

L'equilibrio nutrizionale del pomodoro: strategie tecniche per una fertirrigazione efficiente e sostenibile

written by Rivista di Agraria.org | 18 giugno 2026

di Nicolò Passeri



Pomodoro san Marzano

Nutrire senza eccedere: il principio dell'equilibrio

L'equilibrio della fertilizzazione nel pomodoro rappresenta una condizione di bilancio dinamico tra disponibilità dei nutrienti, capacità di assorbimento della pianta e condizioni ambientali che regolano la velocità dei processi fisiologici. Il concetto di equilibrio non coincide con la somministrazione uniforme dei fertilizzanti, ma con l'adattamento continuo della concentrazione ionica nella rizosfera rispetto alle esigenze metaboliche del momento fenologico e ai parametri fisico-chimici del sistema suolo-acqua-pianta.

L'assorbimento dei nutrienti da parte del pomodoro avviene principalmente per via ionica attraverso meccanismi di diffusione, flusso di massa e scambio attivo a livello dell'apice radicale. La velocità di assorbimento dipende dalla concentrazione degli ioni nella soluzione circolante, dall'attività enzimatica della radice e dalla temperatura del suolo. Quando l'apporto fertilizzante supera la capacità di assimilazione della pianta o la capacità tampone del substrato, si instaura un eccesso ionico che altera l'equilibrio osmotico e può compromettere la crescita, la qualità del frutto e la sostenibilità del sistema colturale.

Nel caso del pomodoro, specie a elevata richiesta di nutrienti ma sensibile agli squilibri salini, l'equilibrio della fertilizzazione è particolarmente critico. Il pomodoro manifesta un fabbisogno progressivamente crescente in azoto, fosforo e potassio, ma la proporzione tra questi elementi deve variare nel tempo in funzione dello sviluppo vegetativo, della fase riproduttiva e del grado di maturazione dei frutti. Un eccesso di azoto, ad esempio, determina uno sviluppo vegetativo eccessivo, ritardando la fruttificazione e aumentando la suscettibilità alle fisiopatie, mentre una carenza di potassio riduce la qualità commerciale del frutto e la resistenza agli stress idrici.

L'equilibrio nutrizionale si basa quindi sulla conoscenza dei fabbisogni specifici della coltura e sulla capacità di mantenere la soluzione nutritiva entro intervalli di concentrazione ottimali. In sistemi di coltivazione a suolo, la capacità di scambio cationico (CSC) e la mineralizzazione della sostanza organica costituiscono riserve tampone che regolano la disponibilità dei nutrienti nel tempo. In sistemi fuori suolo o con fertirrigazione a ciclo chiuso, invece, il controllo avviene mediante il monitoraggio continuo della conducibilità elettrica (EC) e del pH della

soluzione nutritiva, con correzioni immediate della composizione ionica.

L'equilibrio non riguarda solo il rapporto quantitativo tra elementi, ma anche la loro forma chimica e la loro interazione nel complesso del suolo o del substrato. Gli ioni nitrato (NO_3^-) e ammonio (NH_4^+), ad esempio, influenzano diversamente il pH rizosferico e la disponibilità di altri cationi come Ca^{2+} e Mg^{2+} . Analogamente, la competizione tra potassio, calcio e magnesio sugli stessi siti di assorbimento radicale può generare carenze secondarie anche in presenza di adeguate concentrazioni totali. La gestione dell'equilibrio richiede dunque un approccio di tipo integrato, che consideri la chimica della soluzione nutritiva, le condizioni fisiche del mezzo di coltura e la fisiologia di assorbimento della pianta.

Un ulteriore elemento determinante è l'interazione tra fertilizzazione e ambiente. Temperatura, radiazione solare e umidità relativa modificano la traspirazione e la velocità del flusso di massa verso le radici, condizionando il trasporto degli ioni. In condizioni di elevata radiazione e bassa umidità, l'assorbimento di calcio può diventare limitante nonostante la sua presenza nella soluzione nutritiva, a causa della ridotta mobilità verso i frutti. Analogamente, in condizioni di bassa temperatura, l'attività radicale e la diffusione dei nutrienti rallentano, richiedendo un adeguamento del regime di fertirrigazione.

Il principio dell'equilibrio nella fertilizzazione del pomodoro è quindi un processo di regolazione continua che coinvolge simultaneamente fattori chimici, fisici e fisiologici. L'obiettivo non è massimizzare la quantità di nutrienti forniti, ma ottimizzare la loro efficienza d'uso, mantenendo costante la relazione tra disponibilità e richiesta. In termini pratici, ciò si traduce in una gestione dinamica della concentrazione ionica della soluzione nutritiva, con l'obiettivo di evitare oscillazioni brusche che possano indurre stress osmotici, squilibri nutrizionali o riduzioni qualitative della produzione.

L'equilibrio della fertilizzazione rappresenta quindi la condizione in cui la pianta dispone costantemente dei nutrienti necessari al proprio metabolismo, senza accumuli né deficit, garantendo una crescita armonica, una resa elevata e una qualità del frutto coerente con gli standard di mercato e con i principi di sostenibilità ambientale.

Conoscere prima di intervenire: diagnosi e controllo nutrizionale

La gestione dell'equilibrio nutrizionale nel pomodoro si fonda su una conoscenza precisa delle condizioni del sistema suolo-pianta-acqua e sulla capacità di adattare la fertirrigazione in funzione dei dati analitici. Ogni intervento deve derivare da una diagnosi oggettiva e non da schemi di somministrazione fissi, poiché le variabili ambientali e fisiologiche modificano continuamente le esigenze della pianta.

L'analisi del suolo costituisce il punto di partenza per la definizione di un piano di concimazione. La determinazione del pH, della conducibilità elettrica (EC) e della capacità di scambio cationico (CSC) consente di valutare la disponibilità effettiva dei nutrienti e il comportamento chimico del terreno. Nei suoli sabbiosi, caratterizzati da CSC bassa, il rischio di lisciviazione è elevato e la somministrazione dei nutrienti deve avvenire con fertirrigazioni frequenti e a basse concentrazioni. Nei terreni argillosi, al contrario, l'elevata CSC trattiene più a lungo i cationi, riducendo le perdite ma anche la prontezza di risposta della coltura (Ayers & Westcot, 1987; Chapman & Pratt, 1961).

Il pH del suolo influenza direttamente la disponibilità dei nutrienti: valori inferiori a 6,0 aumentano la solubilità di ferro e manganese, con possibili fenomeni di tossicità, mentre valori superiori a 7,5 limitano la disponibilità di fosforo, ferro e zinco. Il controllo del pH dell'acqua d'irrigazione è altrettanto importante, poiché la presenza di bicarbonati e carbonati può causare incrostazioni e ridurre la solubilità dei fertilizzanti, specialmente di quelli contenenti calcio e fosfato (Ben-Gal et al., 2008). Acque con EC superiori a 1,2 dS/m devono essere gestite con attenzione per evitare fenomeni di accumulo salino nel profilo radicale (Maas & Hoffman, 1977).

Durante il ciclo colturale, il monitoraggio continuo di EC e pH nella soluzione nutritiva e nel drenaggio fornisce indicazioni essenziali per mantenere l'equilibrio ionico. La differenza tra EC in ingresso e nel drenaggio (ΔEC) riflette la capacità della pianta di assorbire i nutrienti somministrati: valori elevati di ΔEC segnalano un accumulo di sali non assorbiti, con necessità di aumentare la lisciviazione o correggere la concentrazione della soluzione nutritiva (Sonneveld, 2000; Schwarz & Kuchenbuch, 1998). Il pH del drenaggio, invece, indica la prevalenza di processi acidificanti o alcalinizzanti nella rizosfera, spesso legati alla forma di azoto impiegata (Hagin et al., 1990). L'analisi della pianta integra le informazioni provenienti dal terreno o dalla soluzione nutritiva. Le analisi fogliari e di linfa consentono di valutare la disponibilità effettiva dei nutrienti assorbiti e la loro distribuzione all'interno dei tessuti. La foglia di riferimento per il pomodoro è generalmente la terza o quarta dal basso del palco in fioritura,

prelevata a metà mattina, momento in cui la concentrazione minerale è più stabile. Le analisi di linfa permettono una diagnosi quasi immediata, utile per correggere la fertirrigazione in tempo reale (Giuffrida & Leonardi, 2012; Bodale et al., 2021).

L'uso di sensori e sistemi di monitoraggio automatizzati consente oggi una gestione di precisione. I sensori di EC e umidità nel substrato forniscono dati in continuo, integrabili con algoritmi che modulano la frequenza delle irrigazioni e la concentrazione nutritiva in base all'evapotraspirazione e alla fase di crescita della pianta (De Kreij, 1995; Incrocci et al., 2017). Questo approccio consente di stabilizzare la concentrazione ionica nella zona radicale, riducendo le oscillazioni osmotiche e migliorando l'efficienza d'uso dei nutrienti.

L'interpretazione dei dati deve essere sempre multidimensionale. Un aumento di EC accompagnato da crescita vegetativa eccessiva può indicare squilibri nell'assorbimento, mentre una diminuzione improvvisa può riflettere un calo di concentrazione nella soluzione o un incremento della domanda fisiologica. L'osservazione diretta della pianta, unita ai dati analitici, rimane lo strumento diagnostico più affidabile (Adams & Ho, 1992; Le Bot et al., 1998).

La gestione correttiva si basa sulla modulazione della frequenza e della concentrazione della fertirrigazione. Aumentare la frequenza delle somministrazioni, mantenendo costante la quantità totale di nutrienti giornaliera, permette di stabilizzare l'EC e ridurre lo stress osmotico (Badr & El-Yazied, 2007; Shedeed et al., 2009). Nei suoli tradizionali, la combinazione di concimi minerali con matrici organiche o biostimolanti migliora la disponibilità progressiva e riduce la perdita di nutrienti (Islam et al., 2017).

L'insieme di queste pratiche costituisce la base della fertirrigazione di precisione: un sistema dinamico di controllo che adatta la nutrizione minerale alle reali condizioni fisiologiche della coltura e alle variazioni ambientali, garantendo costanza di crescita, efficienza d'uso dei nutrienti e stabilità qualitativa della produzione (De Kreij, 1995; Incrocci et al., 2017).

Le fasi del ciclo e le diverse esigenze del pomodoro

Il fabbisogno nutrizionale del pomodoro varia in modo significativo lungo il ciclo colturale, in relazione allo sviluppo vegetativo, alla fruttificazione e alla maturazione. Ogni fase presenta priorità diverse nell'assorbimento e nell'utilizzo dei nutrienti, e la gestione della fertilizzazione deve adattarsi dinamicamente alle condizioni fisiologiche della pianta e ambientali (Adams, 1986; Benton, 2012).

Nella **fase vegetativa**, che va dal trapianto fino alla comparsa dei primi bocci fiorali, la pianta richiede un apporto regolare ma bilanciato di azoto, indispensabile per la sintesi proteica e lo sviluppo dei tessuti fogliari e radicali. Tuttavia, un eccesso di azoto, specialmente in forma ammoniacale, può provocare un aumento sproporzionato della parte aerea a scapito delle radici e della futura allegagione (Fontes & Ronchi, 2002). È quindi preferibile fornire l'azoto principalmente in forma nitrica, che mantiene il pH stabile nella rizosfera e favorisce un assorbimento più lineare. Il fosforo, poco mobile nel suolo ma essenziale per lo sviluppo radicale e la formazione dei meristemi, deve essere presente fin dalle prime fasi in forma facilmente assimilabile (Hagin et al., 1990). Il potassio, pur avendo un ruolo secondario in questa fase, contribuisce all'equilibrio osmotico e alla regolazione stomatica, elementi cruciali per la crescita armoniosa dei tessuti giovani (Ho et al., 1987).

Durante la **fioritura e l'allegagione**, il pomodoro passa da una fase vegetativa a una riproduttiva, e il bilancio nutrizionale deve riflettere questo cambiamento. L'apporto di azoto va progressivamente ridotto per evitare l'accumulo di vegetazione e favorire la differenziazione fiorale (Adams & Ho, 1992). In questa fase aumenta la richiesta di potassio, che migliora la vitalità del polline e la qualità della fecondazione, e di calcio, che stabilizza le pareti cellulari dei frutticini appena allegati (de Kreij et al., 1992). Il fosforo continua a essere essenziale per i processi energetici e per la crescita degli organi riproduttivi. Un rapporto N:K di circa 1:1,2 si è dimostrato efficace per favorire un equilibrio ottimale tra allegagione e crescita vegetativa (Adams, 1991).

Nella **fase di accrescimento dei frutti**, che rappresenta il periodo di maggiore attività metabolica, il fabbisogno nutritivo complessivo raggiunge il suo picco. Il potassio diventa l'elemento predominante: regola la traslocazione degli zuccheri, il turgore cellulare e la sintesi dei pigmenti, influenzando direttamente sul calibro e sulla consistenza del frutto (Dorais et al., 2001; Fanasca et al., 2007). Il calcio deve essere fornito in modo continuo, poiché la sua mobilità xilematica è limitata e il deficit anche temporaneo può causare fisiopatie come il marciume apicale (Adams & Ho, 1992; Ehret & Ho, 1986). Il magnesio, necessario alla sintesi clorofilliana, sostiene la fotosintesi e

migliora la conversione dei carboidrati (Ho & Adams, 1995). Una concentrazione costante di magnesio nella soluzione nutritiva evita carenze secondarie dovute a squilibri con il potassio (Giuffrida & Leonardi, 2012).

Durante la **maturazione**, il pomodoro riduce sensibilmente la richiesta di azoto, mentre aumenta quella di potassio, che regola la sintesi dei carotenoidi e dei composti aromatici (De Pascale et al., 2001; Peet et al., 2004). In questa fase la gestione della salinità attraverso la conducibilità elettrica (EC) assume un valore strategico: una EC leggermente superiore (2,8–3,0 dS/m) può incrementare il contenuto di solidi solubili e la qualità sensoriale del frutto, purché la disponibilità idrica resti costante e non induca stress osmotico (Adams & Ho, 1989; Magán et al., 2005).

Le condizioni climatiche influenzano direttamente la disponibilità e l'assorbimento dei nutrienti. Temperature basse riducono l'assimilazione di fosforo e calcio, mentre l'elevata umidità ambientale limita la traspirazione e il flusso xilematico del calcio verso i frutti (Cuartero & Muñoz, 1999). Al contrario, condizioni calde e secche aumentano la richiesta di potassio per regolare l'equilibrio idrico e osmotico. Il controllo microclimatico, soprattutto in ambiente protetto, consente di stabilizzare queste relazioni, riducendo il rischio di squilibri ionici.

La contemporanea presenza, nella pianta, di frutti in crescita e di nuovi fiori impone una gestione di compromesso della fertirrigazione. In questi casi, la soluzione nutritiva deve mantenere un equilibrio intermedio tra azoto e potassio, per sostenere allo stesso tempo la crescita vegetativa residua e l'accumulo di solidi nei frutti (Schwarz et al., 2002). Il rapporto N/K è un indicatore chiave: valori superiori a 1,2 favoriscono la crescita vegetativa, mentre rapporti inferiori a 1 promuovono la maturazione e la qualità dei frutti (Ho & Adams, 1995).

Le curve di assorbimento, elaborate in diverse sperimentazioni (Pineda-Pineda et al., 2011; Petropoulos et al., 2020), mostrano che il pomodoro assorbe circa il 60–65% dell'azoto e del potassio totali nelle prime otto settimane dopo il trapianto, mentre fosforo, calcio e magnesio vengono assorbiti più lentamente ma in modo costante fino alla maturazione. Questo andamento giustifica una gestione progressiva della fertirrigazione, con dosi basse ma frequenti nella fase iniziale, seguite da un incremento graduale della concentrazione man mano che aumenta la superficie fogliare attiva.

In sintesi, la nutrizione del pomodoro deve seguire un approccio dinamico e adattivo, in cui la composizione della soluzione nutritiva evolve in parallelo con la fisiologia della pianta. La gestione ottimale non dipende solo dalle quantità assolute di nutrienti, ma dalla loro proporzione e dal tempismo di applicazione, in relazione allo sviluppo fenologico e alle condizioni ambientali. Questa logica di equilibrio nutrizionale permette di massimizzare la resa, mantenere elevata la qualità e ridurre gli sprechi di fertilizzanti, in linea con i principi di una fertirrigazione efficiente e sostenibile (Incrocci et al., 2017; Pardossi et al., 2018).

Nutrienti e forme chimiche: non tutti gli elementi sono uguali

L'efficienza nutrizionale del pomodoro non dipende soltanto dalla quantità di elementi forniti, ma anche dalla **forma chimica** con cui essi vengono somministrati. Ogni elemento si presenta in diverse specie ioniche, con caratteristiche specifiche di solubilità, mobilità e interazione nella rizosfera. La corretta scelta delle forme nutritive consente di mantenere l'equilibrio ionico, evitare fenomeni di antagonismo e migliorare la disponibilità effettiva dei nutrienti per la pianta (Adams, 1986; Hagin et al., 1990).

L'**azoto** rappresenta l'elemento più dinamico e condizionante. È assorbito principalmente sotto forma di nitrato (NO_3^-) e ammonio (NH_4^+), con funzioni fisiologiche differenti. Il nitrato favorisce una crescita equilibrata e stimola l'attività fotosintetica senza alterare il pH della rizosfera. L'ammonio, invece, tende ad acidificare il mezzo e a competere con cationi bivalenti come calcio e magnesio, riducendone la disponibilità (Benton, 2012). Una combinazione equilibrata delle due forme, con prevalenza del nitrato (70–80%), è ideale per colture intensive e per mantenere stabile la conduttività elettrica (Hagin et al., 1990).

Il **fosforo**, pur richiesto in quantità inferiori, è cruciale per l'accumulo energetico e la divisione cellulare. La sua disponibilità è strettamente legata al pH del suolo o della soluzione nutritiva: le forme più assimilabili, diidrogeno fosfato (H_2PO_4^-) e idrogeno fosfato (HPO_4^{2-}), predominano tra pH 5,5 e 6,5 (Chapman & Pratt, 1961). A valori più elevati, il fosforo tende a precipitare con calcio e magnesio, formando composti insolubili (Adams & Ho, 1992). L'impiego di acido fosforico o di sali come KH_2PO_4 consente di mantenere una solubilità ottimale e, al contempo, di contribuire alla regolazione del pH della soluzione nutritiva.

Il **potassio** è l'elemento quantitativamente più importante nella fase di fruttificazione. Regola il potenziale

osmotico, la traslocazione degli zuccheri e la qualità del frutto (Ho & Adams, 1995; Dorais et al., 2001). Le fonti più impiegate in fertirrigazione sono il nitrato di potassio (KNO_3) e il solfato di potassio (K_2SO_4). Il primo fornisce anche azoto nitrico e si adatta bene a sistemi intensivi, mentre il secondo è preferibile in condizioni di elevata salinità o in terreni alcalini. Il cloruro di potassio (KCl), pur economico, è da evitare nelle coltivazioni di qualità, poiché il cloro può interferire con l'assorbimento del calcio e ridurre la conservabilità dei frutti (Sonneveld, 2000).

Il **calcio** e il **magnesio** svolgono ruoli complementari nella fisiologia del pomodoro. Il calcio è fondamentale per la coesione delle pareti cellulari e per la prevenzione delle fisiopatie, ma la sua mobilità all'interno della pianta è limitata (Ehret & Ho, 1986). La carenza, anche temporanea, porta rapidamente al marciume apicale. Per questo, il calcio deve essere fornito in modo continuo, preferibilmente sotto forma di nitrato di calcio, evitando miscele con solfati e fosfati nelle soluzioni concentrate. Il magnesio, componente essenziale della clorofilla, è mobile e partecipa al metabolismo energetico; la sua carenza si manifesta con clorosi internervali sulle foglie basali (Giuffrida & Leonardi, 2012).

I **microelementi** (Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo) sono richiesti in quantità minime ma sono indispensabili per l'attività enzimatica e la qualità del frutto. La disponibilità del ferro è fortemente influenzata dal pH: sopra 6,5 tende a precipitare, rendendosi indisponibile. L'impiego di chelati sintetici (Fe-EDDHA, Fe-DTPA) consente di mantenerlo in forma solubile anche in condizioni alcaline (Voogt & Sonneveld, 1997). Il boro, invece, è mobile e soggetto a lisciviazione, ma la sua concentrazione deve essere attentamente controllata per evitare fitotossicità.

La **qualità dell'acqua d'irrigazione** condiziona la compatibilità dei fertilizzanti e la stabilità delle soluzioni. Elevate concentrazioni di bicarbonati e carbonati aumentano il pH e provocano la precipitazione di sali di calcio e magnesio (Ben-Gal et al., 2008). La correzione con acido nitrico o fosforico, mantenendo il pH tra 5,5 e 6,0, consente di migliorare la solubilità dei nutrienti e la loro efficienza.

La forma chimica dei nutrienti, dunque, non è un dettaglio secondario: rappresenta un fattore decisivo per l'equilibrio nutrizionale del pomodoro. La scelta corretta delle fonti, la compatibilità tra ioni e il controllo di pH ed EC costituiscono la base di una nutrizione stabile, efficiente e qualitativamente orientata.

Gli equilibri invisibili: rapporti e antagonismi tra elementi

Nel sistema nutrizionale del pomodoro, la qualità dell'assorbimento non è determinata solo dalle quantità assolute, ma dai **rapporti tra i diversi elementi** e dalle interazioni che ne regolano la disponibilità. Gli ioni minerali si muovono e competono all'interno della rizosfera e dei tessuti vegetali secondo principi di bilancio elettrochimico e selettività di trasporto (Le Bot et al., 1998).

Il primo equilibrio da considerare è quello tra i macronutrienti primari. Durante la fase vegetativa, un rapporto **N:P:K di circa 2:1:1** favorisce la crescita della biomassa e l'espansione radicale. Nelle fasi successive, l'aumento del potassio diventa essenziale per il trasferimento degli zuccheri e la qualità dei frutti, portando il rapporto ottimale verso **1:0,8:1,5** (Adams, 1989). Un eccesso di azoto, soprattutto in prossimità della maturazione, ritarda la colorazione, riduce il contenuto zuccherino e indebolisce i tessuti (Dorais et al., 2001).

Tra i cationi bivalenti, il bilancio **K:Ca:Mg** è particolarmente delicato. Questi elementi competono per i medesimi siti di assorbimento radicale. L'equilibrio ideale è approssimativamente **4:2:1**, da modulare secondo la fase fenologica (Adams & Ho, 1992). Quando il potassio prevale eccessivamente, il calcio viene inibito, con conseguente rischio di marciume apicale. All'opposto, una predominanza di calcio riduce la disponibilità di potassio e può provocare maturazioni irregolari. Il magnesio, pur meno competitivo, può essere facilmente carente se il rapporto K/Mg supera 10:1 (Giuffrida & Leonardi, 2012).

Gli **antagonismi anionici** influenzano anch'essi l'equilibrio. Il nitrato (NO_3^-) e il cloruro (Cl^-) competono per l'assorbimento, e una concentrazione eccessiva di cloro riduce la disponibilità di azoto (Sonneveld & Van der Burg, 1991). Questo effetto si amplifica in condizioni di salinità elevata o con acque irrigue ricche di sodio e cloruri (Maas & Hoffman, 1977). Anche il solfato può interagire con il fosfato, specialmente a pH alcalino, riducendone la solubilità.

Il **ferro** rappresenta un caso emblematico di interazione multipla. In ambienti ad alto pH o in presenza di eccesso di fosforo, la sua disponibilità diminuisce rapidamente (Cuartero & Muñoz, 1999). Inoltre, Fe, Mn e Zn competono per gli stessi trasportatori radicali: un eccesso di uno può indurre la carenza degli altri (Voogt & Sonneveld, 1997). Per questo motivo, l'uso di microelementi chelati e una corretta gestione del pH sono indispensabili per mantenere

la stabilità nutrizionale.

L'equilibrio ionico è influenzato anche dalle **forme di azoto** impiegate. L'ammonio acidifica la rizosfera, favorendo l'assorbimento di Mn e Fe, mentre il nitrato la alcalinizza, riducendo la disponibilità di P e microelementi (Hagin et al., 1990). Il controllo del pH tra 5,5 e 6,5 garantisce il bilancio ottimale tra questi processi.

In definitiva, la nutrizione equilibrata del pomodoro richiede la gestione simultanea di più rapporti: N:K per la crescita e la qualità, K:Ca:Mg per la stabilità strutturale, e Fe:Mn:Zn per l'efficienza enzimatica. L'osservazione delle piante e il monitoraggio costante di EC e pH permettono di prevenire squilibri e mantenere costante la produttività.

Salinità e conducibilità elettrica: quando il sale diventa uno strumento

La **salinità** della soluzione nutritiva, espressa tramite la conducibilità elettrica (EC), rappresenta un parametro cruciale nel controllo dell'equilibrio nutrizionale del pomodoro. Essa non indica solo la concentrazione totale di sali disciolti, ma riflette la pressione osmotica esercitata sulla radice e la disponibilità effettiva di acqua e nutrienti (Boyer, 1982; Sonneveld, 2000).

Il pomodoro è una specie moderatamente tollerante alla salinità: può mantenere buone rese fino a EC di 2,5–3,0 dS/m, a seconda della varietà e delle condizioni ambientali (Maas & Hoffman, 1977). Al di sopra di questi valori, la riduzione dell'assorbimento idrico e la competizione ionica compromettono la crescita. Tuttavia, una **gestione controllata della salinità** può essere vantaggiosa: livelli moderatamente elevati di EC migliorano la qualità del frutto, aumentando il contenuto di solidi solubili e di sostanze antiossidanti (De Pascale et al., 2001; Magán et al., 2005).

Dal punto di vista fisiologico, una moderata salinità induce nella pianta una **risposta osmotica adattiva**, con accumulo di zuccheri, prolina e ioni potassio, che aiutano a mantenere il bilancio idrico cellulare (Munns, 2002). Tale meccanismo, se controllato, incrementa la concentrazione dei soluti nel frutto, migliorandone la qualità. Tuttavia, se lo stress salino diventa eccessivo o improvviso, l'attività fotosintetica e la crescita radicale vengono compromesse (Al-Karaki, 2000).

Il controllo dell'EC nella fertirrigazione è quindi essenziale. Nelle soluzioni nutritive standard, l'EC in ingresso varia tra **2,0 e 2,5 dS/m**, mentre il drenaggio non dovrebbe superare di oltre **0,8–1,0 dS/m** il valore di alimentazione (Ben-Gal et al., 2008). Differenze superiori indicano un accumulo di sali nel substrato e richiedono un aumento temporaneo della frazione di lisciviazione (Sonneveld, 2000).

Non tutti gli ioni contribuiscono allo stesso modo alla salinità. I sali nutritivi, come nitrati e solfati, producono effetti prevalentemente osmoticamente neutri; al contrario, il **sodio (Na^+)** e il **cloruro (Cl^-)** sono tossici in concentrazioni elevate, poiché interferiscono con l'assorbimento di K^+ e Ca^{2+} e alterano la permeabilità delle membrane (Grattan & Grieve, 1999). L'uso di acque con contenuto sodico elevato impone quindi l'aggiunta di calcio e una gestione accurata del drenaggio per mantenere la stabilità ionica.

La **temperatura e l'umidità relativa** influenzano fortemente la risposta alla salinità. In ambienti caldi e secchi, la traspirazione elevata aumenta la concentrazione dei sali nella rizosfera, amplificando lo stress osmotico; in condizioni di umidità elevata, invece, la ridotta traspirazione limita l'assorbimento dei nutrienti, causando squilibri locali (Xu et al., 1997). Per questo motivo, la gestione dell'EC deve essere adattiva, calibrata sulle variazioni microclimatiche giornaliere e stagionali.

In colture idroponiche o a ciclo chiuso, il monitoraggio continuo dell'EC e del pH, integrato con sensori e sistemi automatizzati, consente di mantenere un equilibrio costante tra salinità e disponibilità idrica. In pieno campo, invece, il controllo avviene tramite analisi periodiche del suolo e dell'acqua di drenaggio, evitando oscillazioni improvvise che possano generare shock salini.

Una **salinità gestita in modo mirato** non è quindi un problema, ma uno strumento di calibrazione della qualità produttiva. Mantenere l'EC entro intervalli fisiologicamente compatibili con la varietà coltivata consente di ottimizzare il contenuto di zuccheri, la consistenza e la conservabilità del frutto, con un uso più efficiente dell'acqua e dei nutrienti. In questo senso, il controllo della conducibilità elettrica diventa parte integrante della strategia di equilibrio nutrizionale del pomodoro.

Tecniche di fertirrigazione per l'equilibrio nutrizionale

La fertirrigazione rappresenta oggi la tecnica più efficace per gestire in modo dinamico e preciso l'equilibrio nutrizionale del pomodoro, consentendo di modulare in tempo reale la concentrazione dei nutrienti in funzione delle condizioni fisiologiche della pianta e ambientali. L'integrazione tra irrigazione e nutrizione riduce le perdite per lisciviazione, migliora l'efficienza d'uso dei fertilizzanti e permette una risposta agronomica più uniforme rispetto alle concimazioni tradizionali (Haynes, 1985; Pardossi et al., 2018).

Il principio di base della fertirrigazione è mantenere costante il **flusso ionico verso la radice**, garantendo una soluzione nutritiva omogenea e ben aerata. La gestione dell'apporto avviene attraverso la regolazione della concentrazione (EC) e del volume delle soluzioni, con variazioni mirate in base alla fase fenologica e al clima. Nelle prime settimane dopo il trapianto, la concentrazione nutritiva deve essere moderata (EC 1,5–1,8 dS/m), per favorire la radicazione e ridurre lo stress osmotico; con l'avvio della fioritura, si incrementa progressivamente fino a 2,5–3,0 dS/m, adattando il rapporto tra azoto e potassio alle esigenze produttive (De Kreij, 1995; Incrocci et al., 2017).

L'efficienza della fertirrigazione dipende fortemente dalla **frequenza di somministrazione**. Studi sperimentali (Badr & El-Yazied, 2007; Shedeed et al., 2009) dimostrano che un'elevata frequenza, con volumi ridotti ma regolari, consente di mantenere stabile la concentrazione della soluzione nella rizosfera e di evitare oscillazioni di salinità. In colture in serra, la gestione a impulsi di breve durata (10–15 minuti) più volte al giorno garantisce un livello di umidità costante nel substrato, ottimizzando l'assorbimento e riducendo le perdite per drenaggio.

L'acqua di irrigazione rappresenta la base della soluzione nutritiva e ne determina la **compatibilità chimica**. La presenza di bicarbonati e carbonati di calcio e magnesio può elevare il pH e ridurre la solubilità di fosfati e microelementi. In questi casi, è necessario correggere l'acqua mediante acidificazione controllata, utilizzando acido nitrico o fosforico, fino a raggiungere un pH di circa 5,8–6,0 (Ayers & Westcot, 1987; Ben-Gal et al., 2008).

La preparazione delle soluzioni nutritive richiede particolare attenzione alla **compatibilità tra i fertilizzanti**. I sali contenenti calcio non devono mai essere miscelati direttamente con fosfati o solfati, per evitare precipitazioni insolubili ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaSO_4). Si utilizzano perciò **serbatoi separati**, di norma due:

- **Serbatoio A**, contenente nitrato di calcio e, in alcuni casi, microelementi non reattivi;
- **Serbatoio B**, con nitrato di potassio, fosfati, solfati e microelementi chelati.

I due flussi vengono poi miscelati in linea tramite un **sistema di iniezione proporzionale**, regolato da centraline automatizzate che controllano EC e pH in tempo reale (De Kreij, 1995).

La fertirrigazione deve tenere conto anche del **bilancio idrico** della coltura. Il fabbisogno giornaliero d'acqua varia in funzione della radiazione solare e della fase colturale: in serra, può oscillare tra 3 e 6 L/m²/die. Il volume di irrigazione deve garantire una **frazione di drenaggio** compresa tra 20 e 30%, sufficiente a prevenire l'accumulo di sali e a mantenere costante la composizione della soluzione nel substrato (Sonneveld, 2000).

Nei sistemi a **ricircolo chiuso**, la soluzione drenata viene filtrata, corretta e reimpressa nel circuito, riducendo le perdite di nutrienti e l'impatto ambientale (Voogt & Sonneveld, 1997). Tuttavia, è necessario monitorare costantemente l'EC del drenaggio, che non deve superare di oltre 1 dS/m il valore della soluzione di alimentazione. Nei sistemi **aperti**, invece, la fertirrigazione è gestita in modo più semplice ma con maggiore dispendio idrico, richiedendo un controllo accurato dei volumi per evitare eccessi.

Un aspetto cruciale per l'efficacia della fertirrigazione è la **sincronizzazione con le condizioni climatiche**. L'assorbimento radicale è fortemente influenzato dalla traspirazione e quindi dalla radiazione solare e dall'umidità relativa. Durante giornate calde e luminose, l'attività radicale aumenta e consente di mantenere EC più elevate; in condizioni di bassa radiazione o umidità alta, è invece necessario ridurre la concentrazione nutritiva per evitare accumuli salini (Xu et al., 1997; Chrétien et al., 2000). L'automazione del sistema mediante sensori climatici e bilanci idrici integrati permette di regolare in modo dinamico la frequenza e la durata delle fertirrigazioni.

La fertirrigazione è anche uno strumento di **gestione qualitativa**. Modificando la concentrazione ionica nelle ultime fasi di maturazione, è possibile migliorare il contenuto di solidi solubili, la pigmentazione e la consistenza del frutto. Un aumento controllato della salinità (EC fino a 3,0–3,5 dS/m) a partire dall'invaiaitura, se accompagnato da un'irrigazione costante, induce una moderata stress osmotico che favorisce l'accumulo di zuccheri e metaboliti secondari senza compromettere la resa (Fanasca et al., 2007; Lu et al., 2022).

Infine, il monitoraggio costante dello stato nutrizionale attraverso **analisi periodiche di soluzione e tessuti fogliari** consente di verificare la corrispondenza tra l'apporto e l'assorbimento effettivo. La misurazione della conducibilità e del pH nel drenaggio, insieme all'analisi della linfa o dei piccioli, permette di identificare tempestivamente squilibri e di correggere la composizione della soluzione in modo mirato (Bodale et al., 2021). La fertirrigazione, attraverso la regolazione simultanea di acqua, salinità e nutrienti, consente di trasformare la nutrizione del pomodoro in un sistema dinamico e autoregolato, capace di adattarsi alle variazioni fisiologiche della pianta e alle condizioni ambientali, con risultati misurabili in termini di resa, efficienza e qualità.

Prevenire gli squilibri: fisiopatie e sintomi da riconoscere

Il mantenimento dell'equilibrio nutrizionale nel pomodoro richiede una costante capacità di osservazione e diagnosi. Le fisiopatie, ossia le alterazioni morfologiche e funzionali non causate da agenti patogeni, rappresentano i segnali più immediati di squilibrio nella nutrizione minerale o nella gestione idrica. La loro comparsa è spesso il risultato di interazioni multiple tra fattori nutrizionali, climatici e fisiologici, e la tempestività nell'individuazione consente di evitare danni irreversibili alla produzione (Adams & Ho, 1992; Dorais et al., 2001).

Tra le fisiopatie più diffuse spicca il **marciume apicale del frutto**, causato da un insufficiente apporto di calcio nei tessuti in accrescimento. Il sintomo si manifesta come una macchia scura e depressa nella zona distale del frutto, che tende a necrotizzare progressivamente. Il calcio, pur essendo presente nella soluzione nutritiva, può risultare indisponibile per il frutto a causa della sua scarsa mobilità nel floema e della competizione con altri cationi come potassio, magnesio e ammonio (Ehret & Ho, 1986). Condizioni ambientali che riducono la traspirazione, come elevata umidità o scarsa ventilazione, aggravano il problema. La prevenzione si basa su un apporto costante di calcio, sull'evitare sbalzi di umidità e sull'equilibrio del rapporto K:Ca:Mg nella soluzione nutritiva.

L'**eccesso di azoto** è una delle principali cause di squilibrio nella coltivazione del pomodoro. Un apporto azotato troppo elevato o prolungato induce un eccessivo sviluppo vegetativo, con foglie grandi e tenere, tessuti ricchi di acqua e scarsa lignificazione. Questo stato fisiologico comporta ritardi nella fioritura, riduzione dell'allegagione e minore resistenza agli stress idrici e termici (Fontes & Ronchi, 2002). Inoltre, la qualità del frutto si riduce per effetto della diluizione dei solidi solubili e del contenuto zuccherino. La soluzione consiste nel bilanciare l'apporto di azoto con un'adeguata quantità di potassio, riducendo gradualmente la concentrazione azotata durante la fase di invaiatura e maturazione.

La **carenza di magnesio** si manifesta con clorosi internervali sulle foglie basali: le nervature rimangono verdi mentre i tessuti circostanti ingialliscono progressivamente. Si tratta di una carenza secondaria frequente nei sistemi fertirrigui, in particolare quando il rapporto K/Mg è troppo elevato (Giuffrida & Leonardi, 2012). Poiché il magnesio è un elemento mobile, la pianta tende a trasferirlo verso le foglie giovani, impoverendo quelle più vecchie. La correzione può avvenire tramite l'applicazione di solfato di magnesio in fertirrigazione o di nitrato di magnesio per via fogliare, in concentrazioni di sicurezza inferiori all'1,5%.

La **carenza di fosforo** è tipica delle prime fasi di sviluppo o di situazioni di basse temperature nel substrato. Le piante mostrano un rallentamento della crescita e una colorazione verde-bluastro delle foglie, che con il tempo può virare al violaceo per accumulo di antociani. In ambienti freddi o con pH superiore a 7, il fosforo precipita con calcio e magnesio, riducendo la sua disponibilità (Chapman & Pratt, 1961). È consigliabile fornire fosforo in forma diidrogenofosfato (H_2PO_4^-) e mantenere il pH della soluzione tra 5,5 e 6,2.

La **carenza di ferro**, una delle microcarenze più comuni, provoca clorosi internervali sulle foglie apicali, mantenendo verdi solo le nervature principali. Essa si verifica soprattutto in substrati calcarei o in soluzioni nutritive con pH elevato, dove il ferro precipita come ossido ferrico. L'impiego di chelati di ferro stabili (Fe-DTPA o Fe-EDDHA) e il controllo del pH rappresentano le strategie più efficaci per ristabilire la disponibilità dell'elemento (Voogt & Sonneveld, 1997).

Anche le **carenze di microelementi** come boro, zinco e manganese possono generare sintomi caratteristici. La mancanza di boro causa deformazioni apicali, necrosi dei giovani tessuti e aborti fiorali, mentre la carenza di zinco si manifesta con riduzione della dimensione fogliare e internodi corti. Il manganese, essenziale per la fotosintesi, induce piccole macchie clorotiche e necrosi puntiformi sulle foglie giovani quando carente. Queste fisiopatie, spesso subdole, si distinguono solo mediante analisi fogliari, che consentono di intervenire con correzioni mirate.

Un capitolo a parte merita la **salinità**, che rappresenta una delle principali cause di squilibri fisiologici in

fertirrigazione. L'accumulo eccessivo di sali nel substrato, espresso da valori di EC superiori a 3,5 dS/m, riduce la disponibilità idrica per effetto osmotico e provoca sintomi di avvizzimento, necrosi marginali e frutti di calibro ridotto (Maas & Hoffman, 1977; Magán et al., 2005). In questi casi, il problema non è la carenza di un elemento specifico, ma l'eccessiva concentrazione salina complessiva. La soluzione consiste in un aumento temporaneo della frazione di drenaggio e nella riduzione graduale dell'EC di alimentazione fino al ristabilimento dell'equilibrio.

Le **condizioni microclimatiche** giocano un ruolo determinante nell'insorgenza delle fisiopatie. Temperature troppo elevate, in combinazione con bassa umidità, accelerano la traspirazione e favoriscono la carenza di calcio, mentre un'umidità eccessiva riduce l'attività radicale e può indurre carenze di ferro e magnesio (Cuartero & Muñoz, 1999). La gestione integrata di clima e nutrizione, mediante ventilazione, ombreggiamento e fertirrigazione a impulsi, consente di ridurre le fluttuazioni e mantenere stabile l'equilibrio ionico.

La **diagnosi precoce** è fondamentale per la prevenzione. L'osservazione visiva deve essere accompagnata da strumenti di monitoraggio oggettivo: analisi della soluzione nutritiva, misurazione dell'EC e del pH del drenaggio, analisi fogliari e della linfa. Questi dati permettono di correlare i sintomi visivi con le condizioni reali della rizosfera, individuando rapidamente la causa dello squilibrio.

La prevenzione delle fisiopatie, in definitiva, non consiste nel correggere singoli elementi, ma nel mantenere costante l'equilibrio complessivo del sistema. La nutrizione equilibrata è un processo dinamico, nel quale ogni intervento su un nutriente deve tenere conto delle interazioni con gli altri e delle condizioni microambientali. Un equilibrio stabile tra acqua, sali e fisiologia garantisce non solo l'assenza di disturbi, ma anche la piena espressione qualitativa e produttiva del pomodoro.

Monitoraggio e correzione: mantenere l'equilibrio nel tempo

Il mantenimento dell'equilibrio nutrizionale del pomodoro non è un'azione statica, ma un processo continuo di osservazione, misura e adattamento. L'efficienza della fertilizzazione dipende dalla capacità di **monitorare costantemente** lo stato della coltura e di **correggere** in modo tempestivo eventuali deviazioni rispetto ai valori ottimali di concentrazione e rapporto ionico. In un sistema fertirriguo evoluto, il monitoraggio rappresenta l'elemento chiave che connette fisiologia, nutrizione e ambiente (Le Bot et al., 1998; Incrocci et al., 2017).

Le tecniche di monitoraggio si articolano su tre livelli: analisi della **soluzione nutritiva**, controllo del **drenaggio** e analisi **fogliare o di linfa**. Ognuna fornisce informazioni complementari sullo stato reale della pianta e sulla disponibilità dei nutrienti nella rizosfera.

Il controllo della **soluzione nutritiva di alimentazione** consente di verificare la correttezza della composizione chimica e la stabilità dei parametri fisico-chimici. La misura della conducibilità elettrica (EC) e del pH deve essere effettuata quotidianamente, sia nella soluzione in ingresso sia in quella di drenaggio. Una differenza di EC tra ingresso e drenaggio superiore a **1,0 dS/m** indica accumulo salino e richiede un aumento temporaneo della frazione di lisciviazione (Ben-Gal et al., 2008). Parallelamente, variazioni del pH superiori a $\pm 0,5$ rispetto al valore di riferimento segnalano squilibri tra forme anioniche e cationiche, che possono alterare la disponibilità dei nutrienti.

L'**analisi della soluzione di drenaggio** costituisce lo strumento più diretto per valutare la risposta del sistema radicale. Essa riflette la composizione ionica residua dopo l'assorbimento da parte delle radici, fornendo indicazioni sulla selettività di assorbimento e sulla competizione tra elementi. Un incremento costante del rapporto Na/K o Cl/NO₃⁻ nel drenaggio, ad esempio, indica un progressivo accumulo di sali non nutritivi e la necessità di una diluizione della soluzione madre o di un ciclo di lavaggio (Sonneveld, 2000).

Le **analisi fogliari** rappresentano un controllo diretto dello stato nutrizionale interno della pianta. Esse permettono di confrontare la concentrazione dei macro e microelementi nei tessuti con intervalli di riferimento sperimentali, distinguendo tra carenze latenti ed eccessi. La foglia campione è in genere la quarta o quinta dal vertice del germoglio florale principale, raccolta nelle ore centrali della giornata e analizzata per contenuto di N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, Cu e B. Le analisi fogliari, effettuate ogni 3-4 settimane, consentono di calibrare progressivamente la soluzione nutritiva, adattandola alle fasi fenologiche e alle variazioni ambientali (Bodale et al., 2021).

Negli ultimi anni, la **diagnosi rapida tramite linfa o estratti fogliari** ha acquisito crescente importanza. Questo metodo consente di misurare in tempo reale la concentrazione di nitrati, potassio e calcio attraverso sensori

portatili o fotometri. Tali strumenti permettono una correzione quasi immediata delle fertirrigazioni, riducendo il ritardo tra diagnosi e intervento (Giuffrida et al., 2013).

Un altro parametro chiave di monitoraggio è l'**indice di efficienza d'uso dei nutrienti (NUE, Nutrient Use Efficiency)**, calcolato come rapporto tra quantità di nutrienti assorbiti e apportati. Valori di NUE inferiori al 70% indicano sprechi o squilibri, spesso causati da eccessiva concentrazione nutritiva, gestione inadeguata del drenaggio o insufficiente attività radicale (Fontes & Ronchi, 2002). L'obiettivo è mantenere il sistema in equilibrio tra disponibilità e assorbimento, ottimizzando l'efficienza complessiva del ciclo.

Le **correzioni nutrizionali** devono essere graduali e mirate. Gli interventi bruschi sulle concentrazioni possono generare shock osmotici o competizioni ioniche. In presenza di squilibri di singoli elementi, si interviene modificando le proporzioni nelle soluzioni madri, mantenendo invariata l'EC totale. Ad esempio, per correggere carenze di calcio si aumenta la quota di nitrato di calcio nel serbatoio A, compensando con una riduzione del nitrato di potassio nel serbatoio B per non alterare il bilancio ionico complessivo.

Il **monitoraggio del microclima** integra quello nutrizionale. La temperatura e l'umidità relativa condizionano direttamente l'assorbimento e la traspirazione, e quindi il flusso di nutrienti attraverso lo xilema. Sensori ambientali collegati a centraline di fertirrigazione consentono di adattare automaticamente la frequenza e la durata delle irrigazioni in base alla radiazione solare e all'evapotraspirazione giornaliera (Chrétien et al., 2000). Questo approccio dinamico permette di stabilizzare l'ambiente radicale e prevenire fluttuazioni improvvise di EC.

Nei sistemi idroponici e a ricircolo, l'uso di **sonde di conducibilità e pH in continuo**, collegate a software di controllo, rappresenta lo standard operativo. Queste apparecchiature misurano costantemente i parametri della soluzione e inviano correzioni automatiche ai dosatori di fertilizzanti o acidi. Le registrazioni digitali dei dati consentono inoltre di costruire serie storiche per l'analisi retrospettiva dell'efficienza nutrizionale e per l'ottimizzazione dei programmi di fertirrigazione.

In campo, dove l'automazione è meno spinta, il monitoraggio si basa su **campionamenti periodici** di suolo, acqua e foglie. L'interpretazione dei dati richiede l'integrazione di indicatori visivi e numerici: un aumento di EC nel suolo accompagnato da clorosi fogliare, ad esempio, segnala un accumulo salino; una riduzione di pH associata a necrosi marginali può indicare eccesso di ammonio.

Il mantenimento dell'equilibrio nel tempo si fonda su una logica preventiva e predittiva. La nutrizione del pomodoro è un sistema dinamico in cui la composizione della soluzione, l'attività radicale e il microclima si influenzano reciprocamente. Il monitoraggio continuo, associato a una capacità di interpretazione fisiologica dei dati, consente di anticipare gli squilibri e di mantenere costante nel tempo l'efficienza nutrizionale, la qualità e la stabilità produttiva della coltura.

L'equilibrio come strategia produttiva

L'equilibrio della fertilizzazione del pomodoro rappresenta il fulcro di un approccio agronomico avanzato, nel quale fisiologia vegetale, chimica dei nutrienti e gestione ambientale convergono in un sistema integrato e dinamico. La nutrizione non è un semplice apporto quantitativo di elementi, ma un processo di regolazione continua, volto a mantenere stabili le relazioni tra ioni, acqua e metabolismo, all'interno di un contesto produttivo complesso e in evoluzione.

Il principio fondamentale è la **sinergia tra elementi nutritivi**. Ogni ione, macro o micro, contribuisce in modo specifico a un equilibrio collettivo che determina la crescita, la qualità e la resistenza della pianta. L'azoto stimola la crescita vegetativa, il fosforo sostiene lo sviluppo radicale e la fioritura, il potassio regola la sintesi zuccherina e la qualità del frutto, mentre calcio e magnesio stabilizzano le strutture cellulari e i processi fotosintetici. Gli oligoelementi completano il quadro, agendo come cofattori enzimatici e regolatori biochimici. La perdita di equilibrio tra questi componenti si traduce immediatamente in squilibri fisiologici, fisiopatie e riduzione qualitativa della produzione.

L'evoluzione tecnologica della fertirrigazione ha reso possibile una gestione sempre più **precisa e adattiva** del bilancio nutrizionale. I sistemi automatizzati di controllo di pH, EC e portata consentono di regolare in tempo reale la concentrazione dei nutrienti, in funzione della radiazione solare, dell'evapotraspirazione e della fase fenologica. Tuttavia, la tecnologia è efficace solo se guidata da una **conoscenza agronomica profonda**, capace di interpretare i dati alla luce delle esigenze fisiologiche della pianta.

La sostenibilità è un aspetto inseparabile dal concetto di equilibrio. Ridurre le perdite di nutrienti per lisciviazione, ottimizzare l'efficienza d'uso dell'azoto (NUE) e minimizzare l'impatto salino rappresentano obiettivi agronomici, ambientali ed economici convergenti. L'applicazione controllata dei fertilizzanti, unita al monitoraggio del drenaggio e alla gestione della salinità, consente di mantenere la produttività elevata senza compromettere la salute del suolo o la qualità delle acque.

L'equilibrio nutrizionale non è quindi un valore statico, ma un **processo dinamico di autoregolazione**. Ogni fase del ciclo colturale richiede un diverso rapporto tra gli elementi: maggiore disponibilità di azoto e fosforo nelle fasi iniziali, incremento progressivo del potassio e del calcio durante l'accrescimento e la maturazione, riduzione dei livelli salini e controllo dell'umidità per evitare stress osmotici. La capacità di modulare questi parametri in tempo reale costituisce la chiave del successo produttivo.

In un contesto di crescente complessità climatica e di variabilità delle risorse idriche, la gestione dell'equilibrio nutrizionale assume un valore strategico. La combinazione tra **diagnosi precoce, automazione, monitoraggio e competenza agronomica** consente di costruire sistemi di coltivazione resilienti, capaci di adattarsi alle oscillazioni ambientali senza compromettere la qualità finale del prodotto.

Il pomodoro, per la sua sensibilità fisiologica e per il suo ruolo economico globale, è una coltura modello per applicare e perfezionare il concetto di fertilizzazione equilibrata. L'esperienza maturata in questo ambito costituisce un riferimento per tutte le colture orticole ad alta intensità tecnica, dove il controllo del bilancio nutrizionale diventa non solo una necessità produttiva, ma un principio di gestione sostenibile.

L'equilibrio della fertilizzazione non rappresenta un obiettivo isolato, bensì un paradigma gestionale: integra conoscenza, misura, tecnologia e sensibilità agronomica in un sistema orientato alla qualità, alla stabilità e alla durata nel tempo della produttività agricola.

Bibliografia

- Abbott, J. D., Peet, M. M., Willits, D. H., Sanders, D. C., & Gough, R. E. (1986). Effects of irrigation frequency and scheduling on fruit production and radial fruit cracking in greenhouse tomatoes in soil beds and in a soilless medium in bags. *Scientia Horticulturae*, 28(3), 209-217.
- Adams, P. (1986). Mineral nutrition. In J. Atherton & J. Rudich (Eds.), *The tomato crop: A scientific basis for improvement* (pp. 281-334). Springer.
- Adams, P. (1989). Some effects of root temperature on the growth and nutrient uptake of tomatoes in NFT. In *Proceedings of the 7th International Congress on Soilless Culture* (pp. 73-82). Wageningen, The Netherlands: International Society for Soilless Culture.
- Adams, P. (1991). Effects of increasing the salinity of the nutrient solution with major nutrients or sodium chloride on the yield, quality, and composition of tomatoes grown in rockwool. *Journal of Horticultural Science*, 66(2), 201-208.
- Adams, P., & Ho, L. C. (1989). Effects of constant and fluctuating salinity on the yield, quality, and calcium status of tomatoes. *Journal of Horticultural Science*, 64(6), 725-732.
- Adams, P., & Ho, L. C. (1992). Effects of environment on the uptake and distribution of calcium in tomato and on the incidence of blossom-end rot. *Journal of Horticultural Science*, 67(6), 825-839.
- Al-Karaki, G. N. (2000). Growth, water use efficiency, and sodium and potassium acquisition by tomato cultivars grown under salt stress. *Journal of Plant Nutrition*, 23(1), 1-8.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1987). *Water quality for agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1. FAO, Rome.
- Badr, M. A., & El-Yazied, A. A. (2007). Effect of fertigation frequency from subsurface drip irrigation on tomato yield grown on sandy soil. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 1(3), 279-285.
- Ben-Gal, A., Ityel, E., Cohen, S., Yermiyahu, U., Zyssman, G., & Presnov, E. (2008). Evaluating water quality for irrigation: In-line monitoring of soil salinity. *Agricultural Water Management*, 95(9), 1096-1103.
- Benton, J. J. (2012). *Plant nutrition and soil fertility manual*. CRC Press.
- Bodale, I., Mihalache, G., Achiței, V., Teliban, G. C., Cazacu, A., & Stoleru, V. (2021). Evaluation of the nutrients uptake by tomato plants in different phenological stages using an electrical conductivity technique. *Agriculture*, 11(4), 292.

- Boyer, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571), 443-448.
- Chapman, H. D., & Pratt, P. F. (1961). *Methods of analysis for soils, plants, and waters*. Davis, CA: University of California.
- Chrétien, S., Gosselin, A., & Dorais, M. (2000). High electrical conductivity and radiation-based water management improve fruit quality of greenhouse tomatoes grown in rockwool. *HortScience*, 35(4), 627-631.
- Cuartero, J., & Muñoz, R. F. (1999). Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae*, 78, 83-125.
- De Krijg, C. (1995). Latest insights into water and nutrient control in soilless cultivation. *Acta Horticulturae*, 408, 47-61.
- De Pascale, S., Maggio, A., Fogliano, V., Ambrosino, P., & Ritieni, A. (2001). Irrigation with saline water improves carotenoids content and antioxidant activity of tomato. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 76, 447-453.
- Dorais, M., Papadopoulos, A. P., & Gosselin, A. (2001). Greenhouse tomato fruit quality. *Horticultural Reviews*, 26, 239-319.
- Ehret, D. L., & Ho, L. C. (1986). Translocation of calcium in relation to tomato fruit growth. *Annals of Botany*, 58, 679-688.
- Fanasca, S., Martino, A., Heuvelink, E., & Stanghellini, C. (2007). Effect of electrical conductivity, fruit pruning, and truss position on quality in greenhouse tomato fruit. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 82(3), 488-494.
- Fontes, P. C. R., & Ronchi, C. P. (2002). Nitrogen use efficiency in tomato growth and yield. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(9), 1343-1348.
- Giuffrida, F., Leonardi, C., & D'Anna, F. (2013). La fertirrigazione in serra. Workshop "La gestione della nutrizione minerale nelle colture in serra", Comiso, Università di Catania.
- Grattan, S. R., & Grieve, C. M. (1999). Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Horticulturae*, 78(1-4), 127-157.
- Hagin, J., Segelman, G., & Shaviv, A. (1990). Strategy for development of fertilizer solutions for greenhouse tomatoes. *Fertilizer Research*, 26(1-3), 53-60.
- Haynes, R. J. (1985). Principles of fertilizer use for trickle irrigated crops. *Fertility Research*, 6(3), 235-255.
- Ho, L. C., & Adams, P. (1995). Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. *Acta Horticulturae*, 396, 33-44.
- Ho, L. C., Grange, R. I., & Picken, A. J. F. (1987). An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. *Plant, Cell & Environment*, 10(2), 157-162.
- Incrocci, L., Massa, D., & Pardossi, A. (2017). New trends in the fertigation management of irrigated vegetable crops. *Horticulturae*, 3(2), 37.
- Le Bot, J., Adamowicz, S., & Robin, P. (1998). Modelling plant nutrition of horticultural crops: A review. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 47-82.
- Lu, T., Yu, H., Wang, T., Zhang, T., Shi, C., & Jiang, W. (2022). Influence of the Electrical Conductivity of the Nutrient Solution in Different Phenological Stages on the Growth and Yield of Cherry Tomato. *Horticulturae*, 8, 378.
- Magán, J. J., Gallardo, M., Thompson, R. B., & Lorenzo, P. (2005). Effects of salinity on fruit yield and quality of tomato grown in soil-less culture in greenhouses in Mediterranean climatic conditions. *Agricultural Water Management*, 78(1-2), 25-38.
- Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop salt tolerance—Current assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 103, 115-134.
- Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239-250.
- Pardossi, A., Prosdocimi Gianquinto, G., & Santamaria, P. (a cura di). (2018). *Orticultura. Principi e pratica*. Edagricole.
- Peet, M. M., Harlow, C. D., & Larrea, E. S. (2004). Fruit quality and yield in five small-fruited greenhouse tomato cultivars under high fertilization regime. *Acta Horticulturae*, 659, 811-818.
- Petropoulos, S. A., Fernandes, Â., Xyrafis, E., Polyzos, N., Antoniadis, V., Barros, L., & Ferreira, I. C. (2020). The optimization of nitrogen fertilization regulates crop performance and quality of processing tomato. *Agronomy*, 10(5), 715.
- Pineda-Pineda, J., Ramírez-Arias, A., Sánchez del Castillo, F., Castillo-González, A. M., Valdez-Aguilar, L. A., &

Vargas-Canales, J. M. (2011). Extraction and nutrient efficiency during the vegetative growth of tomato under hydroponics conditions. *Acta Horticulturae*, 997-1005.

Sonneveld, C. (2000). Effects of salinity on substrate-grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture. PhD thesis, Wageningen University, The Netherlands.

Sonneveld, C., & Van Der Burg, A. M. M. (1991). Sodium chloride salinity in fruit vegetable crops in soilless culture. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 39, 115-122.

Voogt, W., & Sonneveld, C. (1997). Nutrient management in closed growing systems for greenhouse production. In E. Goto (Ed.), *Plant production in closed ecosystems* (pp. 83-102). Boston, MA: Kluwer Academic.

Xu, H. L., Gauthier, L., & Gosselin, A. (1997). Greenhouse tomato photosynthetic acclimation to water deficit and response to salt accumulation in the substrate. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 65(4), 777-784.

Nicolò Passeri, Dottore Agronomo, libero professionista. Consulente per imprese agricole ed agroalimentari in ambito tecnico legale. Svolge analisi economico-estimative e di marketing dei processi produttivi. Supporta le imprese nella valorizzazione in filiera delle produzioni e nello sviluppo e dei sistemi di certificazione volontari e regolamentati. Docente presso ITS Academy Agroalimentare.