essere calcolati partendo dalle asportazioni unitarie del pomodoro e dalla quantità di prodotto utile finale che si vorrebbe ottenere. Quindi, se l'obiettivo di resa è di 100 ton/ha di pomodori, bisogna fornire 200-300 kg/ha di azoto, 45-80 kg/ha di fosforo, 240-400 kg/ha di potassio, 250-400 kg /ha di calcio e 50-80 kg/ha di magnesio. La scelta del numero esatto all'interno dei range evidenziati dipende sostanzialmente dalla fertilità del terreno su cui si sta coltivando; quindi, i valori possono variare in funzione di caratteristiche quali la tessitura, il contenuto di sostanza organica, il pH della soluzione idrica, la presenza e la disponibilità dei vari elementi minerali.

Stabilite le quantità precise delle varie dosi, è necessario programmare in quali tempi e con che modalità distribuirle in campo facendo riferimento alla fisiologia di sviluppo del pomodoro e alle diverse esigenze che si hanno nelle varie fasi fenologiche.

Figura 2. Esigenze nutrizionali del pomodoro nelle diverse fasi di sviluppo. (Francesco Tei, Modelli del pomodoro da industria, Università degli studi di Perugia)



Per la coltivazione del pomodoro ad oggi si ricorre quasi solo ed esclusivamente al trapianto, quindi nel momento in cui vengono messe a dimora le piantine esse devono avere a disposizione tutti e tre i macronutrienti fondamentali (azoto, fosforo e potassio) in modo da poter superare senza problemi la crisi da trapianto, cioè il periodo che comprende le prime due settimane immediatamente successive al trapianto, durante il quale le piantine sono ferme dal punto di vista della loro attività metabolica

poiché devono adattarsi al nuovo ambiente in cui si trovano, cioè il campo, molto diverso dall'ambiente protetto tipico dei vivai, in cui risiedevano nei momenti precedenti al trapianto. Per avere a disposizione i tre macronutrienti nelle primissime fasi del ciclo di sviluppo del pomodoro, si esegue una concimazione di fondo uno o due settimane prima del trapianto, con concimi ternari, in cui si distribuisce: il 30% della dose totale dell'azoto, quantità sufficiente a sostenere le primissime fasi sviluppo delle piantine; il 60% della dose totale di fosforo, è il nutriente maggiormente assorbito in questa fase poiché indispensabile per stimolare lo sviluppo dell'apparato radicale; il 70% della dose totale di potassio, poiché favorisce l'attività dei tessuti meristemati ed in più viene trattenuto dal potere adsorbente del terreno, quindi il rischio di essere perso per lisciviazione è basso. Questa prima concimazione può essere completata con la distribuzione localizzata al momento del trapianto del 20% della dose totale di fosforo, che funge da quota "starter" per via del suo già citato effetto positivo sullo sviluppo radicale (Sandro Cornali, L'Informatore agrario, n.15/2020).

Nelle settimane successive, dopo aver superato lo stress da trapianto, le esigenze nutrizionali delle piante di pomodoro variano decisamente. Nello specifico, le prime fasi del di crescita, dopo che si è verificato l'attecchimento, sono incentrate esclusivamente sullo sviluppo vegetativo delle piante che portano all'accrescimento del fusto e alla produzione di nuove foglie fondamentali per incrementare l'attività fotosintetica; quindi, in questa fase è l'azoto l'elemento nutritivo maggiormente assorbito anche se il fosforo non va ancora del tutto tralasciato. Per soddisfare tali esigenze nutrizionali, cercando di evitare la perdita per lisciviazione dei minerali, si interviene in fertirrigazione, cioè distribuendo i fertilizzanti attraverso l'acqua di irrigazione, apportando il 50% della dose totale di azoto e il rimanente 20% di fosforo frazionandoli tra più interventi settimanali eseguiti fino al momento prima della fioritura. In linea generale, è bene evidenziare che la fertirrigazione è una tecnica basata sulla distribuzione di micro portate di acqua, abbinata agli elementi minerali, che quindi consente di mettere a disposizione delle piante una quantità costante di soluzione idrica, in modo che esse siano in grado di fronteggiare al meglio l'umidità persa per effetto dell'evapotraspirazione in seguito alle alte temperature che possono esservi anche per periodi di tempo continuativi nelle giornate estive.

Dopo aver completato lo sviluppo della propria biomassa vegetale, inizia lo sviluppo riproduttivo delle piante con il fenomeno della fioritura, che avviene in modo scalare sulla pianta a partire dalle infiorescenze che si originano dal fusto principale per poi passare a quelle situate sui fusti che si sono sviluppati dall'ascella delle foglie. Durante la fioritura, si interviene sempre in fertirrigazione distribuendo la restante parte della dose totale di azoto, utile solo per favorire la fertilità del polline e

per supportare l'attività fotosintetica della biomassa vegetale senza, però, stimolarne la crescita (Sandro Cornali, L'Informatore agrario, n.15/2020). Può determinare un effetto altamente benefico per questo processo fisiologico la distribuzione del boro, micronutriente i cui effetti positivi verranno trattati successivamente in questo lavoro. Terminata la fioritura e la subito successiva allegagione, una volta che si sono formate le bacche, vi è la necessità di apportare gli elementi minerali che influiscono maggiormente sul loro corretto sviluppo. Fondamentale è, quindi, sostenere il periodo della maturazione dei pomodori distribuendo la quota rimanente di potassio, pari a circa il 30% del totale, fondamentale poiché stimola l'attività dell'amido sintetasi, enzima coinvolto nella produzione di zuccheri che si accumuleranno nei frutti così da avere un incremento del grado zuccherino (°Brix). Insieme al potassio, in maturazione anche il calcio riveste un ruolo di primaria importanza poiché anch'esso stimola la traslocazione di polisaccaridi nelle bacche e in più rappresenta l'elemento che, insieme alle pectine, mantiene unite le pareti delle cellule vegetali a livello del pericarpo dei frutti, conferendo così una maggiore resistenza meccanica alle bacche ed evitando che si possa manifestare il fenomeno del marciume apicale. Complessivamente, quindi, con la distribuzione di potassio e calcio, attraverso interventi settimanali in fertirrigazione da interrompere almeno 15 giorni prima della raccolta (Sandro Cornali, L'Informatore agrario, n.15/2020), è possibile ottenere pomodori con pezzatura ottimale, con una migliore attitudine alla conservazione e alla commercializzazione dopo che essi sono stati staccati dalla pianta (shelf-life) e con caratteristiche organolettiche e tecnologiche che soddisfano le esigenze del mercato.

4.2. Calcio, boro, zinco

Il corretto sviluppo del pomodoro durante le diverse fasi fenologiche del suo ciclo biologico è conseguenza, come si è analizzato poc'anzi, della disponibilità dei vari macronutrienti di cui esso necessita in corrispondenza dei momenti in cui si verificano i picchi di assorbimento di ognuno di esso. Per arrivare, però, ad ottenere risultati migliori dal punto di vista quantitativo e qualitativo, non si può tralasciare la corretta gestione degli elementi nutritivi secondari. Essi, infatti, contribuiscono a rendere le piante maggiormente in grado di far fronte ad eventuali stress ambientali e, in più, possono sostenere positivamente la produzione delle bacche.

Il calcio tra gli elementi nutritivi secondari è sicuramente quello maggiormente richiesto dal pomodoro in termini quantitativi, essendo complessato nel pericarpo delle bacche dove svolge la sua funzione primaria, cioè conferire resistenza meccanica ai pomodori per via dei legami che instaura con le pectine. Aumentando la coesione tra le pareti cellulari, il calcio di fatto potenzia la capacità

delle bacche di pomodoro di resistere ad un'eventuale perdita di acqua che si potrebbe avere in condizioni stress idrico (Kumari et al., 2022). Inoltre, il calcio è anche un promotore dell'attività di una delle principali pompe ioniche che si trovano a livello delle membrane delle cellule vegetali, cioè l'ATPasi. Essa è in grado di trasferire nuovamente all'interno della cellula eventuali nutrienti persi in seguito al danneggiamento della membrana cellulare di quest'ultima che potrebbe verificarsi in caso di stress abiotici generici (Waraich et al., 2012).

In parallelo al calcio, la gestione dei micronutrienti e, in particolare di boro e zinco, è un altro elemento chiave per cercare di ottenere risultati ottimali nella coltivazione del pomodoro in contesti pedo-climatici non del tutto ideali.

Il boro è fortemente complessato a livello delle pareti delle cellule vegetali che costituiscono l'apparato radicale (Kumari et al., 2022), quindi, determina uno sviluppo più rilevante delle radici che si traduce in una migliore capacità da parte delle piante di assorbire l'acqua e gli elementi nutritivi dal terreno in condizioni di stress idrico. In aggiunta a ciò, il boro contribuisce a rendere più stabili i tessuti fogliari promuovendo l'attività fotosintetica delle piante che porta ad un incremento nella produzione di composti antiossidanti e di enzimi, fondamentali per contrastare eventuali ROS presenti nei tessuti (Waraich et al., 2012). Oltre a questi effetti positivi sulla fisiologia delle piante, il boro è essenziale anche per migliorare gli aspetti riguardo le produzioni di pomodoro. Ciò è dovuto alla capacità di questo micronutriente di permettere un'efficace germinazione del tubetto pollinico in fase di fecondazione e di stabilizzarsi a livello delle membrane cellulari del frutto aumentando al suo interno il flusso degli zuccheri e dei composti (acido ascorbico, vitamina C, licopene e B-carotene), che più di tutti conferiscono al pomodoro le sue eccelse qualità organolettiche. (Xu et al., 2021). Infine, altro beneficio determinato dal boro è che, promuovendo un migliore sviluppo dell'apparato radicale, di fatto favorisce l'assorbimento del calcio (Xu et al., 2021), macronutriente fondamentale come si è visto in precedenza in ottica di risposta agli stress ambientali, il quale si caratterizza per la sua scarsa mobilità nel terreno.

Così come il boro, anche lo zinco è un micronutriente di non trascurabile importanza per il pomodoro per via delle molteplici funzioni che svolge all'interno delle piante. Innanzitutto, esso è un elemento costitutivo di enzimi, come l'alcol deidrogenasi e l'anidrasi carbonica, fondamentali per le attività metaboliche secondarie le cui funzioni specifiche sono già state analizzate in precedenza in questo lavoro. In più lo zinco, nell'ottica di mitigazione agli stress abiotici, può assumere sempre più rilevanza poiché esso è richiesto nelle vie metaboliche che portano alla produzione delle auxine (Kumari et al., 2022), cioè i fitormoni responsabili dello sviluppo dei tessuti vegetali, così da favorire la crescita delle piante indipendentemente dal contesto ambientale.

Continuando la discussione sui micronutrienti, molto interessante e significativo è un esperimento (Osman et al., 2019) condotto per valutare gli effetti della distribuzione di diversi livelli di boro e di zinco, sia singolarmente che abbinati l'un l'altro, sui principali parametri quantitativi e qualitativi del pomodoro. Da queste prove è emerso che sia distribuendo singolarmente il boro (H_3BO_3) con dosi di 1kg/ha (tesi B2) che con dosi di 2Kg/ha (tesi B3), si sono ottenuti notevoli miglioramenti degli aspetti primari riguardo la resa e la qualità delle produzioni rispetto al campione non trattato (tesi B1). Risultati simili si sono ottenuti anche con l'apporto di zinco ($ZnSO_4$) con dosi di 1kg/ha (tesi Zn2) e di 2kg/ha (tesi Zn3), se confrontati con il campione non trattato (tesi Zn1). Nel complesso, però, i risultati migliori sotto tutti i punti di vista, si sono ottenuti distribuendo nello stesso momento 2kg/ha di H_3BO_3 e di 2kg/ha di $ZnSO_4$ (tesi B3Zn3). Infatti, l'interazione ottimale tra gli effetti dovuti al boro e quelli dovuti allo zinco hanno determinato esiti notevolmente positivi sulle produzioni di pomodoro in termini di altezza delle piante, numero di foglie per pianta, numero di fiori per pianta, numero di frutti per pianta, peso singolo di ogni frutto, larghezza e diametro dei frutti e resa complessiva per ettaro (Osman et al., 2019).

4.3. Biostimolanti

La manifestazione sempre più frequente di situazioni ambientali estreme, derivanti dai cambiamenti climatici, causa alterazioni nel normale ciclo di sviluppo delle colture agrarie. Per questo motivo, negli ultimi anni si sono intensificati gli studi e le sperimentazioni circa la possibilità di trovare delle soluzioni che siano il meno impattanti possibile sull'ambiente e finalizzate a mitigare gli effetti negativi dovuti ai cambiamenti climatici, che potrebbero interessare le colture causando dei notevoli cali di produzione. In quest'ottica decisivi sono stati, e saranno anche nei prossimi anni, gli studi condotti a proposito dei biostimolanti.

I biostimolanti sono delle sostanze di origine vegetale, animale o microbica, in grado di stimolare e/o potenziare quelli che sono i naturali processi fisiologici delle piante in modo incrementare il loro stato di salute complessivo, aumentare lo sviluppo vegetativo-riproduttivo e renderle più pronte per fronteggiare eventuali attacchi da parte di organismi patogeni. In più è bene chiarire che i biostimolanti aiutano le piante nell'attuare al meglio i propri processi metabolici, però, non fornendo direttamente elementi nutritivi alle piante, non possono essere classificati come fertilizzanti (Drobek et al., 2019). I biostimolanti presenti ad oggi sul mercato vengono distinti principalmente in funzione della matrice organica da cui derivano le sostanze che poi svolgeranno gli effetti benefici nei confronti delle piante.

4.3.1. Estratti di alghe marine

Tra i biostimolanti sicuramente più diffusi vi sono quelli costituiti da molecole organiche estratte dalle alghe marine. Nello specifico, esse contengono: sostanze ormonali, tra cui le auxine che favoriscono l'accrescimento dei tessuti vegetali e le citochinine che stimolano lo sviluppo radicale; sostanze con effetto ormone-simile che aumentano l'espressione dei geni responsabili della fioritura nel pomodoro (Cristofano et al., 2021); polifenoli (floroglucinololo ed eckol) fondamentali per stimolare i processi naturali delle piante finalizzati alla degradazione di eventuali ROS presenti (Ma et al., 2022). Quindi, con la distribuzione di questi estratti algali si forniscono alle piante di pomodoro delle sostanze che influenzano positivamente il loro sviluppo e la loro resistenza ad eventuali stress abiotici, il tutto con un dispendio energetico pressoché nullo poiché le piante non devono sintetizzare tali composti autonomamente attraverso le proprie vie metaboliche. Le principali alghe a partire da cui si ottengono questi estratti appartengono al gruppo delle alghe rosse (*Lithothamnium calcareum*, *Kappaphycus alvarezii*, *Jania rubens*, e *Gracilaria edulis*), delle alghe verdi (*Ulva lactuca*) e delle alghe brune (*Ascophyllum nodosum*, *Ecklonia maxima*, *Durvillaea potatorum*) (Ma et al., 2022).

4.3.2. Idrolizzati proteici

In un qualsiasi organismo vivente gli amminoacidi e le proteine svolgono delle funzioni chiave nella regolazione del corretto svolgimento di tutte le reazioni metaboliche che regolarmente si verificano. Da questo concetto generale si può capire come l'apporto esogeno alle piante di tali composti chimici possa giovare sul loro sviluppo. I biostimolanti che rientrano nella categoria degli idrolizzati proteici sono costituiti da miscele di amminoacidi, oligopeptidi e polipeptidi, estratti solitamente con la tecnica dell'idrolisi enzimatica, da matrici organiche come tessuti vegetali o animali. Questi idrolizzati possono avere una composizione chimica molto variabile in funzione della fonte da cui derivano e dai metodi che sono stati impiegati per estrarre le molecole di cui sono composti (Cristofano et al., 2021). Le funzioni benefiche che questi biostimolanti sono in grado di determinare a carico delle piante sono dovute ancora una volta al fatto che essi incrementano i naturali processi fisiologici delle piante. In particolare, gli idrolizzati proteici presenti in commercio sono delle miscele di peptidi specifici che svolgono un'azione ormone-simile, infatti, modulano la sintesi dell'acido salicilico il quale induce determinate risposte nella pianta come l'aumento della crescita dell'apparato radicale (Cristofano et al., 2021), fenomeno particolarmente favorevole per cercare di esplorare il più possibile il terreno in condizioni di stress idrico. In più, questi biostimolanti, essendo ricavati a partire da composti proteici, hanno un ottimo contenuto di azoto organico, di solito compreso tra il 9 e il 16% (Ma et al., 2022), che viene reso disponibile per l'assorbimento della pianta in maniera graduale

in funzione del tasso di mineralizzazione. Emerge, quindi, come questi formulati, fornendo anche una buona quota di azoto alla pianta, possano aiutare a contenere l'eccessivo utilizzo di fertilizzanti azotati di sintesi (Cristofaro et al.,2021). Bene è notare che molti idrolizzati proteici sono ricchi in osmoliti, cioè composti in grado di regolare positivamente la concentrazione di minerali presenti all'interno delle cellule, di fondamentale importanza per fronteggiare un eventuale stress salino o idrico. Tra questi uno dei più attivi è la prolina, amminoacido presente in maniera maggiore negli idrolizzati proteici ottenuti a partire dal tessuto connettivo degli animali (Ma et al.,2021). L'applicazione esogena di prolina risulta essere particolarmente positiva in pomodoro soprattutto per fronteggiare gli stress indotti dalle alte temperature, poiché tale amminoacido è coinvolto nell'indurre l'attivazione dei meccanismi di difesa naturali che le piante attuano in risposta agli stress ossidativi. Questi si basano sulla protezione dei composti presenti nella biomassa attraverso la degradazione dei ROS e sul favorire le interazioni tra i fosfolipidi di membrana, stabilizzando così le strutture cellulari (Tonhati et al., 2020). La prolina, inoltre, è in grado di potenziare anche il processo fotosintetico svolto dalla pianta, in seguito all'azione protettiva svolta a carico dell'enzima RuBisCO e della catena di trasporto degli elettroni a livello del fotosistema II (Tonhati et al., 2020). Anche in questo caso, così come già evidenziato nel caso dei biostimolanti derivanti dalle alghe marine, l'utilizzo degli idrolizzati proteici aumenta il contenuto di molecole, in questo caso amminoacidi, fondamentali per indurre l'attivazione di risposte specifiche nelle piante e che naturalmente verrebbero sintetizzate, però, con un dispendio energetico assolutamente non trascurabile (Tonhati et al., 2020).

4.3.3. Sostanze umiche

Le sostanze umiche rappresentano un insieme di molecole organiche che naturalmente si formano nei suoli che ospitano lo sviluppo di specie vegetali, in seguito alla decomposizione svolta dai microrganismi del suolo a carico dei residui organici che vi arrivano, e che contribuiscono alla costituzione della parte di sostanza organica stabile in un terreno, nota come humus. Tale azione di degradazione microbica avviene principalmente a carico della lignina e le principali sostanze che si liberano sono gli acidi umici (HA), gli acidi fulvici (FA) e l'umina. Esse presentano una struttura chimica caratterizzata dalla presenza di gruppi carbossilici e fenolici e la differenza primaria è dovuta alla diversa solubilità in soluzione acquosa; infatti, gli acidi umici sono solubili in condizioni di pH basico, gli acidi fulvici sono solubili indipendentemente dal livello di acidità della soluzione, l'umina rappresenta la frazione insolubile (Cristofaro et al., 2021). Visto ciò, è facile intuire come i biostimolanti presenti sul mercato siano costituiti da miscele di acidi umici e fulvici. Mentre per le altre tipologie di biostimolanti sono in commercio formulati che possono essere applicati per via

fogliare e altri per via radicale, per le sostanze umiche sono disponibili solo soluzioni da distribuire al suolo. Questo è dovuto al fatto che, ciò che conferisce a questi biostimolanti la capacità di mitigare eventuali stress abiotici che si potrebbero verificare a carico di una pianta, è l'interazione positiva che si viene a creare con il suo apparato radicale (Cristofaro et al., 2021). In particolare, come si è detto poc'anzi, le sostanze umiche sono tra i principali componenti che costituiscono la frazione di sostanza organica stabile (humus) presente nei terreni agrari, fondamentale per aumentare la fertilità organica di un suolo che si traduce nella capacità di quest'ultimo di trattenere l'acqua e gli elementi nutritivi che poi verranno assorbiti dalle colture. Quindi, con l'applicazione esogena di biostimolanti a base di sostanze umiche, di fatto, non si fa altro che aumentare la presenza di acidi umici e fulvici che, concentrandosi a livello della rizosfera, formano complessi e stabilizzano i legami con i macro e micro nutrienti presenti, così da favorire il loro assorbimento da parte dell'apparato radicale della pianta (Cristofaro et al., 2021). Tale fenomeno risulta essere particolare benefico per le piante soprattutto nel momento in cui si sta coltivando in terreni con pH sub-ottimali nei quali, quindi, alcuni elementi minerali potrebbero essere poco disponibili. Inoltre, le sostanze umiche interagiscono favorevolmente con le radici poiché stimolano l'attività delle pompe protoniche a livello delle cellule radicali, in primis l'ATPasi (Ma et al., 2022), originando così un maggior assorbimento di elementi minerali. In più, l'applicazione di questi biostimolanti risulta vantaggiosa anche per indurre l'attivazione dei meccanismi di difesa naturali delle piante contro gli effetti negativi dovuti ai vari stress abiotici. Le sostanze umiche, infatti, inducono la produzione di enzimi come la superossido dismutasi (SOD) e l'ascorbato perossidasi (APx) deputati al controllo delle specie reattive all'ossigeno (Cristofaro et al., 2021).

4.3.4. Microrganismi del suolo

Ogni terreno su cui si decide di coltivare una qualsiasi specie vegetale, in funzione di quelle che sono le sue caratteristiche chimiche, fisiche e biologiche, possiede un diverso livello di fertilità, cioè una differente attitudine nel sostenere il corretto sviluppo delle colture in atto. Un fattore che influenza significativamente la fertilità biologica di un suolo è la presenza di microrganismi e, in particolare, dei batteri PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) e dei funghi micorrizici AMF (Arbuscular mycorrhizal Fungi). Il focus è incentrato su questi due gruppi di microrganismi poiché essi, attraverso l'interazione con le radici, sono in grado di svolgere un'azione biostimolante nei confronti delle piante coltivate.

Come si può facilmente intuire dall'espressione con cui vengono definiti, i rizobatteri promotori della crescita delle piante (PGPR) colonizzano la rizosfera, cioè la porzione di suolo in cui si concentra lo sviluppo delle radici delle piante, e agiscono a beneficio delle colture attraverso meccanismi che possono essere sia diretti che indiretti (Bona et al., 2018). Uno dei principali caratteri che contraddistingue i PGPR è la loro capacità di instaurare rapporti simbiotici con le piante, vantaggiosi sia per quest'ultime che per i batteri. Fenomeno che più di tutti evidenzia tale simbiosi positiva è la fissazione dell'azoto atmosferico svolta dai PGPR. Essi, infatti, sono in grado di convertire l'azoto inerte presente in atmosfera in azoto ammoniacale, cioè una forma disponibile per l'utilizzo da parte delle piante, grazie all'utilizzo di un complesso enzimatico specifico, la nitrogenasi. L'ammoniaca, prodotta in seguito alla reazione di riduzione catalizzata dall'enzima appena citato, viene ceduta direttamente alla pianta che, quindi, assume azoto senza spendere nulla in termini energetici. Nel contempo, la simbiosi si concretizza poiché i PGPR ricavano il carbonio organico, di cui hanno bisogno per soddisfare le proprie esigenze vitali, dagli essudati radicali rilasciati dalla pianta (Sukul et al., 2021). Rimanendo in tema di nutrizione, la promozione della crescita delle piante indotta dai PGPR è dovuta anche alla loro capacità di produrre acidi organici (acido ossalico, succinico, acetico, etc.) che, una volta rilasciati nella rizosfera, sono in grado di solubilizzare i composti fosforici insolubili per via del pH del terreno, rendendoli quindi disponibili per l'assorbimento da parte delle piante (Sukul et al., 2021). Oltre a stimolare un maggior assorbimento di fosforo dal suolo, i PGPR sintetizzano anche composti ormonali che, una volta acquisiti dalle piante, inducono delle specifiche modifiche morfologiche. Nello specifico, le auxine batteriche provocano un notevole incremento nello sviluppo dei tessuti vegetativi delle piante e una maggiore crescita delle radici laterali (Sukul et al., 2021) che si traduce in una migliore esplorazione del suolo per l'approvvigionamento degli elementi nutritivi. Parallelamente, i PGPR sintetizzano anche le citochinine e gibberelline che influenzano positivamente la produzione di nuove cellule, il processo di fioritura e la formazione dei frutti (Sukul et al., 2021). Ulteriore meccanismo con cui i PGPR agiscono a beneficio delle piante è attraverso la sintesi dei siderofori, cioè composti organici a basso peso molecolare altamente affini al ferro presente nella rizosfera, molto simili ai fitosiderofori che naturalmente la pianta rilascia nel terreno per chelare il ferro. In particolare, questi oligopeptidi di origine batterica si legano agli ioni ferro insolubili (forma ferrica Fe^{3+}) formando dei complessi ferro-siderofori che, per via della loro particolare struttura chimica e conformazione spaziale, si legano a recettori specifici presenti sulla parete della cellula batterica stessa oppure delle cellule radicali della pianta. A questo punto il complesso ferro-sideroforo entra nelle cellule vegetali, il Fe^{3+} viene rilasciato e subito ossidato nella forma chimica utile alle reazioni organiche (forma ferrosa Fe^{2+}) e il sideroforo viene degradato (Olanrewaju et al., 2017). In questo modo, quindi, la pianta acquisisce il ferro, microelemento

fondamentale per le reazioni metaboliche e molto spesso presente nel terreno solo in forma insolubile e quindi non bio-disponibile, grazie al trasporto eseguito dai siderofori prodotti dai PGPR, i quali hanno un'affinità al ferro presente in rizosfera molto più alta rispetto ai siderofori di origine vegetale (Olanrewaju et al., 2017).

Altri microrganismi tipici della rizosfera, che sono naturalmente presenti nei terreni agrari ma che possono essere anche distribuiti tramite formulati commerciali specifici per stimolare positivamente lo sviluppo delle piante, sono i funghi appartenenti al phylum Glomeromycota. Dall'interazione tra questi microrganismi e gli apparati radicali delle piante si formano associazioni simbiotiche dette micorrize. Il fungo trae vantaggio da questo rapporto potendo approvvigionarsi del carbonio organico che arriva nelle radici in seguito alle reazioni metaboliche della pianta, mentre quest'ultima si avvantaggia soprattutto per quanto concerne l'assorbimento di acqua e nutrienti dal suolo (Leventis et al., 2021). In particolare, i funghi possono legarsi fisicamente alle piante penetrando nel loro tessuto radicale senza mai penetrare all'interno delle cellule, sviluppandosi tra una cellula e l'altra e formando un reticolo (ectomicorrize), oppure, penetrando all'interno delle cellule radicali formando strutture note come arbuscoli (endomycorrize). In entrambi i casi, quest'interazione determina di fatto un cambiamento morfologico nella struttura dell'apparato radicale della pianta (Leventis et al., 2021) che, grazie all'unione stabilita con le ife fungine, arriva ad esplorare porzioni di terreno che altrimenti non sarebbe stato di raggiungere. Ciò si accompagna alla capacità delle ife di penetrare anche in quei micropori del suolo non accessibili dalle radici, e il tutto si traduce in una migliore capacità delle piante di assorbire acqua dal terreno in condizione di scarsità idrica, situazione particolarmente frequente durante la coltivazione del pomodoro. Test sperimentali in cui sono state confrontate piante di pomodoro micorrizzate coltivate con un rifornimento idrico adeguato con piante di pomodoro micorrizzate ma coltivate in condizioni di carenza idrica, hanno evidenziato un miglior effetto dell'inoculo micorrizzico, che si traduce quindi in un miglior accrescimento complessivo della coltura, in condizioni di scarsità d'acqua (Leventis et al., 2021).

In più, l'azione benefica svolta dai funghi micorrizici interessa anche l'ambito nutrizionale poiché le micorrize sono in grado di aumentare la biodisponibilità per le piante di macronutrienti fondamentali come l'azoto e il fosforo (Bona et al., 2018). Nel complesso, quindi, in seguito a queste associazioni simbiotiche, le piante incrementano la loro capacità di assorbire acqua e elementi nutritivi, soprattutto in condizioni di stress, con un dispendio energetico praticamente nullo grazie all'azione svolta delle ife fungine.

Per avere un riscontro pratico dell'utilità e delle prospettive future che i batteri PGPR e i funghi micorrizici AMF possono avere in agricoltura e, in particolare, quando si è costretti a coltivare in condizioni in cui è possibile che si manifestino stress ambientali, è bene prendere in esame dei test sperimentali effettuati realmente in campo. Un esempio è quello (Bona et al. 2018), in cui sono state trapiantate e coltivate in pieno campo in condizioni di ridotta fertilizzazione piante di pomodoro inoculate sia con PGPR che con AMF, per valutare l'impatto dei microrganismi sulla resa e sul valore nutrizionale delle bacche. Le dimensioni e la concentrazione di zucchero nei frutti di pomodoro sono state influenzate positivamente dagli inoculi e, in più, sono stati registrati incrementi anche nella concentrazione di β -carotene e acido malico rispetto ai controlli.

I risultati di tale studio mostrano, quindi, che l'inoculazione con microrganismi del suolo può aiutare a ridurre drasticamente l'uso della fertilizzazione chimica, mantenendo e, in alcuni casi, addirittura migliorando la resa e la qualità dei frutti del pomodoro. Ciò può portare benefici economici, ambientali e per la salute umana in relazione alla maggiore sostenibilità. (Bona et al., 2018).

CONCLUSIONI

In conclusione, il lavoro di tesi ha messo in evidenza come il regime nutrizionale della coltura, nel caso specifico del pomodoro, debba essere rigorosamente orientato verso la sua fisiologia. Questo approccio è indispensabile per rispondere in modo specifico e preciso a ogni necessità che si presenta durante i differenti stadi di sviluppo fisiologico. Inoltre, riguardo la fertilizzazione, emerge l'importanza di considerare tutti gli elementi nutritivi necessari alla coltura su un piano paritario in termini di rilevanza; infatti, è solo attraverso la meticolosa cura di ogni dettaglio che è possibile perseguire la coltivazione, anche in condizioni ambientali rese più ostiche dai cambiamenti climatici sempre più impattanti. Questo lavoro, inoltre, mette in luce che l'attenta valutazione e l'adeguata gestione delle risorse idriche, abbinata alla corretta applicazione di fertilizzanti e biostimolanti, rappresentano ulteriori pilastri su cui fondare una pratica agronomica moderna e sostenibile per la coltivazione del pomodoro. Complessivamente, dunque, alla fine di questo studio si può constatare che l'adozione di un approccio scientifico basato sull'applicazione dei principi strettamente connessi alle reali esigenze fisiologiche del pomodoro costituisce l'elemento fondamentale per ottenere livelli produttivi che soddisfino le richieste del mercato, le esigenze dei consumatori e garantiscano la sostenibilità economica nelle operazioni gestionali dell'agricoltore.

BIBLIOGRAFIA

- Bauchet, G., & Causse, M. (2012). Genetic Diversity in Tomato (*Solanum lycopersicum*) and Its Wild Relatives. *Genetic Resources and Crop Evolution*.
- Bergougnoux, V. (2013). The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotechnology Advances*.
- Bona, E., Todeschini, V., Cantamessa, S., Cesaro, P., Copetta, A., Lingua, G., Gamalero, E., Berta, G., & Massa, N. (2018). Combined bacterial and mycorrhizal inocula improve tomato quality at reduced fertilization. *Scientia Horticulturae*, 234, 160–165.
- Cornali, S. (2020). Pomodoro da industria: fertilizzare per il reddito. *L'Informatore Agrario*, 15.
- Cristofano, F., El-Nakhel, C., & Rouphael, Y. (2021). Biostimulant Substances for Sustainable Agriculture: Origin, Operating Mechanisms and Effects on Cucurbits, Leafy Greens, and Nightshade Vegetables Species. *Biomolecules*, 11(1103).
- Drobek, M., Frac, M., & Cybulska, J. (2019). Plant Biostimulants: Importance of the Quality and Yield of Horticultural Crops and the Improvement of Plant Tolerance to Abiotic Stress—A Review. *Agronomy*, 9(6), 335.
- Hocking, B., Tyerman, S. D., Burton, R. A., & Gilliam, M. (2016). Fruit Calcium: Transport and Physiology. *Frontiers in Plant Science*.
- Kumari, M., Banerjee, S., Verma, P., Sukumaran, S., Chandran, S., Gopinath, P., Venkatesh, K., Yadav, S., Singh, S., & Awasthi, M. K. (2022). Plant nutrition: an effective way to alleviate abiotic stress in agricultural crops. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15).
- Leventis, G., Tsiknia, M., Feka, M., Ladikou, E., Papadakis, E., Chatzipavlidis, I., Papadopoulou, K. K., & Ehaliotis, C. (2021). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance growth of tomato under normal and drought conditions, via different water regulation mechanisms. *Rhizosphere*.
- Ma, Y., Freitas, H., & Dias, M. C. (2022). Strategies and prospects for biostimulants to alleviate abiotic stress in plants. *Frontiers in Plant Science*.
- Mikkelsen, R. L. (2005). Tomato Flavor and Plant Nutrition: A Brief Review. *Better Crops with Plant Food*.
- Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. *Applied and Environmental Soil Science*.
- Olanrewaju, O. S., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Mechanisms of action of plant growth promoting bacteria. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*.

- Osman, A., Hussein, M., Ali, M., Mohamed, S., Kabir, M., & Halder, G. (2019). Effect Of Boron and Zinc On The Growth, Yield And Yield Contributing Traits Of Tomato. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*, 12(2), 25-37.
- Paradossi, P., Prosdocimi, M., Gianquinto, G., Santamaria, P., & Incrocci, L. (2018). Orticoltura, principi e pratica (capitolo solanacee). *Edagricole-New Business Media*.
- Parvin, K., Nahar, K., Hasanuzzaman, M., Bhuyan, M. H. M. B., & Fujita, M. (2019). Calcium-Mediated Growth Regulation and Abiotic Stress Tolerance in Plants. *Plants*.
- Rinaldi, M., & Rana, G. (2004). I fabbisogni idrici del pomodoro da industria in Capitanata. *Annali dell'Istituto Sperimentale per l'Orticoltura*.
- Sainju, U. M., Dris, R., & Singh, B. (2003). Mineral nutrition of tomato. *Food, Agriculture & Environment*, 1(2), 176-183.
- Sansavini, S., & Ranalli, P. (2012). Manuale di ortofrutticoltura. Innovazioni tecnologiche e prospettive di mercato. *Edagricole-New Business Media*.
- Soressi, G. P., & Mazzucato, A. (2022). Coltura e cultura, Pomodoro, Caratteristiche botaniche. *Edagricole-New Business Media*.
- Stikic, R., Jovanovic, Z., Vucelic-Radovic, B., Marjanovic, M., & Savic, D. (2015). Tomato: A model species for fruit growth and development studies. *Journal of Horticultural Research*, 23(1), 25-42.
- Sukul, P., Kumar, R., Abdillahi, S., & Rakesh, K. (2021). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria for Sustainable Agricultural Production. *Frontiers in Microbiology*.
- Tei, F. (2016). Pomodoro da industria – modelli, Università degli Studi di Perugia Dipartimento Scienze Agrarie, Alimentari e Ambientali. *Università degli Studi di Perugia*.
- Tonhati, T. M., Mello, S. C., Momesso, L., & Pedroso, M. P. (2020). L-proline alleviates heat stress of tomato plants grown under protected environment. *Scientia Horticulturae*, 268, 109370.
- Waraich, E. A., Ahmad, R., Halim, A., & Aziz, T. (2012). Alleviation of temperature stress by nutrient management in crop plants: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2), 221-244.
- Xu, L., Wang, Y., Yuan, M., Chen, L., & Hu, Z. (2021). Effects of Application Methods of Boron on Tomato Growth, Fruit Quality and Flavor. *Horticulturae*, 7(8), 223.

RINGRAZIAMENTI

Arrivati al termine di un percorso, ci si può finalmente guardare indietro per vedere la strada che è stata fatta e quindi, riguardo la mia esperienza universitaria, ciò che di nuovo effettivamente si è appreso e quelle che sono state le persone che ci hanno affiancato nel tragitto. Di persone che mi sono state accanto in questi ultimi tre anni della mia vita fortunatamente ne ho avute tante, però, ci sono alcune che più di tutte hanno reso possibile il raggiungimento di questo mio traguardo.

Queste persone sono i miei genitori, Fausto e Daniela, sempre dalla mia parte, mi hanno sostenuto quotidianamente senza mai avermi fatto mancare nulla e senza dei quali non avrei mai potuto essere qui, le parole d'amore che potrei spendere nei vostri confronti non potranno mai essere sufficienti, siete l'esempio che un domani vorrei poter essere in grado di dare anche io ai miei figli; mio fratello Alessandro, la mia guida nei momenti più bui, il mio faro, il mio consolatore, il mio complice, la persona che più di tutte ha saputo aiutarmi nei momenti in cui credevo di non farcela, a te in assoluto va il mio grazie più grande; mia sorellina Giulia, che con la sua spensieratezza mi ha sempre ricordato di affrontare le cose con entusiasmo, così che anche le situazioni difficili sembrano in realtà solo poste in un modo diverso rispetto a come ce le aspettavamo. È alla mia famiglia che dedico questo mio traguardo, ogni giorno mi avete fatto capire che il nostro è un legame che c'è sempre e comunque, indipendentemente dal luogo fisico in cui ci si trova. La mia speranza è di avervi potuto regalare una gioia e di aver potuto ripagare anche solo un minimo tutti i sacrifici che avete fatto per me e per i quali ve ne sarò per sempre grato.

Altri componenti della mia famiglia a cui devo necessariamente dire grazie sono i miei nonni paterni, Cataldo e Carmela, e i miei nonni materni, Michele e Antonietta, con la vostra semplicità e il vostro amore mi avete costantemente sostenuto e incoraggiato in questi anni, anche in questo caso spero che questo mio traguardo vi possa regalare una gioia e rendervi orgogliosi di me.

A questo punto è arrivato il momento di ringraziare i miei amici di sempre, i miei fratelli di scelta, Luigi, Donato, Lorenzo, Federico, Vincenzo, Marco e Francesco, con le vostre continue videochiamate siete sempre riusciti a strapparmi un sorriso che mi hanno riportato alla mente i nostri indimenticabili momenti passati assieme e mi hanno ricordato che, nonostante la lontananza, ormai quello tra di noi è un legame indissolubile.

I miei più sinceri ringraziamenti vanno anche ai miei nuovi amici conosciuti qui a Padova: i miei compagni di corso, gli amici conosciuti nella residenza in cui ho alloggiato in questi tre anni e gli altri che ho conosciuto in altre circostanze, uno su tutti Stefano, siete stati in grado di farmi sentire costantemente a casa, nonostante casa mia fosse distante centinaia di chilometri. Anche per voi posso solo dire grazie, ma un grazie davvero sincero e che viene dal profondo del mio cuore, per avermi

sostenuto, incoraggiato e soprattutto per avermi fatto divertire e vivere tante esperienze di vita indimenticabili, una parte del mio cuore rimarrà per sempre qui a Padova con voi.

Infine, ringrazio anche il mio relatore prof. Piergiorgio Stevanato per la disponibilità e per la professionalità con cui mi ha seguito nell'elaborazione di questa mia tesi.