

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”
DIPARTIMENTO DI AGRARIA



Corso di Laurea MAGISTRALE

in

Scienze e Tecnologie Agrarie

Tesi di laurea sperimentale

**Stima del fabbisogno irriguo attraverso l'assimilazione di dati
derivati da immagini satellitari
in un modello agro-idrologico**

Relatore:

Ch.mo Prof.

Giovanni Battista Chirico

Candidato:

Maria Rivoli

Matr. N09/316

Anno Accademico 2018-2019

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Fabbisogni indicativi in elementi nutritivi del pomodoro

Tabella 2: Bande Sentinel-2

Tabella 3: Principali caratteristiche del suolo

Tabella 4: Parametri colturali usati per la simulazione della coltura di pomodoro nel modello AquaCrop

Tabella 5: Programma irriguo adottato dal conduttore

Tabella 6: Calendario delle date di osservazione con satelliti i Sentinel-2A e Sentinel-2B, con le due orbite 79 e 122

Tabella 7: Altezze di irrigazione cumulate e simulate, resa e produttività dell'acqua evapotraspirata e dell'acqua di irrigazione

Elenco delle figure

Figura 1: Zona d'origine e di domesticazione del pomodoro

Figura 2: Alcune variazioni in colore, forma e dimensioni di pomodori

Figura 3: Foto campo con varietà ad accrescimento determinato

Figura 4: Varietà ad accrescimento indeterminato

Figura 5: Composizione della sostanza secca del frutto di pomodoro

Figura 6. Schema di calcolo di AquaCrop

Figura 7: Tempi di copertura e revisione previsti per le acquisizioni dal MSI di Sentinel-2

Figura 8: Diagramma di flusso Irrisat

Figura 9: Localizzazione dell'area sperimentale. Nel riquadro in basso una foto satellitare della parcella oggetto di studio con l'ubicazione delle 10 paline di riferimento per l'attività di rilievo in campo. La foto a destra illustra una foto dell'impianto fatta il 17 maggio, con una delle paline di riferimento.

Figura 10. Esempi di immagini prima e dopo il processamento con Canopeo.

Figura 11. Sensore LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (a). Letture sopra e sotto la chioma

Figura 12. Plant Canopy Analyzer Lai 2000

Figura 13. Spad meter

Figura 14. Serie temporali di Sentinel-2 nei colori naturali, falsi colori ed elaborazioni ANN descrittive di f_c e LAI

Figura 15. Pioggia ed evapotraspirazione di riferimento cumulate dalla data di impianto alla data di raccolta

Figura 16. Grado di copertura stimato dalla analisi delle foto in campo eseguite con l'applicazione Canopeo e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2

Figura 17. Indice di area fogliare (LAI) misurato in campo con il LAI-2000 della LICOR e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2

Figura 18. Correlazione tra contenuto di clorofilla delle foglie (LCC) e misure d SPAD, sulla base di prove di laboratorio

Figura 19. Confronto tra il contenuto di clorofilla della chioma (CCC) stimato utilizzando i dati in campo di LAI ottenuti con il LAI-2000 della LICOR e lo SPAD, e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2

Figura 20. Confronto tra il contenuto di clorofilla della chioma (CCC) stimato utilizzando i dati in campo di LAI ottenuti con il LAI-2000 della LICOR e lo SPAD, e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2

Figura 21. Partizione della pioggia totale in pioggia netta utile a soddisfare la domanda evapotraspirativa, drenaggio profondo e ruscellamento superficiale:

Figura 22. Evapotraspirazione cumulata della coltura ETc secondo AquaCrop nei due scenari di simulazione, confrontata con i valori cumulati di pioggia netta, l'evapotraspirazione potenziale della coltura secondo IRRISAT (con i rispettivi intervalli di incertezza) e la variazione dell'acqua immagazzinata nel suolo nell'orizzonte esplorato dalle radici

Figura 23. Evapotraspirazione cumulata della coltura ETc, ripartita nella componente evaporativa (E) e traspirativa (Tr), e evapotraspirazione potenziale ETp secondo IRRISAT.

Figura 24. Valori giornalieri di evapotraspirazione della coltura ETc, ripartita nella componente evaporativa (E) e traspirativa (Tr), e evapotraspirazione potenziale ETp secondo IRRISAT.

Figura 25. Altezze di irrigazione cumulate, secondo: il programma irriguo aziendale (Irr. Azienda); AquaCrop senza assimilazione (Irr. AquaCrop) e con assimilazione (Irr. AquaCrop+S2); consiglio irriguo IRRISAT

Figura 26. Altezze di irrigazione cumulate, secondo: il programma irriguo aziendale (Irr. Azienda); AquaCrop senza assimilazione (Irr. AquaCrop) e con assimilazione (Irr. AquaCrop+S2); consiglio irriguo (Irr. IRRISAT)

Abbreviazioni

%	Percentuale
°C	Gradi Celsius
ANN	Rete Neurale Artificiale
B	Biomassa
Ca	Calcio
CC	Canopy Cover – Grado di copertura del suolo da parte della chioma
CCC	Canopy Chlorophyll Content - Contenuto Clorofilla della Chioma
CO ₂	Anidride Carbonica
E	Evaporazione
EC	Conducibilità Elettrica
EO	Earth Observation
ESA	Agenzia Spaziale Europea
ET	Evapotraspirazione
ET ₀	Evapotraspirazione di riferimento
ETc	Evapotraspirazione Colturale in condizioni standard
FOV	Field of View
GDD	Growing Degree Days – Somme termiche
Ha	Ettaro
HI	Harvest Index
IR	Infrarosso
IWR	Irrigation Water Requirement – Fabbisogno Irriguo
K	Potassio
Ks	Coefficiente di stress
LAI	Leaf Area Index – Indice di Area Fogliare
LCC	Leaf Chlorophyll Content – Contenuto di Clorofilla delle Foglie
Mg	Magnesio
MSI	Dispositivo Multispettrale
N	Azoto
NIR	Near Infrared – Vicino Infrarosso
P	Fosforo
PCA	Plant Canopy Analyzer
Pn	Crop Effective Rainfall
RGB	Rosso – Verde – Blu
S-2	Sentinel-2
SWIR	Infrarosso a Onde Corte
TOA	Top of Atmosphere – Sopra l'Atmosfera
TOC	Top of Canopy – Sopra chioma
Tr	Traspirazione
UE	Unione Europea
VIS	Visibile
WP	Water Productivity – Produttività dell'acqua
Y	Resa Finale

Sommario

Lo sviluppo di tecnologie di aiuto alla gestione ottimale dell'acqua irrigua assume un ruolo sempre più rilevante, in considerazione di scenari di incremento delle produzioni agricole irrigue e di maggiori incertezze circa la disponibilità della risorsa per effetto dei cambiamenti climatici ed il deterioramento della qualità delle acque. In questo lavoro è stata valutata la possibilità di ottimizzare la programmazione irrigua attraverso l'uso integrato di dati dello stato delle colture derivati da analisi di immagini multispettrali da satellite e modelli agro-idrologici di crescita delle colture. Lo studio è stato condotto con riferimento ad una coltura di pomodoro da industria in una parcella irrigua sita in Frignano (CE), nella primavera-estate 2019. Contestualmente alle acquisizioni delle immagini satellitari sono stati effettuati rilievi in campo nel corso dell'intero sviluppo della coltura (dall'impianto alla raccolta), per la registrazione dei volumi di irrigazione ed il rilievo di parametri caratteristici dello stato della coltura da utilizzare per la validazione dei dati da satellite, quali l'indice di area fogliare, il contenuto di clorofilla ed il grado di copertura del suolo. Sono state esaminate tre metodologie di stima del fabbisogno irriguo: stime ottenute con il modello AquaCrop calibrato; stime ottenute con il modello AquaCrop con assimilazione sequenziale del grado di copertura da satellite; stime ottenute con il servizio di consulenza per l'irrigazione IRRISAT, basato solo su stime satellitari dello stato delle colture. I risultati confermano l'utilità di integrare modelli agro-idrologici e osservazioni satellitari per migliorare le performance di stima del fabbisogno irriguo delle colture. Il modello agro-idrologico offre stime più affidabili del fabbisogno irriguo nelle prime fasi di sviluppo della coltura, essendo capace di simulare l'effetto delle perdite evaporative dal suolo, quando la copertura del suolo da parte della coltura è ancora piccola. Il dato di origine satellitare consente d'altra parte di correggere le simulazioni del modello, correggendone gli errori nelle fasi più avanzate di sviluppo della coltura e nel corso della senescenza.

Indice

Elenco delle tabelle	2
Elenco delle figure	3
Abbreviazioni.....	5
Sommario	6
Introduzione	9
1. Il pomodoro (<i>Solanum Lycopersicum</i> L).....	11
1.1 Origine e diffusione.....	11
1.2 Produzione.....	12
1.3 Caratteri botanici	13
1.4 Scelta varietale	13
1.5 Esigenze pedo-climatiche.....	15
1.6 Esigenze irrigue.....	16
1.7 Esigenze nutrizionali	16
1.8 Densità e tecniche di impianto	17
1.9 Raccolta	18
1.10 Caratteristiche qualitative.....	18
2. Tecniche per la stima del fabbisogno irriguo.....	21
2.1 I modelli agro-idrologici per la gestione dell'irrigazione	22
2.2 Un modello agro-idrologici “water-driven”: AquaCrop	23
2.3 Una tecnica basata sul monitoraggio delle colture da satellite: IRRISAT	27
2.4 La missione Sentinel-2	30
3. Materiali e Metodi.....	33
3.1 Area di studio	33
3.1.1 Parcelle irrigue.....	33
3.1.2 Impianto irriguo e modalità di irrigazione.....	34
3.2 Attività sperimentale in campo.....	35
3.2.1 Rilievo del grado di copertura del suolo.....	35
3.2.2 Misura dell'indice dell'area fogliare (LAI)	36
3.2.3 Misura in campo di contenuto di clorofilla.....	37
3.3 Stima dei parametri vegetazionali da satellite.....	39
3.4 Implementazione del modello AquaCrop.....	40

3.4 Scenari irrigui simulati	41
4. Risultati	43
4.1 Condizioni meteorologiche e andamento della coltura	43
4.2 Verifica delle stime dei parametri colturali da satellite.....	44
4.2.1 Verifica del grado di copertura	44
4.2.2 Verifica dell'indice di area fogliare (LAI).....	45
4.2.3 Verifica del contenuto di clorofilla delle foglie.....	46
4.3 Verifica delle previsioni del modello AquaCrop	48
5. Conclusioni	56
Bibliografia	58

Introduzione

La rapida crescita della popolazione mondiale e l'impatto negativo dei cambiamenti climatici hanno portato ad una crescente concorrenza per l'uso dell'acqua. L'agricoltura irrigua è una componente importante dell'agricoltura totale mondiale e fornisce una vasta gamma di prodotti agricoli come frutta e vegetali. L'agricoltura irrigua è considerata la più intensiva tra le pratiche agricole (Salmon et al., 2015; Xiao et al., 2006), con circa il 44% della produzione agricola totale da circa il 16-20% della superficie coltivata (Alexandratos e Bruinsma, 2012). In aree come le regioni del Mediterraneo meridionale, l'irrigazione è essenziale per garantire rese elevate durante il periodo primaverile-estivo, caratterizzato da alte temperature e mancanza di pioggia (Wriedt et al., 2009). Migliorare la gestione irrigua è un'attività fondamentale non solo per migliorare la produttività dell'acqua (Hsiao et al. 2007), ma anche per aumentare la sostenibilità dell'agricoltura irrigua, migliorando l'efficienza dell'irrigazione in una situazione di forte concorrenza per le risorse idriche. È necessario migliorare l'efficienza d'uso dell'acqua per l'irrigazione per garantire la sostenibilità a lungo termine dell'agricoltura intensiva. Le strategie per un consumo d'acqua più razionale ed efficiente possono essere ricondotte a tre tipologie: strumenti di regolamentazione delle modalità di distribuzione e di uso, tecnologici e di pratica agronomica (Stöckle, 2001).

Nell'ambito delle pratiche agronomiche, una possibile strategia è quella di programmare l'irrigazione sulla base di stime del fabbisogno idrico delle colture e del bilancio dell'acqua nel suolo. A tal fine sono stati creati servizi di consulenza per l'irrigazione che forniscono agli agricoltori le stime di fabbisogno irriguo aggiornate nel corso delle fasi di sviluppo delle colture (Irrigation Water Requirement, IWR), tenendo conto delle condizioni meteorologiche osservate o previste. L'efficacia delle stime di IWR dipende dalla disponibilità di dati aggiornati della coltura e delle condizioni meteorologiche, con adeguata risoluzione spaziale e temporale (Allen et al., 2011). Gli attuali sistemi di osservazione della Terra (Earth Observation, EO) forniscono immagini multispettrali ad alta risoluzione spaziale e temporale delle colture in pieno campo. Diversi modelli sono stati sviluppati e applicati con successo per sfruttare le serie temporali disponibili di immagini delle colture nelle bande del visibile e del vicino infrarosso (visible and Near Infrared, VIS-NIR) per stimare i parametri colturali utili per il calcolo dell'evapotraspirazione in condizioni standard (ET_c) e il fabbisogno idrico delle colture. Studi più recenti hanno inoltre evidenziato la possibilità di migliorare le stime di fabbisogno irriguo delle colture, utilizzando anche modelli di agro-idrologici, che simulano i processi che regolando il bilancio dell'acqua nel sistema suolo-pianta-atmosfera e la crescita delle colture. L'obiettivo del lavoro di tesi è stato quello di valutare la possibilità di ottimizzare la programmazione irrigua attraverso l'uso integrato di:

- dati dello stato delle colture derivati da analisi di immagini multispettrali da satellite:

- modelli agro-idrologici di crescita delle colture.

La strategia adottata consiste nell'assimilazione del dato di origine satellitare per aggiornare la variabile del modello descrittiva dello stato della coltura, nel corso della simulazione dinamica, in modo da ridurre gli errori di previsione originati dalle incertezze che risiedono nella struttura e nei parametri del modello stesso. Questa tecnica è nota in letteratura come inserzione diretta e rappresenta la tecnica più semplice di assimilazione dei dati nei modelli di simulazione dinamica.

Lo studio è stato condotto con riferimento ad una parcella irrigua coltivata con pomodoro da industria nell'anno 2019 nel Comune di Frignano (Caserta), ed è stato articolato nelle seguenti attività:

- rilievo in campo nel corso dell'intero sviluppo della coltura (dall'impianto alla raccolta), per la registrazione dei volumi di irrigazione ed il rilievo di parametri caratteristici dello stato della coltura da utilizzare per la validazione dei dati da satellite;
- acquisizione di dati dello stato della coltura, ottenuti attraverso il processamento di immagini multispettrali forniti dalla costellazione Sentinel-2 dell'Agenzia Spaziale Europea;
- acquisizione il processamento di dati meteorologici giornalieri presso una stazione di rilevamento prossima all'azienda di studio;
- calibrazione del modello agro-idrologico AquaCrop;
- confronto dei fabbisogni irrigui stimati con i volumi di irrigazione applicati in azienda.

Le metodologie di stima del fabbisogno irriguo esaminate sono tre:

- stime ottenute con il modello AquaCrop calibrato;
- stime ottenute con il modello AquaCrop con assimilazione sequenziale del grado di copertura da satellite;
- stime ottenute con il servizio di consulenza per l'irrigazione IRRISAT, basato solo su stime satellitari dello stato delle colture.

1. Il pomodoro (*Solanum Lycopersicum* L)

1.1 Origine e diffusione

Il pomodoro è uno dei maggiori frutti freschi e trasformati al mondo ed è la seconda coltura vegetale più importante dopo la patata (FAO, 2011). Appartiene alle Solanaceae, genere *Solanum*, specie *Lycopersicum*. La famiglia delle solanacee include altre importanti colture come il peperoncino e il peperone (*Capsicum* spp.), patate (*Solanum tuberosum*), melanzane (*Solanum melongena*), tabacco (*Nicotiana tabacum*). Nel 1753 Linneo inserì il pomodoro nella prima classificazione botanica con il nome di *Solanum Lycopersicum*, quindici anni più tardi Philip Miller lo chiamò *Lycopersicon esculentum* mentre nel 1881 Hermann Karsten pubblicò il nome formalmente corretto di *Lycopersicum lycopersicum* (regolamento fitosanitario internazionale: *Lycopersicum lycopersicum* (L.) Karst. ex Farwell). Il nome ufficiale è oggi *Solanum lycopersicum* L. (Dondarini e Dondini, 2010). Secondo le attuali conoscenze, si ritiene che il pomodoro abbia avuto origine in un'area compresa tra Cile settentrionale, Perù ed Ecuador, dove si è sviluppato come pianta selvatica per effetto del clima tropicale; la domesticazione avvenne, probabilmente, in Messico attraverso la dispersione dei semi. (Figura 1).

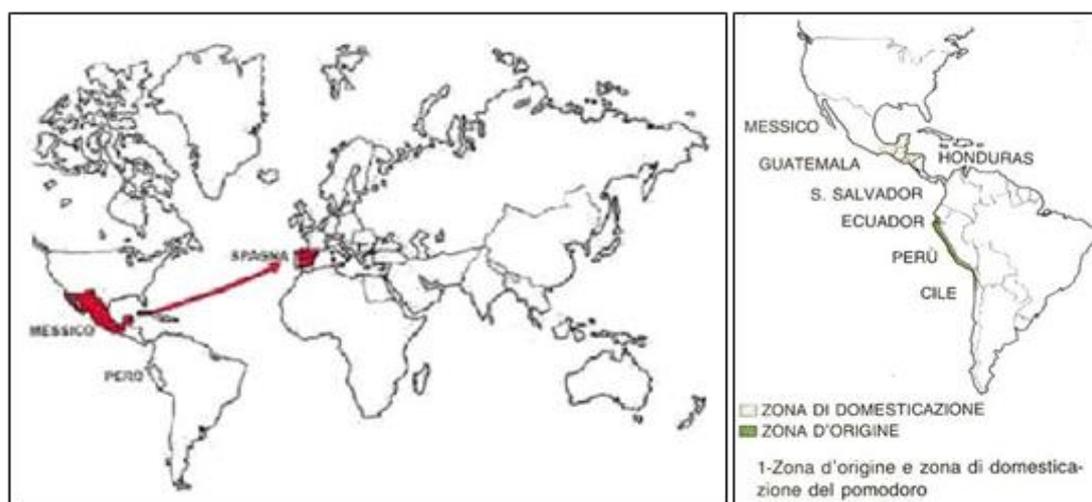


Figura 1. Zona d'origine e di domesticazione del pomodoro

Fu introdotto in Europa agli inizi del XVI secolo dagli Spagnoli con varie denominazioni che prendevano origine da termini aztechi, “tumate” (Grandillo et al., 2004), “tomatl” o “xitomatl” (Dondarini e Dondini, 2010). Dalla Spagna il pomodoro si diffuse dapprima nei possedimenti spagnoli in Italia e da lì ben presto negli altri Paesi del bacino del Mediterraneo, ma per molto tempo fu considerato una curiosità botanica e utilizzato come pianta ornamentale, in quanto ritenuto tossico e non commestibile; solo più tardi la coltivazione si diffonde tra gli agricoltori. Inizia poi ad essere utilizzato in cucina, con il nome “mala aurea” ossia “mela o pomo d’oro” (Mattioli, 1544). Si avviarono le prime coltivazioni soprattutto nelle piccole aree rurali, dove le stesse famiglie contadine

utilizzavano i pomodori sia per il consumo fresco che per la preparazione di sughi per condimento, principalmente della pasta. In breve tempo, dalla seconda metà del XVII secolo in poi, dalla Sicilia alla Pianura Padana, il pomodoro divenne un elemento tipico della cucina italiana e non solo dei ceti popolari e rurali. Fu probabilmente nello stabilimento piemontese di Francesco Cirio, nell'ultimo quarto del XIX secolo, che cominciò la produzione industriale dei pomodori conservati. La prima produzione di un derivato del pomodoro stabilizzato si fa risalire al 1888, quando il Cavaliere Brandino Vignali attivò a Basilicanova (Parma) uno stabilimento per produrre «estratto di pomodoro» secondo una tecnica che riprendeva quella della «conserva nera» ottenuta dalle famiglie contadine del parmense, facendo essiccare al sole il succo di pomodoro che era stato preventivamente concentrato in grandi pentoloni di rame. Quasi contemporaneamente, nella provincia di Salerno, viene studiata e sviluppata la tecnica per produrre i pomodori pelati, tecnica utilizzata con i pomodori dalla forma allungata coltivati alle pendici del Vesuvio. Negli anni la coltura del pomodoro, da Napoli, si è diffusa in tutto il mondo.

1.2 Produzione

L'industria del pomodoro è un'industria globale, diversificata e innovativa. Le principali aree di produzione sono situate in zone temperate caratterizzate da lunghi periodi estivi e precipitazioni invernali, anche se non mancano produzioni di pomodori nei climi tropicali. La produzione globale di pomodori (freschi e trasformati) è fortemente aumentata negli ultimi decenni, basti pensare che si è passati da produzioni di 27,6 milioni di tonnellate nel 1961 a 171 milioni di tonnellate nel 2014 (Faostat, 2016). I principali paesi di coltivazione sono Cina, Stati Uniti, India, Turchia, Egitto, Italia, Iran, Spagna, Brasile e Messico. (FAO, 2011). L'Italia è il settimo produttore mondiale e il maggiore dell'unione europea (Eurostat News, 2016). Il pomodoro italiano per l'industria di trasformazione rappresenta il 14% della produzione mondiale e circa il 50% della produzione dell'UE, con un valore stimato di 3,2 miliardi di euro, metà dei quali è da export (ANICAV, 2016). Le aziende di trasformazione del pomodoro al sud sono concentrate in Campania e Puglia (AMITOM, 2016). La Sicilia è leader nella coltivazione protetta di pomodori con 6500 ha e una produzione di 380.000 t (Testa et al., 2014; Dall'Olio, 2016). Il pomodoro può essere coltivato sia in serra che in pieno campo e la raccolta può essere sia manuale (principalmente per i pomodori da consumo fresco) che meccanica (principalmente per i pomodori da industria). Esiste una grande variazione nelle varietà coltivate, nelle zone di coltivazione, le pratiche agronomiche, ma anche per quanto riguarda le strutture organizzative delle catene di approvvigionamento, le certificazioni e marketing (Bellec-Gauche et al., 2015).

1.3 Caratteri botanici

Il pomodoro è una pianta erbacea, potenzialmente perenne in relazione alle condizioni pedoclimatiche, ma annuale in coltura. Ha un tipo di accrescimento detto simpodiale, cioè quando una gemma apicale cessa la sua attività una gemma laterale la sostituisce, assicurando lo sviluppo della pianta.

L'apparato radicale è fibroso, fascicolato, può raggiungere anche 1.5 m di profondità, ma la maggior parte esplora il terreno nei primi 30 cm. Lo stelo è pubescente, eretto poi prostrato, semi legnoso, ramificato. Le foglie sono alterne, pennatosette, composte da 7-11 foglioline semplici, con peli ghiandolari (come tutte le parti verdi della pianta) che secernono una sostanza dal tipico odore acre. I fiori sono riuniti in infiorescenze (racemi); presentano generalmente 5 petali gialli, 5 sepalì e 5 stami con antere biloculari concresciute formanti un cilindro che circonda lo stilo. La fioritura è scalare; la fecondazione è autogama con 0.5-4% di allogamia. Il Frutto è una bacca, può avere diversa forma e grandezza, di colore variabile dal giallo al rosso. Il colore tipico è rosso, ma le bacche del pomodoro possono assumere colorazioni diverse: si va dalle cultivar di colore bianco, a quelle gialle, rosa, arancioni e persino violacee (Figura 2). I semi sono reniformi, schiacciati, di colore marrone chiaro, ricoperti di una fitta peluria. Il peso di 1000 semi è di 2,5-3,5 g. In un grammo sono contenuti 250-350 semi; la durata della facoltà germinativa è di 4 anni. Per la commercializzazione dei semi, la germinabilità minima è del 75%.



Figura 2. Alcune variazioni in colore, forma e dimensioni di pomodori

1.4 Scelta varietale

Viene effettuata in base alla destinazione commerciale del prodotto e dipende soprattutto dalla tipologia di accrescimento e dall'habitus. Uno dei principali criteri di scelta è la possibilità di meccanizzazione delle fasi del ciclo maggiormente onerose.

Le diverse varietà possono essere ad accrescimento determinato o indeterminato; differiscono principalmente per la quantità prodotta di nuovi elementi vegetativi e riproduttivi.

Le varietà ad accrescimento determinato (Figura 3), tipicamente per industria da pieno campo, presentano un ritmo di emissione delle infiorescenze superiore a quello di emissione dei germogli: la

crescita simpodiale ad un certo punto si arresta e la pianta perde vigoria, assumendo così un portamento cespuglioso con piante basse. Grazie al loro portamento, queste varietà non necessitano di tralicci o sostegni, presentano allegagione e maturazione uniformi e la raccolta è singola ed effettuata meccanicamente. Per il pomodoro da industria la scelta della cultivar deve tener conto delle esigenze sia dei produttori sia dell'industria di trasformazione nell'ambito di un razionale ed integrato processo di filiera. Per i produttori una buona cultivar deve possedere i seguenti requisiti: produzioni elevate, costanti negli anni ed in diverse situazioni pedologiche; prodotto fresco rispondente quanto più possibile ai requisiti qualitativi richiesti dall'industria di trasformazione; resistenza alle più importanti e diffuse malattie; idoneità alla raccolta meccanica (internodi brevi, maturazione quanto più contemporanea possibile, distacco della bacca facile e senza picciolo, bacche con elevata resistenza agli urti e alla sovraturazione); precocità definita.



Figura 3. Foto campo con varietà ad accrescimento determinato

Le varietà ad accrescimento indeterminato (Figura 4), per il consumo fresco, presentano dopo un periodo di crescita vegetativa (circa 8-12 foglie, o anche meno in dipendenza di particolari condizioni ambientali) emissione da parte della pianta della prima infiorescenza e successivamente una nuova infiorescenza ogni tre internodi, fin quando sussistono idonee condizioni climatiche. Con questo tipo di accrescimento, le piante necessitano di sostegni per l'allevamento in verticale e dell'eliminazione dei germogli laterali con asportazione manuale ("scacchiatura" o "sfemminellatura") e la raccolta è scalare e manuale.



Figura 4. Varietà ad accrescimento indeterminato

1.5 Esigenze pedo-climatiche

Il pomodoro è una coltivazione principalmente da ciclo primaverile-estivo (pomodoro da mensa, pomodoro indeterminato in piena area), salvo per le forzature a ciclo fine estate-autunnale- inizio inverno che vengono fatte in ambiente protetto alle nostre latitudini, oppure quasi annuale come avviene in Sicilia, dove il clima lo permette. Con l'evoluzione delle tecniche di coltivazione, tutti i pomodori vengono seminati in vivaio e allevati fino allo stadio di 4-5 foglie vere e poi trapiantate in campo per ottenere un'omogeneità di semina ottimale e uno standard qualitativo migliore. La temperatura media giornaliera ottimale è compresa tra 22 e 26 °C con temperature medie notturne tra 13 e 16 °C, per la fioritura 20-25°C di giorno e 14-17°C di notte, mentre per l'accrescimento e la maturazione dei frutti 21-26°C di giorno e 16-18°C di notte. Elevate differenze tra le temperature diurne e notturne influiscono negativamente sulla resa così come temperature superiori a 30-35°C, o che restano su valori elevati sia di giorno che di notte, provocano difetti di allegazione ed alterazioni della forma, del colore e della consistenza. Temperature minori di 2°C sono letali alla pianta di pomodoro in ogni suo stadio fenologico. L'umidità relativa ottimale è compresa tra il 55 ed il 60%, livelli superiori favoriscono l'attacco di crittogame fogliari ed ostacolano l'allegazione; diversamente, il pomodoro non ha particolari esigenze in termini di luce. Livelli troppo elevati o bassi di intensità luminosa, U.R. e temperatura, influenzano direttamente le caratteristiche dei frutti.

Il pomodoro può essere coltivato su una vasta varietà di terreni, ma che presentino adeguata capacità di ritenzione idrica e buona struttura, sono sicuramente da preferire terreni di medio impasto dove si trova il compromesso migliore tra disponibilità di nutrienti e di umidità. Richiede terreni con pH ottimale compreso tra 5 e 7, ben drenati e profondi e con buona aerazione. È molto sensibile a ristagni idrici e compattazione del terreno. È una specie moderatamente tollerante alla salinità.

1.6 Esigenze irrigue

Un principio di base dell'irrigazione è che la quantità totale di acqua applicata ad ogni evento irriguo dovrebbe essere uguale al fabbisogno di colture più il volume perso attraverso diversi processi, quali l'evaporazione e la lisciviazione. La quantità d'acqua è una funzione del tipo di coltura, della fase di crescita ed evaporazione (Dukes et al., 2012). Elevata qualità dell'acqua irrigua è un prerequisito di qualsiasi sistema produttivo. La salinità e il pH dell'acqua sono i principali parametri considerati. La salinità è espressa come conducibilità elettrica (EC), in mS/cm (millisiemens per centimetro) o dS/m (decisiemens per metro). Le misure di EC sono correlate alla concentrazione totale di elettroliti in soluzione. L'EC può anche essere correlata alla struttura del suolo, alla capacità di scambio cationico e all'umidità del suolo (Grisso et al., 2009). Livelli ottimali di EC per la produzione di pomodoro sono generalmente tra 1.6 e 5.0 dS/m, in base alla cultivar, condizioni ambientali e pratiche produttive (Dorais et al., 2001). Il pomodoro è una coltura molto sensibile alle pratiche irrigue. I fabbisogni idrici del pomodoro sono piuttosto elevati, soprattutto durante la fase di ingrossamento dei frutti e la più alta richiesta di acqua è durante la fioritura, in quanto una carenza idrica in questa fase può essere causa di arresto dell'evoluzione florale, cascola dei fiori e riduzione della crescita; tuttavia, è stato dimostrato che anche un'irrigazione eccessiva durante questo periodo aumenta la caduta dei fiori e riduce l'allegagione causando un'eccessiva crescita vegetativa e un ritardo nella maturazione (FAO). Irrigazioni pesanti o irregolari o periodi asciutti alternati a periodi umidi dovrebbero essere evitati. Di fatto, un'impropria gestione dell'irrigazione, durante il ciclo colturale e nelle fasi più sensibili, può portare a danni come marciumi o necrosi apicali, saccatura dei frutti e scottatura. (Sodi, 2018). Un ruolo molto importante lo riveste il metodo di irrigazione, molto diffusa, ormai è l'irrigazione a goccia, che presenta un'efficienza irrigua molto elevata, in quanto va a bagnare le piante nella zona vicino alla radice e non alla superficie fogliare, cosa che invece accade con l'irrigazione per aspersione, metodo quasi totalmente in disuso, che oltre a presentare una più bassa efficienza irrigua, può favorire la comparsa di malattie fungine e batteriche.

1.7 Esigenze nutrizionali

La gestione accurata di un programma di fertilizzazione è importante al fine di ridurre al minimo le perdite di nutrienti e per migliorare l'assorbimento delle piante. Per i pomodori coltivati in campo è necessaria una chiara conoscenza dei fabbisogni nutrizionali per la progettazione di un adeguato programma di fertilizzazione; fabbisogni che variano in relazione al tipo di coltura e al potenziale di rendimento (Phillips et al., 2009). Molto importante per stabilire un adeguato piano di fertilizzazione sono le analisi del terreno per conoscerne la composizione in nutrienti e il pH del suolo che può influenzare l'assorbimento dei nutrienti. Il valore ottimale di pH per la produzione di pomodoro è 6-6,5. I valori delle asportazioni di nutrienti variano secondo il tipo di coltura ed i rendimenti e

dipendono dalla dotazione del terreno. I principali nutrienti sono azoto (N), fosforo (P), potassio (K), ma anche calcio (Ca) e magnesio (Mg) rivestono un ruolo importante nella coltivazione del pomodoro (tab. 1). L'azoto è l'elemento da trattare con maggiore attenzione, in quanto un eccesso può provocare un'elevata vigoria, con conseguente maturazione non omogenea, maggior suscettibilità ad attacchi fungini e peggioramento della qualità delle bacche. L'assorbimento dell'azoto aumenta progressivamente per diventare rilevante durante il periodo di produzione dei frutti. Il fosforo interviene nello sviluppo dell'apparato radicale, determina un accrescimento equilibrato della vegetazione con emissione di numerose infiorescenze ed una maggiore precocità e contemporaneità di maturazione. Carenze di fosforo, dovute ad una scarsa dotazione, attacchi parassitari alle radici, scarsa luminosità o temperatura del terreno troppo bassa si manifestano con assunzione da parte delle foglie di una colorazione violacea. Il potassio ha un'importante influenza sulla qualità (gusto e colore), il massimo fabbisogno si ha durante l'allegagione e l'ingrossamento delle bacche. Altri nutrienti, come calcio (Ca) e magnesio (Mg) sono molto importanti. Il calcio, infatti, gioca un ruolo molto importante per il pomodoro, provvede a funzioni fisiologiche fondamentali, quali turgore cellulare, respirazione, ecc.; per cui una buona disponibilità è essenziale. Inoltre, una scarsa assimilazione di calcio, dovuta ad una cattiva gestione dell'irrigazione provoca "necrosi o marciumi apicali". Per quanto riguarda il magnesio, una sua carenza, dovuta ad una scarsa dotazione del terreno o al mancato assorbimento da parte delle piante a causa di un eccesso di potassio, può portare a inspessimento e clorosi internervale delle foglie.

Tabella 1. Fabbisogni indicativi in elementi nutritivi del pomodoro, in chilogrammi di elemento nutritivo per tonnellata di bacche.

Elemento	kg t ⁻¹ bacche
Azoto (N)	2.0
Fosforo (P ₂ O ₅)	1.5
Potassio (K ₂ O)	4.0
Calcio (CaO)	4.0
Magnesio (MgO)	0.7

1.8 Densità e tecniche di impianto

Il pomodoro può essere impiantato sia per semina diretta che con trapianto. La semina, effettuata in campo con seminatrici tradizionali o di precisione, è stata quasi totalmente sostituita dal trapianto, grazie alla diffusione di macchine trapiantatrici, per ottenere crescita delle piante, sviluppo e densità uniformi. La semina per il trapianto viene effettuata in vivaio, in camere di crescita, in vassoio con temperature ottimali per la germinazione tra 21 e 27 °C di giorno e 16-18°C di notte (Rutledge et al., 1999). Le dimensioni del vassoio e il tempo di permanenza delle celle influenzano il trapianto; variando la dimensione delle celle si modifica il volume di radicazione delle piante con conseguente

effetto sulla crescita (NeSmith and Duval, 1998). Esistono numerose tipologie di celle con diverse configurazioni, ma quelle maggiormente consigliate sono celle quadrate con lati di 1,5 cm per la produzione di piantine di qualità (Boyhan and Kelley, 2010; Ivors and Sanders, 2010). Le piante vengono trapiantate allo stadio di 4-5 foglie vere, da 4 a 7 settimane dopo la semina; è preferibile che abbiano un fusticino robusto e poco allungato (10-15 cm). Viste le numerose differenze tra le diverse cultivar e le destinazioni finali del prodotto, le distanze sulle file e tra le file variano ampiamente. Il pomodoro da industria viene piantato ad elevata densità poiché l'obiettivo finale è ottenere grandi quantità piuttosto che un'elevata qualità dei frutti. Al contrario, il pomodoro da mercato, richiede minori densità di impianto al fine di ridurre competizione per spazio, nutrienti e acqua e per avere frutti di dimensioni maggiori (Elattir, 2002). Il trapianto viene effettuato tra fine marzo-maggio, a mano o con macchine. La densità colturale varia a seconda del tipo di pianta, cultivar e pratica colturale: da 2 a 6 piante /m² con distanza tra le file da 0,75 a 1,5 m; il pomodoro da industria può essere trapiantato in fila binata per aumentare le rese, con densità colturali tra 20000 e 45.000 pt/ha. Generalmente l'epoca per il trapianto è tra fine-marzo inizio aprile.

1.9 Raccolta

A seconda del tipo di varietà e della destinazione finale, il pomodoro può essere raccolto in diverse fasi di maturazione, all'invasatura della bacca o completamente maturo. La raccolta può essere effettuata a mano, per le cultivar a maturazione scalare, generalmente quelle da mensa; o a macchina per le cultivar a maturazione contemporanea. La raccolta dovrebbe essere eseguita idealmente nelle prime ore del mattino o nel pomeriggio per evitare la raccolta nelle ore più calde della giornata, con conseguente perdita di compattezza del frutto e suscettibilità a funghi e batteri durante trasporto e conservazione. Per il pomodoro da mensa la raccolta viene effettuata a mano ed è scalare, partire dall'invasatura. Inizia circa 90-110 giorni dopo il trapianto per le colture in serra, e dopo 60-70 per le colture in pieno campo. Per quanto riguarda il post raccolta, la gestione varia a seconda della destinazione finale del prodotto, ma in generale la conservazione ottimale avviene con temperature tra 4 e 10 °C e umidità relativa superiore all'80%. Per il pomodoro da industria la raccolta inizia quando i frutti sono completamente maturi, hanno raggiunto il massimo ingrossamento e si è avuto il completo viraggio del colore al rosso. L'epoca di lavorazione coincide con il periodo di lavorazione degli stabilimenti e va dai primi di agosto alla fine di settembre.

1.10 Caratteristiche qualitative

La qualità del frutto è una caratteristica complessa che include più variabili. Mentre la qualità commerciale si basa principalmente sull'attrattività esterna (ad es. colore, forma, dimensioni) e conservabilità, la qualità organolettica dipende da caratteristiche fisiche quali compattezza e

consistenza e tratti biochimici che ne determinano il gusto. D'altra parte, i benefici per la salute dipendono dalla composizione in vitamine e composti antiossidanti (licopene, β -carotene, acido ascorbico e polifenoli) e minerali (potassio, magnesio, calcio e fosforo); mentre la qualità sanitaria è definita da residui di pesticidi o altri composti come allergeni, micotossine o microrganismi patogeni. La qualità dei frutti viene valutata al momento del raccolto ma viene elaborata durante lo sviluppo e deriva da molti processi di crescita e attività metaboliche, regolate anche dalle condizioni ambientali (Génard et al., 2007). Il gusto, la consistenza, e il valore nutritivo dei frutti sono determinati principalmente dalla quantità di sostanza secca e dalla composizione in zuccheri, acidi, cellulosa e proteine, composti antiossidanti e minerali, nonché dal rapporto tra zuccheri e acidi e la loro diluizione in acqua. Al momento del raccolto, questi tratti sono altamente variabili: il peso fresco può variare di 200 volte mentre il contenuto di sostanza secca, zuccheri, acidi e vitamina C può variare da quattro a cinque volte. La qualità continua ad evolversi in post raccolta in base alle condizioni di conservazione e alla fase di maturazione al momento della raccolta. Dimensioni e forma dei frutti di pomodoro sono i principali tratti di qualità e sono il risultato di un'enorme variabilità genetica. La consistenza è, invece, una caratteristica qualitativa che va a determinare il valore d'uso finale dei frutti, se destinati al mercato o alla trasformazione industriale. La consistenza non solo determina l'accettazione da parte del consumatore finale ma ha anche un impatto significativo sulla qualità organolettica, sulla shelf-life e la trasportabilità (Seymour et al., 2002) e interferisce con il sapore e la percezione dell'aroma (Causse et al., 2003). Il frutto del pomodoro è composto per circa il 90–95% acqua e 5-10% di sostanza secca, di cui circa il 50% è rappresentato da zuccheri e il 15% da acidi organici e aminoacidi (Figura 5). Gli zuccheri solubili (glucosio, fruttosio e saccarosio) e gli acidi organici (principalmente malici e acidi citrici) sono i principali composti osmotici accumulati nel frutto del pomodoro. Sono responsabili sia le quantità assolute sia l'equilibrio tra zuccheri e acidi in quanto contribuiscono alla dolcezza e acidità dei frutti e, in generale, al sapore complessivo (Davies e Hobson, 1981).

L'acido ascorbico o ascorbato (Vitamina C) svolge un ruolo importante nelle piante; è coinvolto nella divisione cellulare, nella sintesi della parete cellulare e nell'interazione delle piante con l'ambiente, i patogeni e gli agenti ossidanti. È anche un importante micronutriente e un antiossidante essenziale per l'uomo. Nel pomodoro la vitamina C la ritroviamo in due diverse forme idrosolubili e biologicamente attive: ascorbato (forma ridotta) e acido deidroascorbico (forma ossidata). Entrambe le forme sono presenti in tutti i compartimenti cellulari dei tessuti sottoposti a crescita e sviluppo attivi, e la quantità totale di vitamina C varia da 20 a 60 mg / 100 g di peso fresco tra le specie di pomodoro e le cultivar (CTIFL, 2011). I carotenoidi, oltre a svolgere un ruolo importante nelle piante (protezione dell'apparato fotosintetico da energia luminosa eccessiva, precursori di acido abscissico

e attrattivi per gli impollinatori, quindi coinvolti nella dispersione dei semi), sono molto importanti per la dieta umana grazie alle loro proprietà antiossidanti. Nel pomodoro, la concentrazione totale di carotenoidi aumenta tra 10 e 50 volte durante la maturazione dei frutti, con una concomitante diminuzione della clorofilla (Fraser et al., 1994). Il licopene e il β -carotene sono i principali pigmenti del pomodoro e sono responsabili del colore rosso. Il licopene rappresenta circa l'80-90% del contenuto totale di carotenoidi in frutti maturi e presenta un elevato potere antiossidante in quanto agisce prima catturando i radicali liberi a livello delle membrane cellulari e delle lipoproteine deputate al trasporto nel sangue dei grassi introdotti con gli alimenti, e poi formando con tali radicali complessi privi di attività ossidante (radical scavenger) (Maiani, 2010). I polifenoli sono metaboliti secondari, prodotti in risposta a stress abiotici o biotici, sintetizzati dalla fenilalanina prodotta dalla via dell'acido shikimico. Sono composti bioattivi coinvolti nella prevenzione del cancro e delle malattie cardiovascolari grazie al loro potente antiossidante e hanno attività epatoprotettiva, ipoglicemizzante e antivirale (Slimestad e Verheul, 2009). I flavonoidi sono i principali polifenoli nel pomodoro.

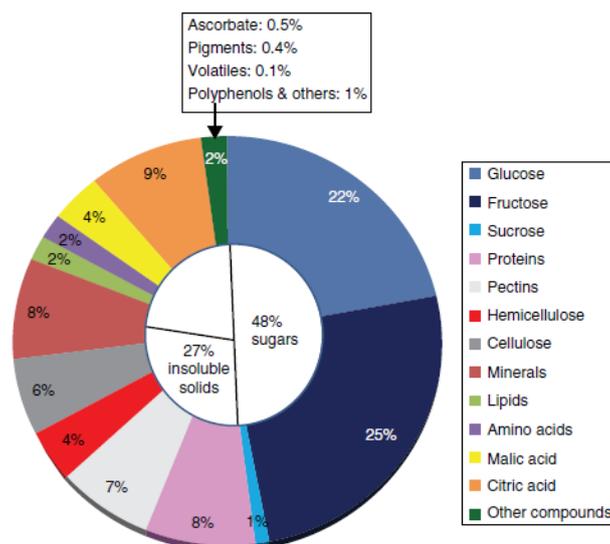


Figura 5. Composizione della sostanza secca del frutto di pomodoro. (Adattato da Davies e Hobson, 1981)

2. Tecniche per la stima del fabbisogno irriguo

La ricerca applicata allo sviluppo di sistemi di gestione dell'acqua irrigua degli ultimi vent'anni è stata orientata all'implementazione di servizi di consulenza aventi l'obiettivo di aiutare sia gli enti consortili nella gestione ottimale dei sistemi di approvvigionamento e distribuzione dell'acqua ad uso irriguo, sia le aziende agricole nella programmazione degli interventi irrigui.

Questo ambito di ricerca è motivato dalla necessità di ridurre l'impatto del comparto agricolo sull'uso delle risorse irrigue, soprattutto in uno scenario di incremento delle produzioni agricole irrigue e di maggiori incertezze circa la disponibilità della risorsa per effetto dei cambiamenti climatici ed il deterioramento della qualità delle acque.

La ricerca ha interessato due linee principali (D'Urso et al., 1999): lo sviluppo di modelli di bilancio idrologico di tipo distribuito; lo sviluppo di sistemi per la caratterizzazione delle proprietà delle colture in pieno campo.

Con il progredire delle conoscenze sui processi di scambio di massa e di energia che intervengono nel sistema suolo-pianta-atmosfera e con la crescente disponibilità di codici di calcolo che consentono di simulare questi processi, è possibile analizzare le diverse componenti che influenzano il funzionamento di un sistema complesso quale un comprensorio irriguo. In questo contesto, i modelli di simulazione idrologica permettono di quantificare i diversi termini del bilancio idrologico con accuratezza sufficiente per gli scopi pratici. In alcuni casi, è possibile ricorrere a modelli in grado di fornire una dettagliata descrizione dei processi di trasporto idrico nel sistema suolo-pianta-atmosfera in presenza di fenomeni di stress idrico. Questi modelli offrono la possibilità di valutare l'evolversi nel tempo dei potenziali e dei contenuti idrici nel suolo nella zona interessata dall'apparato radicale, nonché degli attingimenti radicali. Si possono così stimare i consumi d'acqua delle colture, in funzione del livello freatico, ovvero in seguito alla scelta di un prestabilito calendario delle somministrazioni irrigue, ovvero investigare la riduzione di produttività delle colture derivante da ridotti volumi d'irrigazione.

I modelli di simulazione del bilancio idrologico, unitamente ad algoritmi per la verifica idraulica delle reti di distribuzione, possono essere impiegati per migliorare l'affidabilità e l'efficienza globale dei sistemi irrigui. Quest'obiettivo può essere raggiunto integrando i modelli di simulazione con tecniche di monitoraggio dei principali parametri che descrivono il funzionamento del sistema, come ad esempio l'osservazione remota delle superfici vegetate mediante scanner multispettrali.

Lo sviluppo di nuove tecnologie, unitamente ad una migliore comprensione dei processi fisici presenti in un sistema irriguo, consente la messa a punto di strumenti per il supporto alle decisioni che i gestori devono assumere. Lo sviluppo dei sistemi di supporto alle decisioni (indicati con la sigla anglosassone DSS, Decision Support Systems) prevede l'impiego combinato di tecniche di misura e di algoritmi

per l'elaborazione e la rappresentazione di dati. In questa nota, si descrive la realizzazione di un DSS per fini irrigui, basato sull'integrazione di modelli di simulazione idrologica, telerilevamento multispettrale e sistemi informativi geografici (GIS).

Un uso combinato di modelli idrologici e tecniche di telerilevamento (remote sensing) presenta numerosi vantaggi, fornendo agli agricoltori l'opportunità di migliore programmazione della gestione. Infatti, lo sviluppo delle tecnologie di telerilevamento offre un enorme potenziale per la risoluzione di problemi, limitazioni e inesattezze dei modelli colturali, fornendo osservazioni ampie e dinamiche sulle caratteristiche spaziali della superficie terrestre (Doraiswamy et al., 2003; Reichle, 2008; Liang e Qin, 2008; Dong et al., 2015). È una risorsa di dati che può essere utilizzata nei modelli colturali per stimare i raccolti con precisione (Jin et al., 2017). L'assimilazione delle informazioni del telerilevamento nei processi di simulazione dei modelli colturali aiuta a determinare i valori delle variabili di crescita delle colture e dell'area di coltivazione (Chen et al., 2018). Molti studi recenti hanno, quindi, provato a ridurre gli effetti della carenza di dati dei modelli attraverso la regolazione dello stato iniziale, ricalibrazione dei parametri del modello o modificando le variabili di stato (Curnel et al., 2011).

2.1 I modelli agro-idrologici per la gestione dell'irrigazione

Per garantire la resa delle colture con acqua di irrigazione limitata è importante avere un programma di pianificazione dell'irrigazione che garantisce che le perdite di acqua dal suolo per evapotraspirazione o drenaggio siano ridotte al minimo (Li et al., 2018). Pertanto, l'ottimizzazione di allocazione dell'acqua è sostanzialmente raggiunta dall'ottimizzazione della programmazione dell'irrigazione. Questo è vitale per garantire il risparmio idrico e avere un maggiore beneficio netto per gli agricoltori locali.

I modelli agro-idrologici sono strumenti rapidi e potenti per simulare in modo dinamico lo sviluppo delle colture e prevedere i rendimenti di campo, per confrontare diversi scenari di produttività associati a diverse strategie di gestione agricola (Phelan et al., 2018). La modellistica agro-idrologica riproduce i principali processi nel sistema suolo - pianta - atmosfera (Yao, 1981, WMO, 1983, Decker, 1985). Fondamentale per il loro sviluppo e la loro applicazione l'interazione del modellista con le conoscenze tipiche delle discipline che indagano le singole componenti di tale sistema. Nel caso del sottosistema suolo gli interlocutori d'elezione possono essere ad esempio pedologi e idrologi (JRC, 1996, King et al., 1995) mentre per il sottosistema copertura vegetale sono coinvolte competenze di tipo agronomico, ecofisiologico (Larcher, 1983), fitopatologico, entomologico, ecc. Per il sottosistema atmosfera sono cruciali le competenze legate alla fisica dell'atmosfera ed in particolare alla micrometeorologia (Geiger, 1997).

Con una buona conoscenza della crescita delle colture e dati dettagliati di input relativi a suoli, clima, genotipo delle colture e gestione agronomica, questi modelli sono in grado di offrire stime affidabili della crescita delle colture e della produttività su scala di campo (Hadria et al., 2010; Jégo et al., 2012).

La crescita delle colture dipende dall'abilità delle foglie di catturare e assimilare la radiazione solare e la CO₂, dalla capacità delle radici di estrarre acqua e nutrienti dal suolo. La radiazione solare guida i processi di assimilazione di CO₂ e la traspirazione dell'acqua. I due processi avvengono nello stesso tempo, sulla stessa superficie di scambio con l'atmosfera, e in parte attraverso lo stesso percorso. A tale scopo, le piante hanno sviluppato diversi meccanismi di ottimizzazione delle risorse (Cowan, 1982) in modo che venga stabilito un legame tra assimilazione e traspirazione (Hsiao e Bradford, 1983).

I modelli di crescita delle colture hanno un loro motore di crescita (Azam_Ali et al., 1994) basato sulle relazioni meccanicistiche stabilite tra i principali processi coinvolti (assimilazione di CO₂ e traspirazione) e crescita, o tra l'energia che li guida (radiazione solare) e la crescita. Questi motori di crescita possono essere categorizzati in “carbon-driven”, “water-driven” o “solar-driven” (Steduto, 2003). Tutti questi modelli hanno la radiazione solare come fonte d'energia ma con diversa struttura, enfasi e parametrizzazione del motore di crescita. È ovvio che buoni modelli sono frutto del lavoro di buoni modellisti ma sono fortemente influenzati dalla disponibilità di dati di input (parametri fisici e biologici) di buona qualità. Tali dati sono infatti molto utili tanto per la messa a punto dei modelli (calibrazione e validazione) che nel corso dell'impiego operativo dei modelli stessi.

2.2 Un modello agro-idrologici “water-driven”: AquaCrop

I modelli “water-driven” assumono che il tasso di crescita è linearmente proporzionale alla traspirazione attraverso una costante di proporzionalità (Steduto e Albrizio, 2005). Questo tipo di modelli sono i meno complessi e più parsimoniosi dal punto di vista parametrico e computazionale. Sono particolarmente adatti a zone in cui l'acqua rappresenta il fattore limitante per la produzione agricola (Li et al., 2018).

Uno di questi modelli è AquaCrop, sviluppato dalla Divisione *Soil and Water* della FAO per valutare l'effetto dell'ambiente e della gestione sulle produzioni agricole, tenendo conto di quelle che sono le interazioni tra pianta e suolo. Il modello simula le rese ottenibili dalle principali colture erbacee in funzione del consumo di acqua, che rappresenta il fattore chiave nella produzione. È un modello che fornisce un approccio equilibrato tra la semplicità delle funzioni, le simulazioni dettagliate, la precisione e la facilità d'uso (Toumi et al., 2016).

AquaCrop è stato sviluppato ed è utilizzato in tutto il mondo in diverse condizioni agro-ecologiche, come strumento di pianificazione nella gestione delle colture. Numerosi studi sono stati condotti con

il modello AquaCrop su temi riguardanti: la calibrazione e validazione del modello; le strategie agronomiche; la programmazione dell'irrigazione; analisi economiche e politiche per l'adattamento ai cambiamenti climatici. Nei primi studi sperimentali sono state calibrate quattordici colture in diversi paesi e in diverse condizioni del suolo e delle colture stesse (Raes et al., 2011). La calibrazione è stata poi seguita dalla validazione in diverse regioni.

Il modello utilizza un numero ridotto di parametri per stimare la biomassa e la resa delle colture in diversi ambienti e condizioni climatiche, fornendo, inoltre, un indicatore che valuta le prestazioni del sistema attraverso la produttività dell'acqua o la resa prodotta per unità di acqua evapotraspirata (Steduto, Raes et al., 2009). AquaCrop separa l'evapotraspirazione (ET) in evaporazione dal suolo (E) e traspirazione della coltura (Tr):

$$ET = E + T_r \quad (1)$$

La resa finale (Y) della coltura viene calcolata come una frazione, nota come Harvest Index (HI), della biomassa prodotta:

$$Y = HI B \quad (2)$$

La separazione dell'evapotraspirazione in evaporazione e traspirazione consente di simulare l'effetto dell'uso non produttivo dell'acqua, ossia l'evaporazione dal suolo, che è molto importante quando non si ha completa copertura all'inizio della stagione o quando la semina non è spazialmente distribuita in modo omogeneo (ad es. colture organizzate per filari).

La separazione della resa in biomassa e harvest index consente di valutare in modo più efficace l'effetto delle diverse condizioni ambientali ed in particolare dello stress idrico, che agisce in modo diverso su B e HI.

L'equazione fondamentale del modello di crescita AquaCrop è la seguente:

$$B = WP \sum T_r \quad (3)$$

Dove T_r è la traspirazione della coltura (in mm) e WP è il parametro di produttività dell'acqua (kg per biomassa per m² e per mm di acqua traspirata cumulata durante il periodo in cui viene prodotta la biomassa).

Per essere funzionale, l'equazione per il calcolo della biomassa è stata inserita in un set completo di componenti aggiuntivi:

- il suolo con il suo bilancio idrico;
- la coltura, con il suo sviluppo, crescita e resa;
- l'atmosfera, con il suo regime termico, le precipitazioni, la domanda evaporativa e la concentrazione di anidride carbonica.

Inoltre, vengono considerati aspetti gestionali quali irrigazione, fertilizzazione, pacciamatura, infestanti, ecc., in quanto, influenzano il bilancio idrico, lo sviluppo delle colture e di conseguenza la resa finale.

AquaCrop può anche simulare la crescita delle colture in scenari di cambiamento climatico (riscaldamento globale ed elevata concentrazione di anidride carbonica), mentre non sono considerati attacchi parassitari e malattie.

Tra le caratteristiche principali che contraddistinguono AquaCrop da altri modelli si annovera:

- - l'uso del grado di copertura della chioma invece che del LAI (leaf area index);
- - l'uso della produttività dell'acqua normalizzata per la domanda evaporativa dell'atmosfera e la concentrazione di anidride carbonica;
- - un basso numero di parametri;
- - la possibilità di utilizzo in diversi sistemi agricoli nel mondo;
- - l'intuitività e la semplicità di utilizzo.

La resa delle colture viene simulata in quattro fasi, come di seguito illustrato e schematicamente rappresentato nella Figura 6.

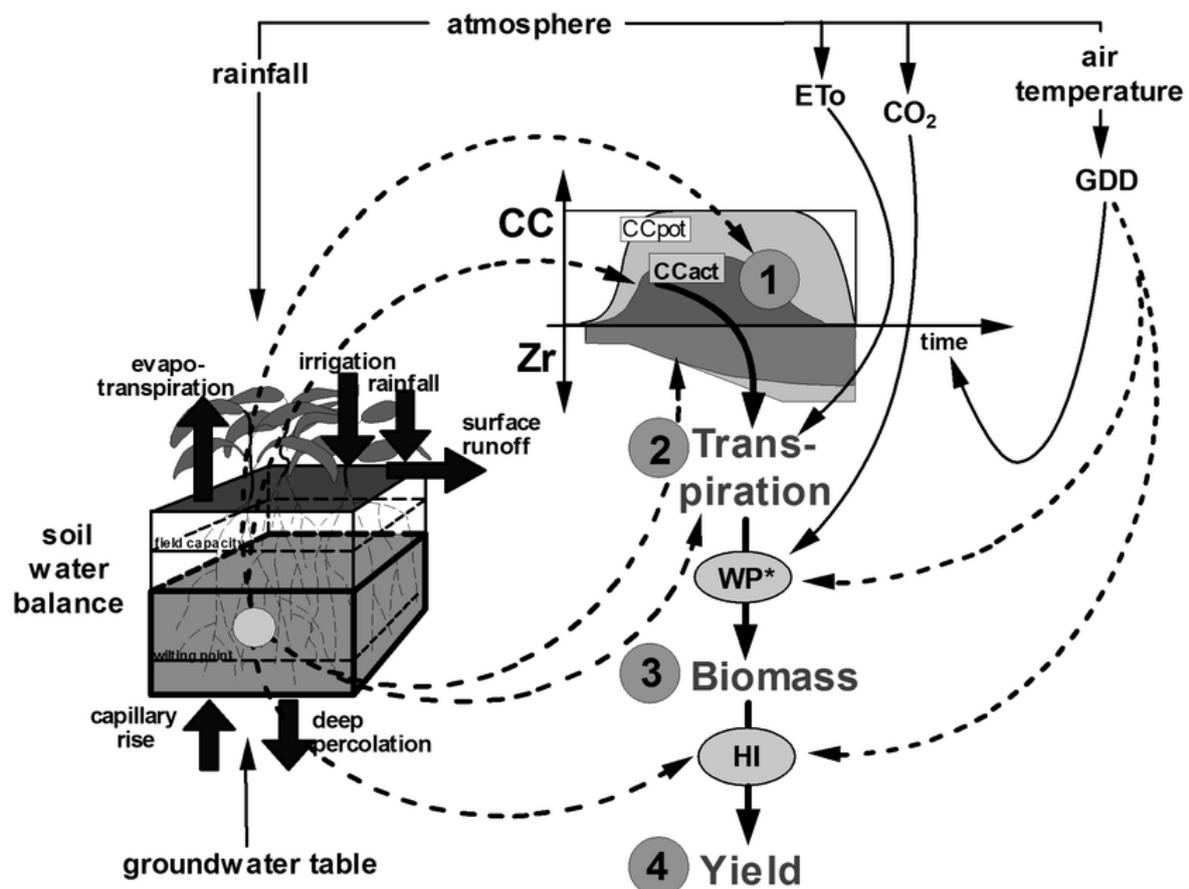


Figura 6. Schema di calcolo di AquaCrop (Vanuytrecht et al. 2014, EMS 62:351-360)

1. Sviluppo della coltura

Nella simulazione della crescita della coltura, lo sviluppo della chioma è correlato con l'espansione delle radici. AquaCrop usa il grado di copertura del suolo da parte della chioma (CC) per descrivere la crescita. Attraverso l'espansione, maturità e senescenza, determina la quantità di acqua traspirata (T_r), che va a determinare la biomassa (B) e la resa finale (Y). In presenza di stress idrico, la CC simulata risulterà inferiore alla potenziale espansione della chioma (CC_{pot}) in condizioni ideali e non si avrà la massima espansione delle radici.

2. Traspirazione (T_r).

La traspirazione è ottenuta moltiplicando il potere evaporativo dell'atmosfera (ET_0) con un coefficiente colturale. Il coefficiente colturale (K_{cTr}) è proporzionale al CC. ET_0 è determinata dall'equazione di Penman-Monteith della FAO per la coltura di riferimento. Lo stress idrico non condiziona solo lo sviluppo della chioma ma può anche influire sulla traspirazione. Lo sviluppo della chioma e la sua durata sono importanti per la traspirazione; la conduttanza stomatica rappresenta, invece, l'intensità della traspirazione.

3. Produzione di biomassa(B).

La quantità di acqua traspirata (T_r) si traduce in una quantità proporzionale di biomassa prodotta attraverso la produttività dell'acqua. In AquaCrop viene utilizzata la produttività dell'acqua normalizzata per la domanda atmosferica e la concentrazione di anidride carbonica nell'aria. Questa produttività normalizzata esprime la relazione tra l'assimilazione fotosintetica di CO_2 o produzione di biomassa e la traspirazione indipendentemente dalle condizioni climatiche.

4. Formazione della resa (Y)

Dopo aver simulato la produzione di biomassa, la resa viene ottenuta con l'utilizzo dell'harvest index (HI). L'harvest index viene aggiustato durante la simulazione della resa in caso di stress idrici o termici.

Stress idrici o termici influenzano uno o più processi. AquaCrop considera, inoltre, gli effetti della fertilità del suolo e stress dovuti alla salinità sullo sviluppo della coltura, sulla traspirazione e sulla formazione di biomassa.

Per descrivere l'effetto dello stress idrico, il modello considera diverse soglie di acqua disponibile per la zona radicale. La prima soglia riguarda il rallentamento dell'espansione della chioma; la seconda influenza la senescenza; la terza indica la chiusura stomatica e, di conseguenza, il rallentamento della traspirazione. Per descrivere gli effetti dello stress idrico vengono usati dei coefficienti di stress (K_s) i cui valori variano tra 0 e 1. Quando lo stress idrico è nullo, K_s assume

valore 1; al contrario lo stress idrico inizia ad influire su un particolare processo quando l'acqua immagazzinata nella zona radicale scende al di sotto del livello soglia, quando K_s è 0 l'effetto dello stress idrico è massimo. Tra i due valori soglia, la curva del K_s determina l'entità dell'effetto dello stress idrico. Poiché l'effetto dello stress idrico può variare a seconda dei processi, ogni processo ha il proprio coefficiente K_s .

Come già detto in precedenza, AquaCrop utilizza un numero relativamente basso di parametri colturali che descrivono le caratteristiche della coltura. La FAO ha calibrato tali parametri per le principali colture agricole fornendoli come valori predefiniti nel modello. Il modello fa una distinzione tra parametri conservativi e non conservativi. I parametri conservativi non variano con il tempo, le pratiche di gestione o la posizione geografica. Sono calibrati con i dati della coltura coltivata in condizioni favorevoli e non limitanti e rimangono applicabili anche in condizioni di stress attraverso la loro modulazione in risposta allo stress stesso. I parametri non conservativi, invece, dipendono dalla coltura e dalla gestione agronomica (data e densità di semina, lunghezza del ciclo e degli stadi fenologici, massima espansione della chioma, ecc.), dal tipo di suolo o dalle condizioni climatiche. Tali parametri possono essere recuperati dalla letteratura di AquaCrop o calibrati dall'utente attraverso prove sperimentali in campo. I principali output di AquaCrop sono, quindi, la produzione in termini di biomassa e resa e l'utilizzo d'acqua da parte della coltura.

AquaCrop può essere utilizzato come strumento di pianificazione o come supporto nelle decisioni per la gestione di agricoltura irrigua e pluviale. Il modello è particolarmente utile a comprendere la risposta delle colture ai cambiamenti ambientali; a confrontare i rendimenti effettivi e ottenibili di un campo, un'azienda o una regione; identificare i vincoli che limitano la produzione agricola e la produttività dell'acqua; a sviluppare strategie in condizioni di deficit idrico; studiare l'effetto dei cambiamenti climatici sulla produzione alimentare eseguendo AquaCrop con condizioni meteorologiche storiche e future.

2.3 Una tecnica basata sul monitoraggio delle colture da satellite: IRRISAT

L'osservazione ciclica della superficie terrestre mediante sensori multispettrali trasportati a bordo di piattaforme orbitanti è di uso corrente da oltre un decennio in un vasto campo di applicazioni e di studi del territorio. In campo irriguo, gli impieghi più comuni del telerilevamento possono essere suddivisi in due gruppi:

- metodi per la stima di alcuni termini del bilancio idrologico, come, ad esempio, l'evapotraspirazione e lo stato idrico del suolo;
- metodi mirati all'individuazione di parametri descrittivi del manto vegetale interessante la superficie osservata.

Numerose ricerche hanno mostrato, infatti, la possibilità di stimare il valore istantaneo dell'evapotraspirazione e di individuare l'insorgenza di stress idrici mediante rilievi radiometrici nella regione dell'infrarosso.

I metodi rientranti nel secondo gruppo sono stati diffusamente impiegati, per la mappatura delle colture e per l'individuazione delle aree irrigate (FAO, 1995). Tecniche simili possono essere impiegate per la stima di alcune caratteristiche del manto vegetale, come ad esempio il grado di copertura del suolo, l'indice di area fogliare (LAI) e l'albedo.

LAI e l'albedo possono essere utilizzati per la stima dei parametri colturali che intervengono nell'equazione della Penman-Monteith per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale (ET_p in mm/giorno) secondo la FAO (Durso, 1995):

$$ET_p = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta(R_{ns} - R_{nl} - G) + c_p \rho D_E / r_a}{\Delta + \gamma(1 + r_c / r_a)} \quad (4)$$

Le variabili che compaiono nell'Equazione (4) sono:

il calore latente di evaporazione λ (MJ Kg^{-1}), la pendenza della curva di vapor saturo Δ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), la radiazione solare netta alle onde corte R_{ns} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), e quella alle onde lunghe R_{nl} ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), il flusso di calore nel suolo G ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), il calore specifico dell'acqua c_p ($\text{MJ Kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), la densità atmosferica ρ (Kg m^{-3}), il deficit di vapore saturo D_E (kPa), la costante psicrometrica γ ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$) ed i due coefficienti di resistenza colturale r_c (sm^{-1}), ed aerodinamica r_a (sm^{-1}), del manto vegetale. Queste grandezze possono essere stimate in base ai valori misurati di alcuni parametri climatici standard, quali la radiazione solare incidente, la temperatura e l'umidità dell'aria, la velocità del vento, e dalla conoscenza dei parametri caratteristici della coltura, necessari per la stima della radiazione netta, R_{ns} , e delle resistenze r_a ed r_c .

Nella stima dell'evapotraspirazione ottenuta attraverso l'Equazione (4), intervengono alcuni parametri che dipendono dalla geometria del manto vegetale: l'albedo r , l'indice di area fogliare, LAI, e l'altezza media della coltura, h_c . In particolare, per la stima dei termini relativi alla radiazione netta R_{ns} ed alle resistenze r_c ed r_a che intervengono nella Equazione (4) possono essere utilizzate le seguenti relazioni:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) S_t \quad (5)$$

$$r_c = \frac{R_t}{0.5 \text{LAI}} \quad (6)$$

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_U - \frac{2}{3}h_c}{0.123h_c}\right) \ln\left(\frac{z_T - \frac{2}{3}h_c}{0.0123h_c}\right)}{0.168U} \quad (7)$$

Nella Equazione (5) S_t è la radiazione solare incidente mentre nell'Equazione (6) compare la resistenza stomatica unitaria R_t , (sm^{-1}) a cui viene attribuito un valore pari a 100 s m^{-1} nel caso di disponibilità idrica del suolo non limitata.

Attraverso l'analisi immagini multispettrali satellitari, in particolare della riflettanza spettrale della superficie delle colture nelle diverse bande λ , è possibile stimare l'albedo ed il LAI, come sarà meglio spiegato nel prossimo capitolo.

Una volta stimata la evapotraspirazione della coltura, è possibile stimare il fabbisogno idrico irriguo della coltura (crop Irrigation Water Requirement, IWR) mediante una semplice equazione di bilancio, nell'ipotesi di assenza di una falda contribuente alla risalita capillare nell'orizzonte esplorato dalle radici:

$$\text{IWR} = \text{ET}_p - P_n \quad (8)$$

dove P_n è la pioggia contribuente all'incremento di contenuto d'acqua nel suolo, al netto delle perdite per ruscellamento superficiale e drenaggio profondo.

La tecnica sopra esposta è stata implementata per la prima volta nel servizio di consulenza irrigua denominato IRRISAT.

IRRISAT è stato sviluppato in Italia e operativo dal 2007 nella regione Campania (Vuolo et al, 2015). Il servizio mira a fornire alle aziende agricole e ai gestori delle risorse idriche informazioni sul fabbisogno idrico agricolo in tempo reale. I fabbisogni irrigui vengono stimati utilizzando dati ad alta risoluzione da osservazioni satellitari combinati con dati meteo. I dati sono aggregati a varie scale spaziali (dal campo o dall'unità di irrigazione, alla scala del distretto o del bacino fluviale) e alle scale temporali (tempo reale, serie storiche). Le informazioni sono distribuite in tempo quasi reale agli utenti (agricoltori e / o agenzie idriche) tramite SMS, e-mail e applicazioni di mappatura web ad accesso privato. Nel 2016 il servizio operativo di consulenza sull'irrigazione della Regione Campania ha raggiunto circa 2000 agricoltori con una superficie irrigua totale superiore a 80,000 ettari, con un risparmio idrico stimato superiore al 30%. Nel 2016 il Ministero dell'Agricoltura italiano ha elencato IRRISAT tra le metodologie applicabili per la stima del volume di irrigazione, in conformità con la Direttiva quadro sulle acque dell'UE. La metodologia IRRISAT è riassunta nella Figura 7.

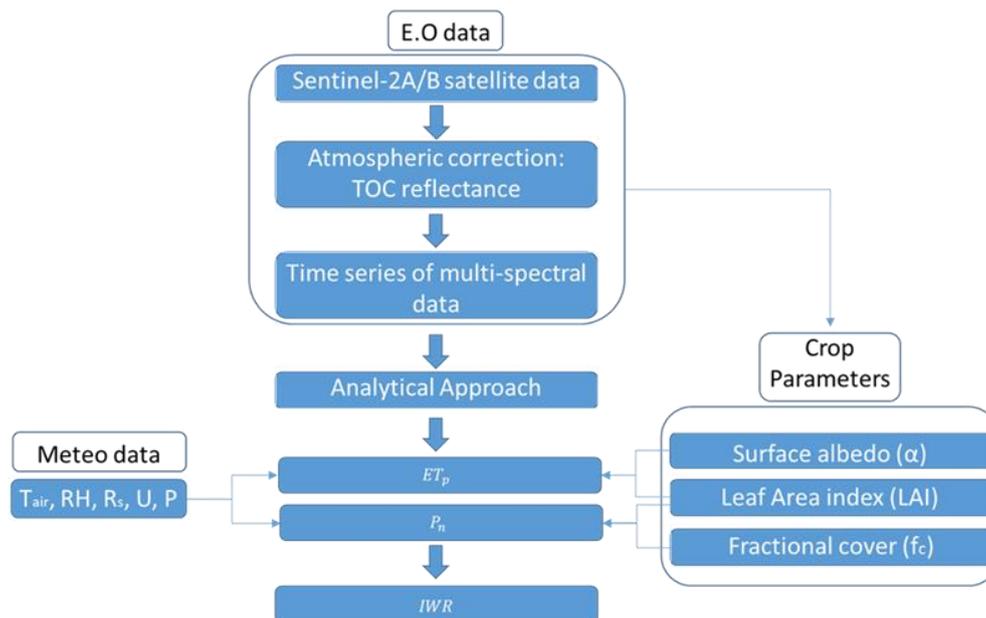


Figura 7: Diagramma di flusso della procedura di elaborazione adottata da IRRISAT per la stima l'evapotraspirazione delle colture in condizioni standard (ET_p) e il fabbisogno idrico irriguo (IWR).

Legenda: T_{air} = temperatura dell'aria; RH = umidità relativa; R_s = radiazione solare; U = velocità del vento; P = precipitazioni.

L'evapotraspirazione del raccolto (ET_p) è calcolata con l'equazione di Penman-Monteith, come sopra illustrato. I parametri albedo (α) e indice di area fogliare (LAI) derivati dall'elaborazione di immagini Sentinel-2A / B nelle regioni del visibile e dell'infrarosso, assumendo valori fissi per la resistenza stomatica ($R_t \approx 100 \text{ sm}^{-1}$) e per l'altezza della coltura ($h_c = 0.5 \text{ m}$) e dati meteorologici (temperatura giornaliera, umidità relativa, radiazione solare, velocità del vento e precipitazioni), LAI e albedo α . In IRRISAT, la pioggia netta P_n è ottenuta riducendo le precipitazioni al di sopra della chioma della vegetazione di una quantità che dipende dallo sviluppo della chioma stessa, con una funzione empirica di LAI e della fc , come riportato nello studio di Vuolo et al. (2015).

Un grande salto di qualità nel sistema IRRISAT è stato conseguito a seguito della recente attuazione della missione Sentinel-2 nell'ambito del programma europeo di monitoraggio ambientale Copernicus, guidato dalla Commissione Europea in collaborazione con l'ESA (Agenzia Spaziale Europea), come illustrato in dettaglio nel paragrafo seguente.

2.4 La missione Sentinel-2

Sentinel-2 è una costellazione formata da due satelliti gemelli, Sentinel-2A (lanciato il 23 giugno 2015) e Sentinel-2B (lanciato il 7 marzo 2017), che operano simultaneamente sulla stessa orbita ma sfasati di 180° . Forniscono immagini ottiche ad alta risoluzione per il monitoraggio delle aree verdi del pianeta, grazie ad un dispositivo multispettrale (MSI), per la determinazione delle caratteristiche

delle piante come il contenuto di clorofilla delle foglie, il contenuto d'acqua delle piante e per il monitoraggio dei cambiamenti della vegetazione durante la loro crescita.

L'MSI funziona passivamente, raccogliendo la luce solare riflessa dalla terra. I dati sono acquisiti durante il movimento del satellite lungo il suo percorso orbitale. Il raggio di luce in entrata viene diviso in un filtro e focalizzato su due gruppi di piani focali separati all'interno dello strumento: uno per le bande del visibile e del vicino infrarosso (VNIR) e uno per le bande dell'infrarosso a onde corte (SWIR). Il design ottico del telescopio MSI consente un campo visivo di 290 km (field of view, FOV). L'orbita della missione Sentinel-2 è sincrona al sole per garantire che l'angolazione della luce solare sulla superficie terrestre sia mantenuta costante. L'ancoraggio dell'orbita dei satelliti all'angolo del sole riduce al minimo il potenziale impatto delle ombre e dei livelli di illuminazione sul terreno oltre che le piccole variazioni stagionali; ciò garantisce coerenza nel tempo ed è fondamentale nella valutazione dei dati relativi alle serie storiche. Sentinel-2A e Sentinel-2B occupano la stessa orbita, ma sono separati di 180 gradi. L'altitudine orbitale media è di 786 km con inclinazione dell'orbita di 98,62°. La missione Sentinel-2 acquisisce sistematicamente dati su aree terrestri e costiere in una fascia di latitudine che si estende da 56 ° sud (Isola di Hornos, Capo Horn, Sud America) a 84 ° nord (sopra la Groenlandia). La raccolta dei dati in questa regione include tutte le acque costiere fino a 20 km dalla riva, tutte le isole maggiori di 100 km², tutte le isole dell'UE, il Mar Mediterraneo e tutti i mari chiusi (ad es. Mar Caspio). Inoltre, lo scenario di osservazione di Sentinel-2 include osservazioni a seguito di richieste degli Stati membri o dei servizi Copernicus (ad es. Antartide, Baia di Baffin).

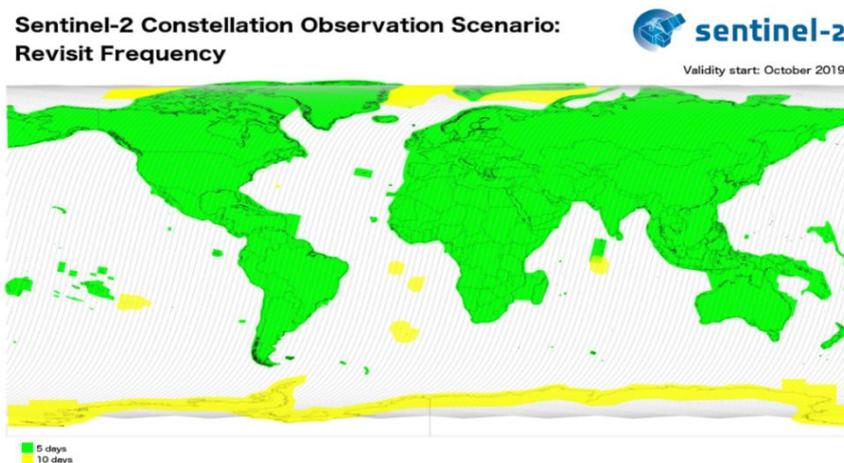


Figura 8. Tempi di copertura e revisione previsti per le acquisizioni dal MSI di Sentinel-2

Con i due satelliti, tutte le aree regolari sopra indicate sono rivisitate ogni cinque giorni nelle stesse condizioni di visione. La missione Sentinel-2 fornisce continuità ai servizi basati su osservazioni ottiche multispettrali ad alta risoluzione spaziale sulla superficie terrestre globale (Martimort et al., 2007). Sentinel-2 sfrutta la tecnologia e la vasta esperienza acquisita in Europa e Stati Uniti per

sostenere la fornitura di dati per servizi come gestione delle emergenze (ad es. inondazioni e incendi boschivi), uso del suolo e grado di copertura, monitoraggio delle foreste, gestione irrigua e protezione del suolo, mappatura urbana (Drusch et al., 2012). La missione offre una combinazione di copertura globale sistematica delle superfici terrestri, un'alta rivisitazione di cinque giorni all'equatore con lo stesso angolo di visuale, un'elevata risoluzione spaziale e un ampio campo di vista per le osservazioni multispettrali grazie alle 13 bande nel visibile, nel vicino infrarosso (NIR) e nell'infrarosso ad onde corte (SWIR) dello spettro elettromagnetico, con risoluzione che varia tra 10 e 60 m come di seguito illustrato:

- 4 bande di risoluzione spaziale a 10 metri: sono le tre bande classiche RGB; blu (493 nm), verde (560 nm) e rossa (665 nm) più una banda nel vicino infrarosso (883 nm), sono usate per la classificazione della copertura del suolo;
- 6 bande x 20 metri: quattro bande in the VIS-NIR (704 nm, 740 nm, 783 nm e 865 nm) e due bande SWIR (1610 nm e 2190 nm) per applicazioni come rilevamento di neve, ghiaccio e nuvole o valutazione dello stress da umidità della vegetazione;
- 3 bande x 60 metri: concentrate principalmente sullo screening delle nuvole e sulla correzione dell'atmosfera (443 nm per il recupero di aerosol, 940 nm per la correzione del vapore acqueo e 1375 nm per il rilevamento dei cirri.

Tabella 2. Bande Sentinel-2

Numero banda	Funzione	Lunghezza d'onda centrale (nm)	Ampiezza banda (nm)	Risoluzione spaziale (m)
B1	Aerosolo costiero	443	27	60
B2	Blu	490	98	10
B3	Verde	560	45	10
B4	Rosso	665	38	10
B5	VNIR	705	19	20
B6	VNIR	740	18	20
B7	VNIR	783	28	20
B8	NIR	842	145	10
B8a	VNIR	865	33	20
B9	Vapore acqueo	945	26	60
B10	SWIR	1380	75	60
B11	SWIR	1610	143	20
B12	SWIR	2190	242	20

3. Materiali e Metodi

3.1 Area di studio

3.1.1 Parcelle irrigue

L'attività sperimentale è stata condotta in un'azienda situata a Frignano, in provincia di Caserta (latitudine: 41.02, longitudine: 14.17). L'area è caratterizzata da clima temperato mediterraneo con temperature medie annuali di 15,2 °C e pioggia media annuale pari a 900 mm. La pioggia è concentrata nel periodo autunno-inverno, mentre le estati sono asciutte.

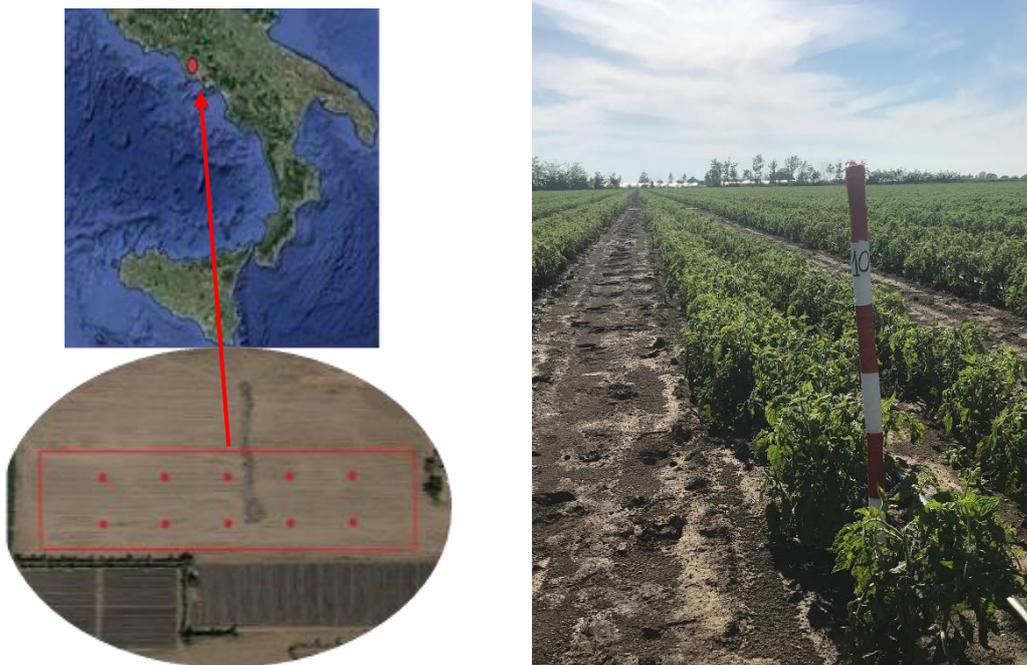


Figura 9. Localizzazione dell'area sperimentale. Nel riquadro in basso una foto satellitare della parcella oggetto di studio con l'ubicazione delle 10 paline di riferimento per l'attività di rilievo in campo. La foto a destra illustra una foto dell'impianto fatta il 17 maggio, con una delle paline di riferimento.

Nel 2019 è stato coltivato pomodoro da industria (*Solanum lycopersicum* L.), varietà Caspar, in due parcelle da 2 ha ciascuna. Il trapianto è stato effettuato il 7 aprile con sesto d'impianto a file binate, con distanza di 33 cm lungo la fila e 50 cm tra le bine e 110 cm tra le file con una densità finale di 40000 pt/ha. I principali dati meteorologici, quali, temperatura dell'aria, radiazione solare, umidità relativa, velocità del vento e precipitazioni, sono state acquisite dalla stazione meteorologica di San Marco Evangelista (CE) gestita dal Centro Funzionale Multirischi della regione Campania, la più prossima tra le stazioni meteorologiche complete in Campania (lat. 41.02, long. 14.33, alt. 31 m s.l.m).

Il suolo è stato caratterizzato mediante analisi su campioni prelevati ad una profondità di 15 cm, al fine di determinare le principali caratteristiche fisico-chimiche: granulometria (%), tessitura, densità (t/m^3), pH e sostanza organica (%).

Prima del trapianto è stata effettuata un'aratura per una profondità di 40 cm e una concimazione di fondo con fosfato di diammonio (18-46-0) e fertilizzante organico minerale. Al trapianto è stata effettuata una concimazione con fosfato di diammonio ed un concime ad elevato titolo NP microgranulare, con effetto starter.

Tabella 3. Principali caratteristiche del suolo

Parametro	Valore	Unità di misura
Argilla	11.9	vol %
Limo	48.8	vol %
Sabbia	39.2	vol %
Saturazione	46	vol %
Capacità di Campo	33	vol %
Punto di Appassimento	13	vol %
C.S.C	32	meq/100g
Sostanza Organica	26.3	g/kg
pH in H ₂ O	6.9	U.pH

Presso il campo è stata installata una stazione per il monitoraggio per la misura del contenuto d'acqua (m^3/m^3), temperatura ($^{\circ}C$) e conducibilità elettrica (mS/cm) del suolo. La stazione è costituita da una sonda Teros 12 della Decagon, posizionata ad una profondità di 20 cm, collegata ad un data logger Decagon EM-50, programmato per la registrazione oraria.

La sperimentazione è stata effettuata su un settore irriguo di 2 ha. Nell'ambito del settore irriguo sono state posizionate 10 paline di riferimento, secondo due file simmetriche con una distanza interfila di 20 metri e una distanza tra le paline lungo la fila di 10 m. Tutti i campionamenti sono stati programmati nell'intorno di ogni palina.

Le paline sono state posizionate in modo da essere centrare rispetto ai pixel delle immagini spettrali fornite dal satellite Sentinel-2.

3.1.2 Impianto irriguo e modalità di irrigazione

L'azienda ha installato un impianto di irrigazione a goccia. Sono state utilizzate delle ali gocciolanti leggere con gocciolatore piatto, modello P1 della dell'azienda IRRITEC. Sono ali caratterizzate da particolare design del labirinto del gocciolatore che permette di ridurre la sensibilità alla pressione e aumentare l'effetto autopulente grazie al maggior grado di turbolenza. Il gocciolatore piatto garantisce perdite di carico localizzate ridotte, con conseguente uniformità di distribuzione per tutta la lunghezza dell'ala, e la presenza di un filtro integrato evita il verificarsi di fenomeni di occlusione. Le ali gocciolanti utilizzate presentano una distanza tra gocciolatori di 30 cm con una portata effettiva erogata di 2,10 l/h per una pressione di esercizio di 1 bar. Come fonte di alimentazione è stata utilizzata acqua da pozzo sollevata mediante una pompa azionata da una trattoria agricola. Per il

sistema di filtrazione è stato utilizzato un filtro idrociclone, ideale per acque provenienti da pozzo, in cui la filtrazione avviene grazie ad un moto vorticoso, generato dall'entrata tangenziale dell'acqua, ad andamento centrifugo che permette la separazione tra particelle pesanti e acqua. L'acqua fuoriesce dalla bocca superiore del filtro, mentre le particelle pesanti si accumulano nel serbatoio sottostante. Dal filtro si diparte la tubazione principale collegata ad una laterale, posizionata al centro del campo, dalla quale si diramano in maniera simmetrica le ali gocciolanti. Dalla tubazione laterale l'azienda controlla l'erogazione dell'acqua, irrigando i due settori, da 2 ha ciascuno, separatamente. A valle del filtro è collocato un contatore volumetrico che permette di conoscere ad ogni intervento irriguo il volume d'acqua erogato per il settore considerato.

Il conduttore aziendale stabilisce l'intervallo temporale fra gli adacquamenti sulla base di una analisi esperta delle condizioni di contenuto di acqua del suolo rilevate occasionalmente mediante un tensiometro e in considerazione dell'andamento delle condizioni meteorologiche. Il turno irriguo è quindi variabile, con durate anche superiori ad una settimana nel periodo aprile-maggio, per ridursi a 3 giorni nei periodi di maggior fabbisogno idrico delle colture. Ciascun evento irriguo prevede un periodo di adacquamento pari a circa 4 ore, che corrisponde ad un'altezza di irrigazione mediamente pari a 12 mm. Il conduttore interrompe l'irrigazione una settimana prima della data presunta di raccolta per migliorare la qualità del raccolto (in termini di gradi brix), secondo le esigenze dell'industria conserviera.

3.2 Attività sperimentale in campo

3.2.1 Rilievo del grado di copertura del suolo

Il grado di copertura rappresenta l'estensione della chioma per unità di superficie di suolo, ed è uno dei parametri chiave per la stima dei flussi evapotraspirativi nei modelli agro-idrologici come il modello AquaCrop. È generalmente espresso in percentuale. Al fine di ottenere un riscontro a terra con il dato simulato da AquaCrop e quello stimato da satellite, sono stati effettuati dei rilievi in campo mediante l'acquisizione di foto successivamente elaborate con il software Canopeo.

Canopeo, disponibile come app per smartphone, è uno strumento di analisi delle immagini di copertura vegetale verde che analizza e classifica tutti i pixel nell'immagine attraverso le scale di colori definite dalla combinazione rosso-verde-blu (RGB). I pixel dell'immagine sono classificati in base ai rapporti di R / G , B / G (Liang et al., 2012, Paruelo et al., 2000) e l'indice di verde in eccesso (Chen et al., 2010; Richardson et al., 2007). Il risultato dell'analisi è un'immagine binaria in cui i pixel bianchi corrispondono a quelli che soddisfano i criteri di selezione (chioma verde) e i pixel neri corrispondono a quelli che non soddisfano i criteri di selezione (parte non verde). La grado di copertura della chioma verde varia da 0 (nessuna copertura del terreno) a 1 (copertura verde al 100%).

I rilievi fotografici sono stati eseguiti in 5 punti nell'intorno di ogni palina, posizionando l'obiettivo dello smartphone ad un'altezza di 60 cm. La frequenza media di rilievo è stata di 10 giorni.



Figura 10. Esempi di immagini prima e dopo il processamento con Canopeo. Grado di copertura: 19.32%

3.2.2 Misura dell'indice dell'area fogliare (LAI)

La superficie fogliare viene solitamente espressa come indice di area fogliare, noto in inglese anche come Leaf Area Index (LAI). Il LAI, definito per la prima volta da Watson (1947) come l'area unilaterale totale del tessuto fogliare per unità di superficie del terreno, è un parametro adimensionale ampiamente utilizzato per caratterizzare la vegetazione in molte applicazioni agricole e forestali.

Il LAI viene anche utilizzato come indicatore della struttura della chioma e della sua capacità di intercettare la radiazione solare.

Le misure di LAI in campo sono state effettuate con lo strumento Plant Canopy Analyzer (PCA) LAI-2000 prodotto e commercializzato dalla azienda Li-COR Inc. (Lincoln, NE, USA). Queste misure sono state pianificate con l'intento di avere dei valori di confronto a terra delle stime eseguite attraverso l'analisi delle immagini satellitari. Il PCA LAI-2000 fornisce stime di LAI a terra, operando l'inversione della trasmittanza della chioma, secondo la legge di Beer-Lambert, registrata in condizioni di cielo uniforme. Il dispositivo misura l'attenuazione della radiazione in condizioni di luce diffusa simultaneamente a cinque angoli di zenit, considerando letture sopra e sotto la chioma vegetativa, per calcolare la trasmittanza. Il sensore ottico proietta l'immagine della sua vista quasi emisferica su 5 sensori disposti in anelli concentrici, che misurano altrettanti 5 valori di trasmittanza nelle diverse direzioni attraverso la chioma delle piante, nella lunghezza d'onda del blu (320-490 nm).

LI-COR® Plant Canopy Analyzer

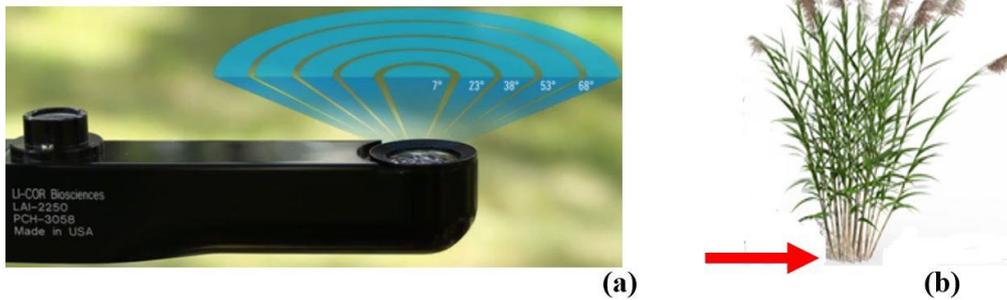


Figura 11. Sensore LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (a). Letture sopra (freccia blu) e sotto (freccia rossa) la chioma (b).

I rilievi di LAI sono stati programmati in modo da assicurare la coerenza cronologica con i passaggi satellitari. Tutti i rilievi sono stati effettuati in condizioni di luce diffusa, in una fascia oraria compresa tra le 18 e le 20, ovvero poco prima del tramonto nel periodo tardo primaverile ed estivo. Il campionamento è stato eseguito nell'intorno di ogni palina, secondo 4 direttrici con orientamento a 45 gradi rispetto alla direzione di impianto. Lungo ogni direttrice è stato rilevato il LAI in 6 punti sotto chioma, presi alternatamente al centro della bina, sulla fila e al centro tra le file binate. All'inizio di ogni direttrice, è stata eseguita una misurata sopra chioma quale valore di riferimento (tara) per la radiazione diffusa massima al di sopra della coltura.



Figura 12. Plant Canopy Analyzer LAI-2000

3.2.3 Misura in campo di contenuto di clorofilla

La presenza della clorofilla è un indice dell'attività fotosintetica, e quindi anche un rilevatore del contenuto azotato della pianta (Wood et al., 1992) nonché un indice di attività enzimatica vegetale (Seeman et al., 1987). Le misure di clorofilla in campo sono state eseguite contestualmente al passaggio dei satelliti Sentinel-2, al fine di avere dei riscontri di campo da confrontare con le stime ottenute attraverso il processamento delle immagini multispettrali satellitari.

Per le misure in campo è stato utilizzato lo strumento Chlorophyll Meter SPAD-502 prodotto dalla Konica Minolta, noto anche come SPAD meter. Questo strumento determina indirettamente il

contenuto in clorofilla presente nelle foglie delle piante. Inoltre, considerando la stretta correlazione tra il contenuto in clorofilla totale di una coltura ed il suo tenore in azoto organico nelle ordinarie condizioni di coltivazione, lo SPAD permetterebbe di stimare indirettamente anche il contenuto in azoto tissutale, consentendo di fatto di eseguire una diagnosi dello stato nutrizionale della coltura (Peterson et al., 1993). Lo SPAD meter fornisce il valore di un indice adimensionale, ottenuto dall'analisi del livello della trasmittanza delle foglie intatte a due lunghezze d'onda. Il suo funzionamento prevede la pinzatura delle foglie in vivo in una piccola camera a sfondo bianco provvista di led che emettono luce a 2 lunghezze d'onda, una ad alta assorbanza nel rosso (a circa 650nm), ed una a bassa assorbanza nell'infrarosso (IR, a circa 930nm). I led illuminano la foglia isolata dal resto della pianta e la quantità di luce che la attraversa viene catturata da un fotodiodo posto sulla parte superiore della pinza, che la trasforma in un segnale elettrico e la invia ad un microprocessore per l'elaborazione del dato SPAD.

Sono state eseguite misurazioni in campo ogni 10 giorni circa, prendendo come campione 5 piante per ogni palina ed effettuando 6 misurazioni per pianta.

Per confronto con le stime non distruttive ottenute con lo SPAD meter, sono state eseguite misure distruttive dirette su foglie fresche da cui è stato prelevato un sub-campione pari a 2 cm². Nello specifico è stata misurata con un righello l'area di taglio ed è stata quindi praticata con un bisturi l'incisione, evitando in ogni caso la nervatura centrale. Il campione di foglia ottenuto è stato sminuzzato all'interno di un mortaio in ceramica, trasferito in una provetta di vetro, con 5 ml di acetone al 90% e tenuto successivamente al buio per 15 minuti per evitare la degradazione della clorofilla. Le provette sono state centrifugate a 1920 giri per 10 minuti. Il surnatante è stato quindi recuperato e trasferito in ciallette di vetro e portato a 25 ml di volume aggiungendo acetone al 90%. Infine, le letture di assorbanza sono state effettuate a 647 nm, 664 nm e 750 nm, utilizzando uno spettrofotometro da banco (HACH mod. DR/4000).



Figura 13. SPAD meter

3.3 Stima dei parametri vegetazionali da satellite

Per la stima del LAI, dell'albedo (α) e del grado di copertura da satellite e del contenuto di clorofilla della chioma sono state utilizzate le immagini acquisite da Sentinel-2A e 2B durante la stagione irrigua.

Lo strumento multispettrale (MSI) dei satelliti fornisce dati a 10, 20 e 60 metri di risoluzione spaziale per le 13 bande spettrali con un tempo di rivisitazione di 5 giorni. Le immagini sono state scaricate gratuitamente dal sever dell'ESA Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>), considerando le orbite 79 e 122, che coprono l'area sperimentale. Per l'area di studio sono state acquisite immagini di livello 1C, che sono state poi corrette atmosfericamente utilizzando il processore Sen2Cor (versione 2.5.5), convertendole in immagini di livello 2A, ovvero con riflettanza al di sopra delle chiome (Top Of Canopy - TOC). Il processore Sen2Cor esegue la correzione dell'atmosfera, del terreno e dei cirri all'interno dei dati di input di livello 1C (al di sopra dell'atmosfera, Top Of Atmosphere - TOA) e crea immagini TOC corrette.

Al fine di ottenere prodotti omogenei e comparabili come serie temporali, tutti i prodotti come LAI, albedo (α) e grado di copertura da satellite (di seguito, fractional cover - fc) sono calcolati a partire da dati di livello 2A, corretti atmosfericamente.

LAI e fc sono calcolati con S2ToolBox, un algoritmo basato su reti neurali artificiali (ANN), specifico per i dati di Sentinel-2. L'algoritmo richiede otto bande spettrali di Sentinel-2 (B3-B7, B8a, B11 e B12) a 10 e 20 m (dimensione dei pixel), tutte ricondotte a 10 m per derivare LAI e fc.

L'albedo è stata calcolata nell'ipotesi di superficie Lambertiana, mediante l'integrazione della riflettanza sulla superficie nello spettro ad onde corte, come segue:

$$\alpha = \sum_{bi} |\rho_{bi} \cdot \omega_{bi}| \quad (9)$$

dove α è l'albedo, ρ_{bi} è la riflettanza superficiale per una data banda bi con riflettanza superficiale al livello 2A di Sentinel2, ω_{bi} è un coefficiente che rappresenta la frazione di radiazione solare derivata dallo spettro di irraggiamento solare all'interno dell'intervallo spettrale per le bande bi ed è calcolato con l'equazione:

$$\omega_{bi} = \frac{\int_{LO_{bi}}^{UP_{bi}} R_{s\lambda} \cdot d\lambda}{\int_{0.4}^{2.4} R_{s\lambda} \cdot d\lambda} \quad (10)$$

dove $R_{s\lambda}$ è la radiazione extraterrestre per la lunghezza d'onda λ (μm), UP_{bi} e LO_{bi} sono i limiti superiore e inferiore per la lunghezza d'onda per la banda bi di Sentinel-2°/2B.

Il contenuto di clorofilla della chioma (CCC, canopy chlorophyll content), può essere stimato attraverso il prodotto del contenuto di clorofilla della foglia LCC e del LAI. Diversi studi hanno

dimostrato che una stima diretta del CCC è più solida e accurata di una stima basata sul prodotto della stima individuale di LAI e LCC. Il toolbox SNAP fornisce stime di CCC attraverso algoritmi di processamento delle immagini attraverso reti neurali artificiali-ANN.

La figura seguente mostra alcuni esempi di serie temporali di Sentinel-2 nei colori naturali, falsi colori, e le rispettive elaborazioni ANN descrittive di f_c e LAI.

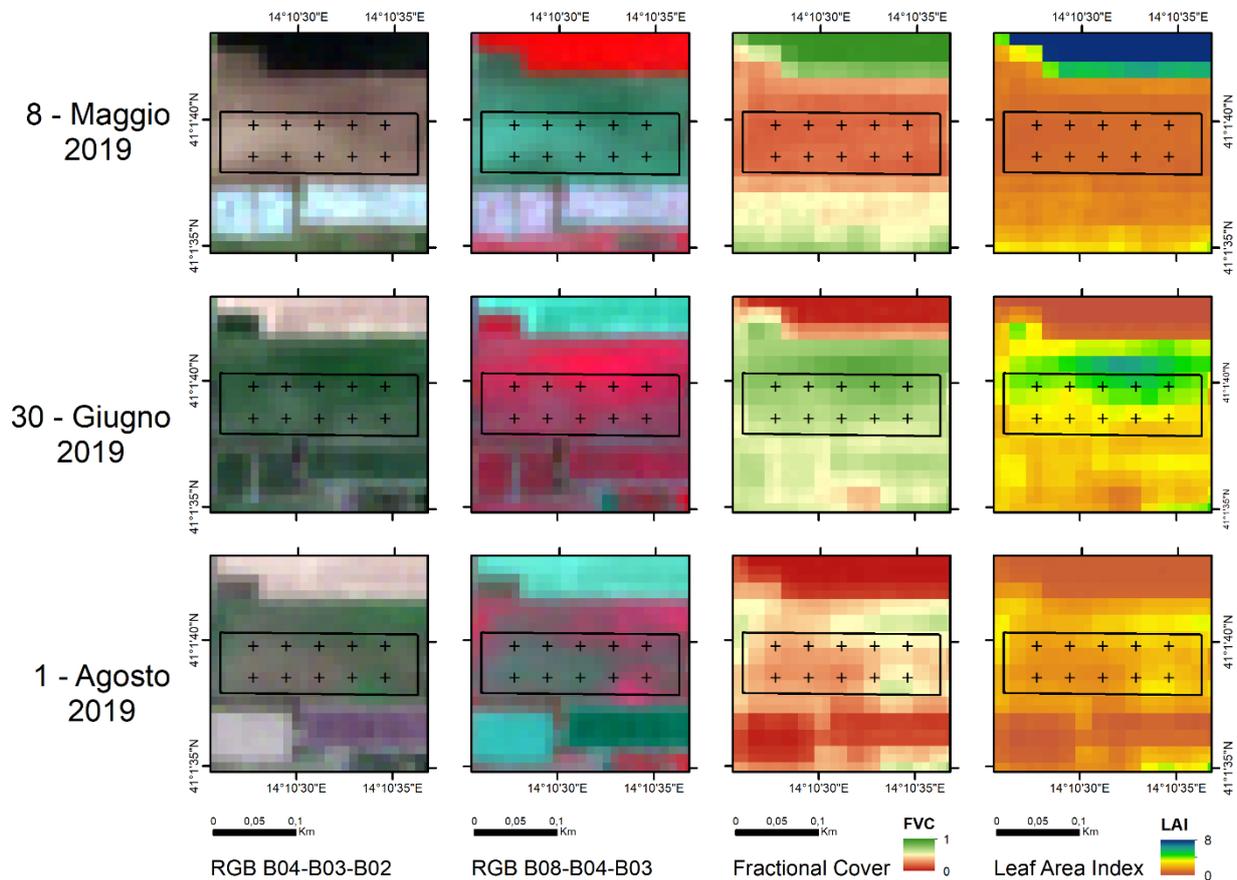


Figura 14. Serie temporali di Sentinel-2 nei colori naturali, falsi colori ed elaborazioni ANN descrittive di f_c e LAI

3.4 Implementazione del modello AquaCrop

In questo studio è stata utilizzata la versione 6.1 del modello AquaCrop.

I dati richiesti per l'implementazione del modello AquaCrop sono: i dati meteorologici, i parametri colturali, il tipo di suolo, la modalità di gestione dell'irrigazione e le pratiche agronomiche adottate in campo.

I dati meteorologici richiesti dal modello, per la calibrazione locale, sono valori giornalieri di temperatura massima e minima ($^{\circ}\text{C}$), umidità relativa massima e minima (%), radiazione solare ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{g}$), velocità del vento misurata a 2 metri dal terreno (m/s) e precipitazioni (mm). I dati meteorologici sono stati acquisiti dalla stazione di San Marco Evangelista del Centro Funzionale Multirischi della Regione Campania.

I dati relativi al terreno richiesti da AquaCrop sono: struttura del suolo, capacità di campo, punto di appassimento permanente, conduttività idraulica satura (Ksat) e contenuto volumetrico di acqua a saturazione (θ_{sat}). Il sito dell'esperimento è caratterizzato da un terreno di medio impasto e non presenta strati di terreno impervi tali da ostacolare lo sviluppo radicale. Tutti parametri utilizzati sono stati ricavati da analisi del terreno effettuati su campioni di suolo prelevati dall'area sperimentale (V. Tabella 3).

La Tabella 4 elenca i parametri del modello che definiscono le diverse fasi fenologiche della coltura e di grado di copertura. Alcuni parametri sono stati assunti pari a quelli consigliati dalla letteratura allegata al modello AquaCrop; altri parametri, quali il grado di copertura massimo, durata delle fasi fenologiche (data e durata della fioritura, inizio della senescenza, maturità) sono stati calibrati sulla base dei rilievi in campo delle rispettive date di occorrenza e sono coerenti con le indicazioni del conduttore aziendale sulla base della propria esperienza con questa cultivar. Si è assunto inoltre che l'orizzonte di suolo esplorato dalle radici cresce da un valore minimo iniziale di 30 cm ad un valore massimo di 100 cm, secondo la legge di crescita standard proposta da AquaCrop in funzione delle somme termiche giornaliere.

Tabella 4. Parametri colturali.

Parametri colturali	Unità di misura	Valore	Nota
Fioritura	GDD	437	C
Durata fioritura	GDD	416	C
Length building up HI	GDD	801	D
Inizio senescenza	GDD	1050	C
Maturità	GDD	1316	C
Massima sviluppo delle radici	GDD	341	D
Copertura iniziale	%	0.6	D
Massima copertura	%	70	C
Reference HI	%	50	D
Temperatura basale	°C	10	D

GDD (growing degree days) somme termiche; D = parametri di default; C = parametri calibrati; M= calcolato dal modello

3.4 Scenari irrigui simulati

Il modello è stato implementato impostando la tecnica di microirrigazione, con un grado di umettamento del suolo pari al 30%. Sono stati quindi simulati due scenari irrigui:

- Uno ottenuto imponendo un'altezza di irrigazione pari a 15 mm (pari a circa il valore medio delle altezze di irrigazione adottate dal conduttore) ogni volta che il contenuto d'acqua nel

suolo risulta inferiore al 50% del volume immediatamente disponibile per le piante (quest'ultima assunta a sua volta pari al 50% dell'acqua totale disponibile);

- L'altro ottenuto attraverso una procedura di assimilazione sequenziale del grado di copertura stimato da satellite.

Nel secondo scenario, il grado di copertura (f_c) stimato da Sentinel-2 è stata assimilato sequenzialmente in AquaCrop, mediante inserimento diretto, sostituendo i valori del grado di copertura della coltura simulati dal modello. L'inserimento diretto sequenziale viene applicato nel presupposto che il continuo aggiornamento basato su osservazioni da remoto possa ridurre le semplificazioni apportate dal modello ai processi e alle condizioni ambientali che influenzano le dinamiche di crescita delle colture.

Gli scenari irrigui simulati sono confrontati con quelli adottati dal conduttore, secondo il programma irriguo illustrato nella Tabella 5.

Tabella 5: Programma irriguo adottato dal conduttore

Data	Altezza di irrigazione (mm)
22/04/2019	5.2
27/04/2019	12.7
02/06/2019	7.3
07/06/2019	8.35
11/06/2019	9.5
15/06/2019	13.6
22/06/2019	15.1
24/06/2019	9.3
28/06/2019	13.65
01/07/2019	11.85
03/07/2019	15.95
06/07/2019	20.45
09/07/2019	8.25
12/07/2019	17.325
15/07/2019	14.35
17/07/2019	19.55
20/07/2019	5.25
23/07/2019	10.05
26/07/2019	11.5

4. Risultati

4.1 Condizioni meteorologiche e andamento della coltura

Il 2019 è stato caratterizzato da una primavera con temperature più basse della norma e, soprattutto, con piogge molto abbondanti e frequenti. Le precipitazioni piovose più intense sono state registrate nel mese di maggio.

La Figura 15 illustra la pioggia e la evapotraspirazione di riferimento (ET_o), calcolata secondo il quaderno FAO 56, cumulate a partire dalla data di impianto del 8 aprile alla data di raccolta del 5 agosto 2020. La pioggia cumulata ha raggiunto un valore di 240 mm il 2 giugno: si tratta di un valore eccezionale per il periodo. L'eccezionalità delle condizioni meteorologiche è evidenziata dal fatto che l'ET_o cumulata ha superato la pioggia cumulata solo l'11 giugno.

La curva l'ET_o cumulata ha un netto cambio di pendenza il 5 giugno, che demarca due periodi molto diversi dal punto di vista meteorologico: il primo fino al 5 giugno con una ET_o media giornaliera pari di 3.5 mm/giorno, il secondo dopo il 5 giugno, con una ET_o media giornaliera pari di 6 mm/giorno. L'ET_o cumulata al 5 agosto è stata di 574 mm, contro i 249 mm di pioggia nello stesso periodo.

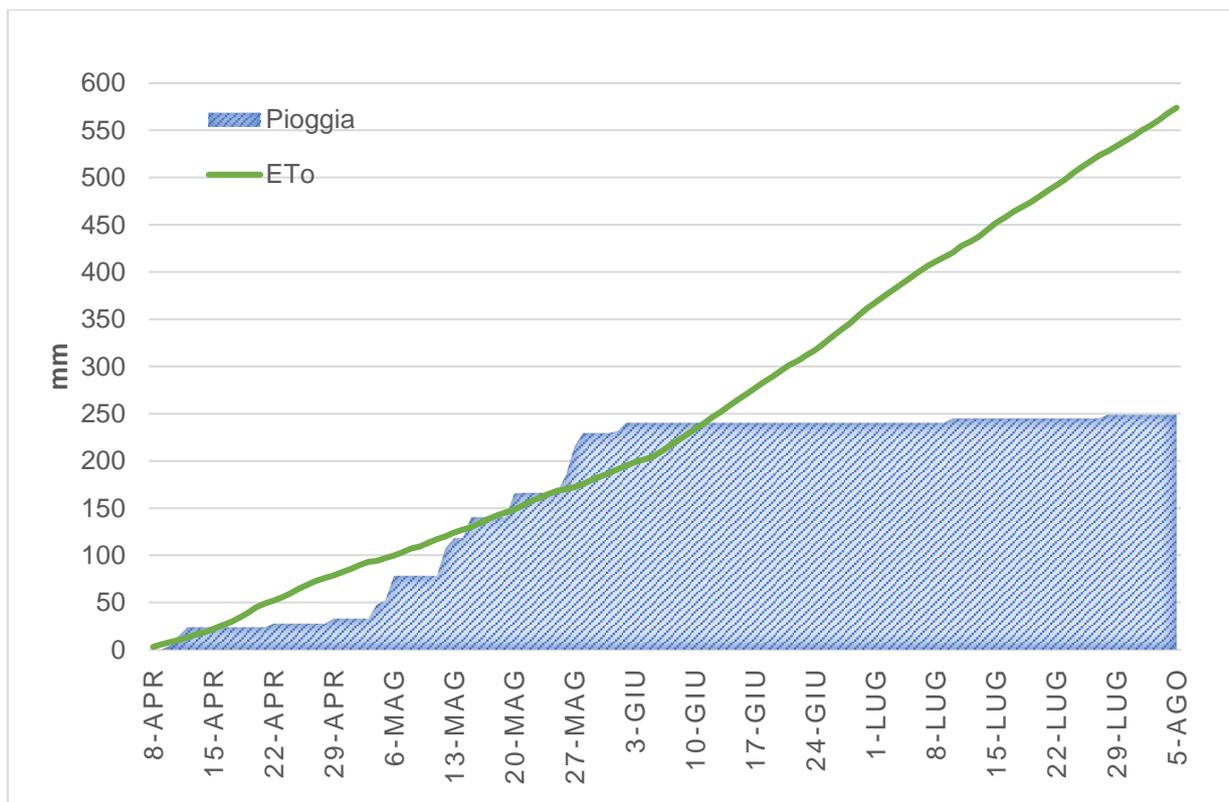


Figura 15. Pioggia ed evapotraspirazione di riferimento cumulate dalla data di impianto alla data di raccolta.

Queste particolari condizioni meteorologiche non sono state favorevoli dal punto di vista agronomico. Sono stati riscontrati ristagni in alcune zone del campo e lesioni alle foglie delle piantine, colpite da alcuni eventi grandine. Al fine di prevenire eventuali attacchi parassitari, facilitati dalle lesioni, il

conduttore dell'azienda è intervenuto con fungicidi ad azione preventiva e curativa a base rameica. Nel corso del ciclo colturale sono stati utilizzati in fertirrigazione concimi organo minerali azotati e azotato-potassici per favorire lo sviluppo delle piante e dell'apparato radicale.

Nonostante questi interventi agronomici, è stato registrato un ritardo nello sviluppo della coltura con conseguente calo della produzione totale. L'azienda ha registrato una produzione totale di 90 ton/ha, 4,5 ton/ha come resa secca, stimata empiricamente considerando il 95% di umidità del frutto di pomodoro.

4.2 Verifica delle stime dei parametri colturali da satellite

La Tabella 6 illustra le date dei passaggi dei satelliti Sentinel-2A e Sentinel-2B. La parcella irrigua oggetto di studio è visibile da due orbite (la n. 122 e la n. 79), con una frequenza media di osservazione di 3 giorni. Tuttavia, come evidenziato nella Tabella 6, nel mese di maggio molte immagini sono risultate coperte da nuvole e come tali inutilizzabili a fini delle stime dei parametri colturali. Le celle della Tabella 6 colorate di giallo indicano le date in cui sono state eseguiti rilievi in campo per la verifica delle stime dei parametri colturali da satellite, come sarà spiegato nei sotto paragrafi seguenti

Tabella 6: Calendario delle date di osservazione con satelliti i Sentinel-2A e Sentinel-2B, con le due orbite 79 e 122. Le celle grigie indicano le date con copertura nuvolosa. Le celle gialle indicano le date in cui sono stati eseguiti riscontri in campo.

S-2A_079	S-2A_122	S-2B_079	S-2B_122
28/04/2019	01/05/2019	03/05/2019	06/05/2019
08/05/2019	11/05/2019	13/05/2019	16/05/2019
18/05/2019	21/05/2019	23/05/2019	26/05/2019
28/05/2019	31/05/2019	02/06/2019	05/06/2019
07/06/2019	10/06/2019	12/06/2019	15/06/2019
17/06/2019	20/06/2019	22/06/2019	25/06/2019
27/06/2019	30/06/2019	02/07/2019	05/07/2019
07/07/2019	10/07/2019	12/07/2019	15/07/2019
17/07/2019	20/07/2019	22/07/2019	25/07/2019
27/07/2019	30/07/2019	01/08/2019	04/08/2019
06/08/2019	09/08/2019	11/08/2019	14/08/2019
16/08/2019	19/08/2019	21/08/2019	24/08/2019
26/08/2019	29/08/2019	31/08/2019	03/09/2019

4.2.1 Verifica del grado di copertura

La Figura 16 illustra i dati di copertura stimati con l'analisi delle foto delle immagini acquisite in campo con il Canopeo, e gli analoghi dati stimati da satellite, quest'ultimi solo per le date più

prossime a quelle rilevate in campo. Nella figura, i simboli indicano il valore medio mentre le barre indicano il valore minimo e massimo registrato presso ciascuna delle 10 paline.

È interessante notare la corrispondenza dei valori medi nel periodo di maggior sviluppo della copertura (21 giugno e 8 luglio). Apparentemente, le analisi delle foto dirette in campo eseguite con il Canopeo tendono a fornire dei valori mediamente più bassi nel periodo di senescenza. Altro aspetto da rilevare, tuttavia, è la maggiore variabilità dei valori acquisiti con le foto in campo. Questo può essere spiegato dal fatto che i dati da Canopeo sono affetti dalla variabilità di piccola scala, che sono necessariamente mediate dalle immagini satellitari, avente una risoluzione minima di 10 metri.

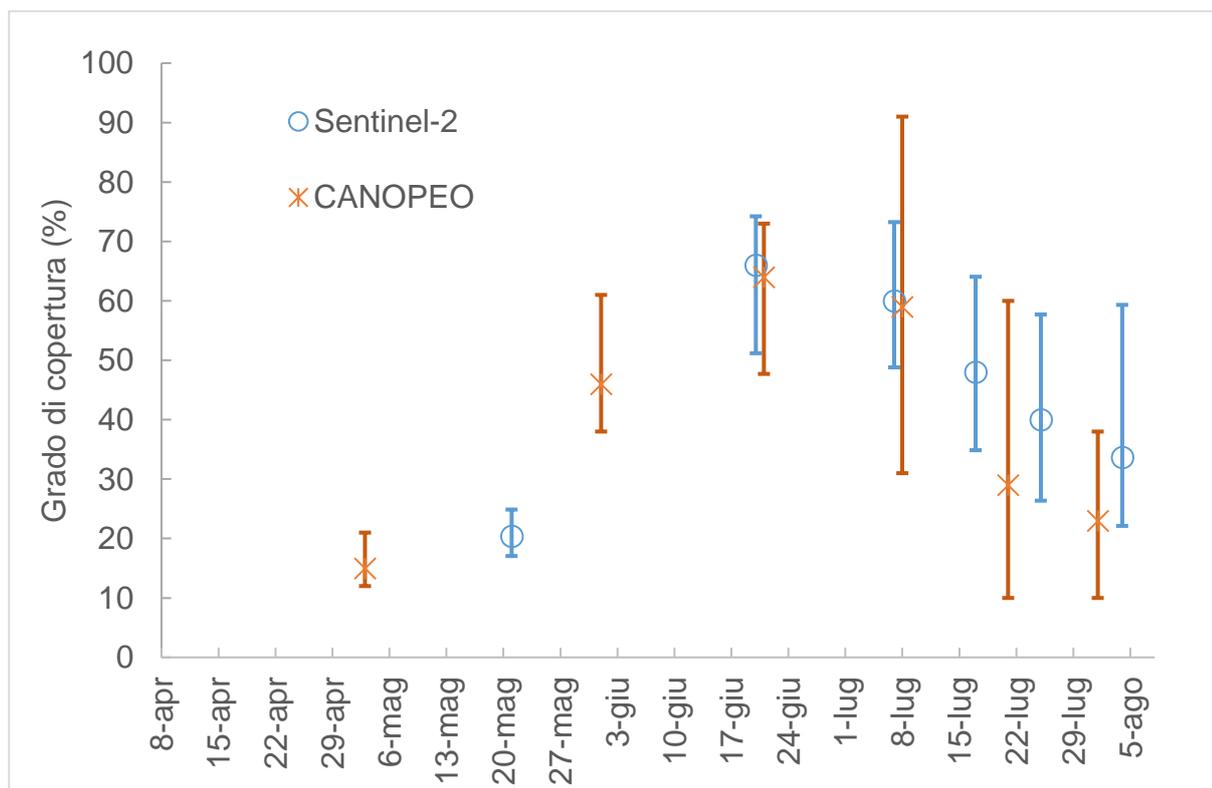


Figura 16. Grado di copertura stimato dalla analisi delle foto in campo eseguite con l'applicazione Canopeo e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2. I simboli indicano i valori medi, mentre le barre i valori minimi e massimi, calcolati su dieci valori, corrispondenti alle 10 paline di riferimento.

4.2.2 Verifica dell'indice di area fogliare (LAI)

A causa di un malfunzionamento del Plant Canopy Analyzer LAI-2000 della Licor, solo 5 campagne di rilievo del LAI in campo sono state completate con successo. La Figura 17 illustra i dati di LAI rilevati in campo e quelli stimati da satellite, quest'ultimi solo per le date più prossime a quelle rilevate in campo. La simbologia è identica a quella utilizzata per il grado di copertura.

Anche in questo caso vi è una buona corrispondenza tra i valori osservati in campo e i valori stimati da satellite, con leggere sovrastime dei dati di campo nel periodo di senescenza dei valori medi nel periodo di maggior sviluppo della copertura, come riscontrabile il 25 giugno e 5 luglio. Maggiori

differenze si registrano nelle verifiche fatte immediatamente prima (20 giugno) e dopo (27 luglio). Le differenze fra i valori medi sono comunque inferiori a 0.5 e i valori medi rientrano nei rispettivi intervalli di incertezza.

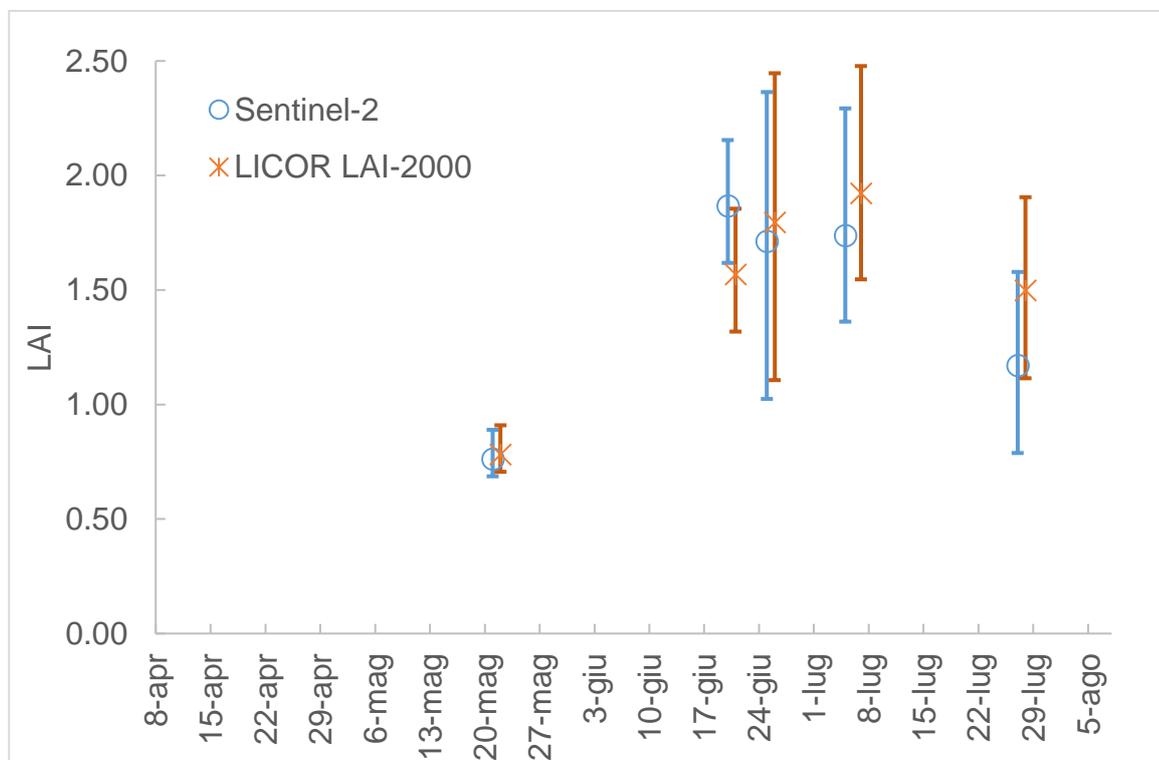


Figura 17. Indice di area fogliare (LAI) misurato in campo con il LAI-2000 della LICOR e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2. I simboli indicano i valori medi, mentre le barre i valori minimi e massimi, calcolati su dieci valori, corrispondenti alle 10 paline di riferimento.

4.2.3 Verifica del contenuto di clorofilla delle foglie

Per ottenere valori di contenuto di clorofilla nelle foglie (LCC, leaf chlorophyll content) a partire dai valori SPAD è stata preliminarmente utilizzata l'equazione standard proposta in letteratura per tutti i tipi di coltura (Delegido J., 2014):

$$LCC (\mu\text{g cm}^{-2}) = 0.021752 \text{ SPAD}^{2.1129} \quad (11)$$

La relazione tra LCC e SPAD è stata successivamente calibrata con misure dirette eseguite su campioni di foglie presso il Laboratorio di Agronomia del Dipartimento di Agraria. La Figura 18 mostra che vi è un bias tra i valori sperimentali di LCC e quelli ottenuti con l'Equazione (11) di circa $30 \mu\text{g cm}^{-2}$. I dati sperimentali di laboratorio sono stati quindi utilizzati per ricavare una legge di regressione lineare per la stima di LCC dai dati di SPAD applicabile al caso specifico.

Come evidenziato anche nella Figura (18), l'equazione ricavata è la seguente:

$$LCC (\mu\text{g cm}^{-2}) = 2.2203 \text{ SPAD} - 54.12 \quad (12)$$

La validità dell'Equazione (12) è limitata all'intervallo di valori di SPAD per la quale è stata ricavata.

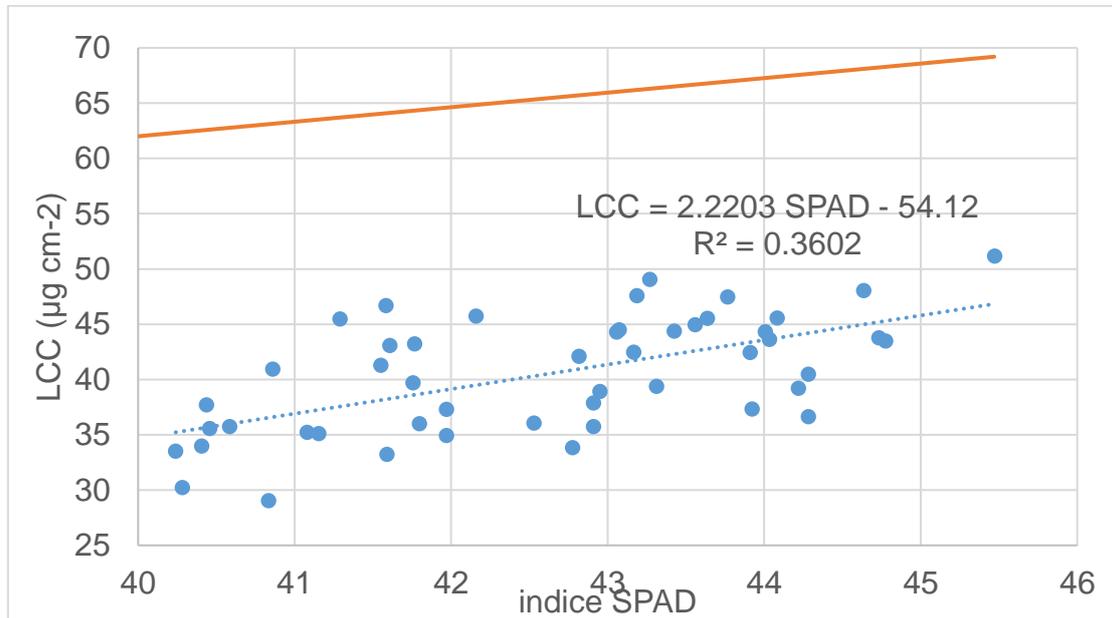


Figura 18. Correlazione tra contenuto di clorofilla delle foglie (LCC) e misure di SPAD, sulla base di prove di laboratorio

Ai fini del confronto con il dato satellitare, è stata ricavata la stima del contenuto di clorofilla delle foglie per unità di superficie della chioma (CCC, canopy chlorophyll content) moltiplicando le stime di LCC (contenuto di clorofilla per unità di superficie della foglia) ottenute dalle misure di SPAD con l'Equazione (12) per le misure eseguite con il LAI-2000 della LICOR dell'indice di area fogliare di LAI (rappresentativa della superficie fogliare totale per unità di superficie della chioma):

$$CCC (\mu\text{g cm}^{-2}) = \text{LAI} \cdot LCC \quad (13)$$

La Figura 19 illustra i dati di CCC stimati applicando le Equazioni (12-13) ai dati di SPAD in campo e i dati analoghi stimati da satellite, quest'ultimi solo per le date più prossime a quelle rilevate in campo. La simbologia è identica a quella utilizzata nelle precedenti Figure 16-17. La notevole sovrastima del CCC da satellite rispetto al dato di campo nei giorni 20 e 25 giugno è attribuita alla presenza di molte infestanti, sviluppatasi subito dopo il periodo piovoso e non ancora rimosse. La presenza di infestanti potrebbe aver determinato una sovrastima del dato medio integrale del satellite alla scala di pixel, rispetto alle misure di campo che sono state invece calibrate sulle sole piante di pomodoro.

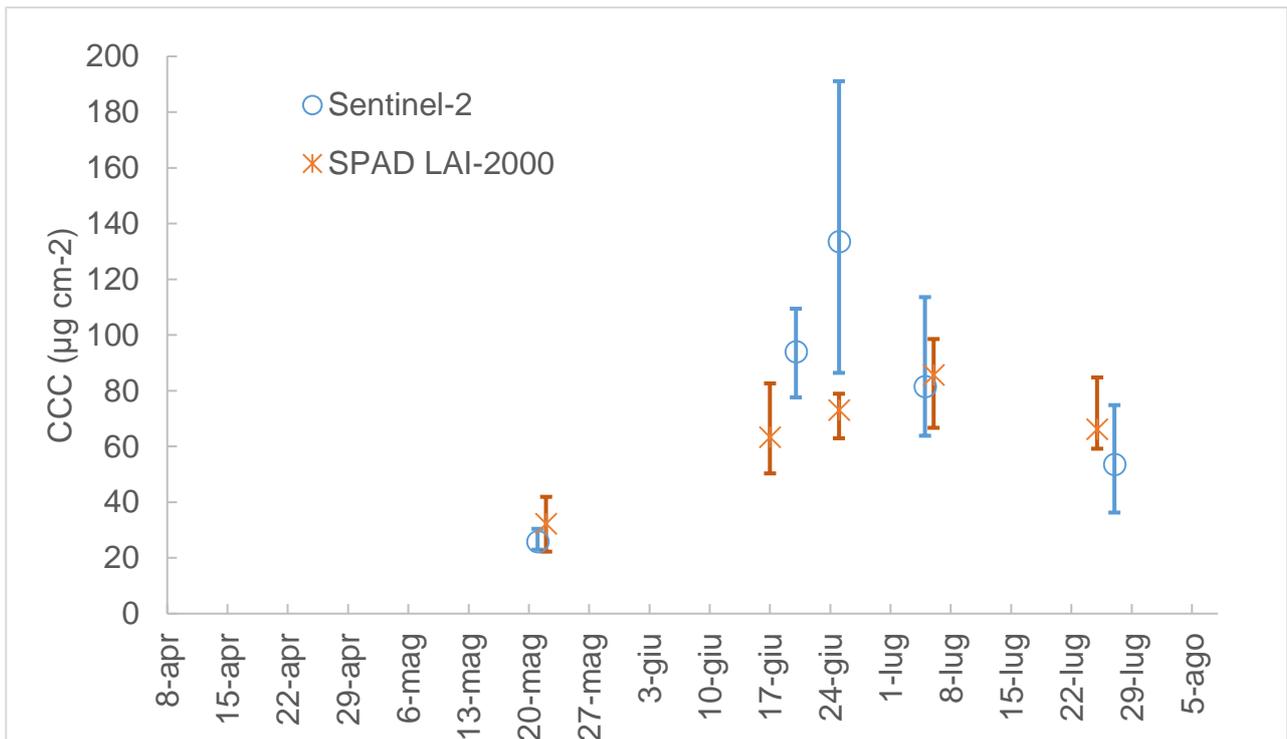


Figura 19. Confronto tra il contenuto di clorofilla della chioma (CCC) stimato utilizzando i dati in campo di LAI ottenuti con il LAI-2000 della LICOR e lo SPAD, e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2. I simboli indicano i valori medi, mentre le barre i valori minimi e massimi, calcolati su dieci valori, corrispondenti alle 10 paline di riferimento.

4.3 Verifica delle previsioni del modello AquaCrop

La Figura 20 mostra l'andamento del grado di copertura ottenuto con due diversi scenari di simulazione:

- Simulazione con il modello AquaCrop calibrato per la specifica cultivar,
- Simulazione con il modello AquaCrop, con assimilazione sequenziale delle stime del grado di copertura ottenute con i satelliti della costellazione Sentinel-2.

Nelle prime fasi di sviluppo, tra il 20 maggio e il 10 giugno, mancano le stime da satellite utili per una correzione più efficace del grado di copertura. I dati mostrano chiaramente che il grado di copertura stimato dal modello è più alto di quello da satellite, tuttavia l'occorrenza delle misure (all'inizio e alla fine del periodo di sviluppo) è tale da non permettere una efficace correzione delle previsioni di crescita. Più efficace l'effetto della correzione subito dopo la fioritura (8 luglio) e nella fase di senescenza.

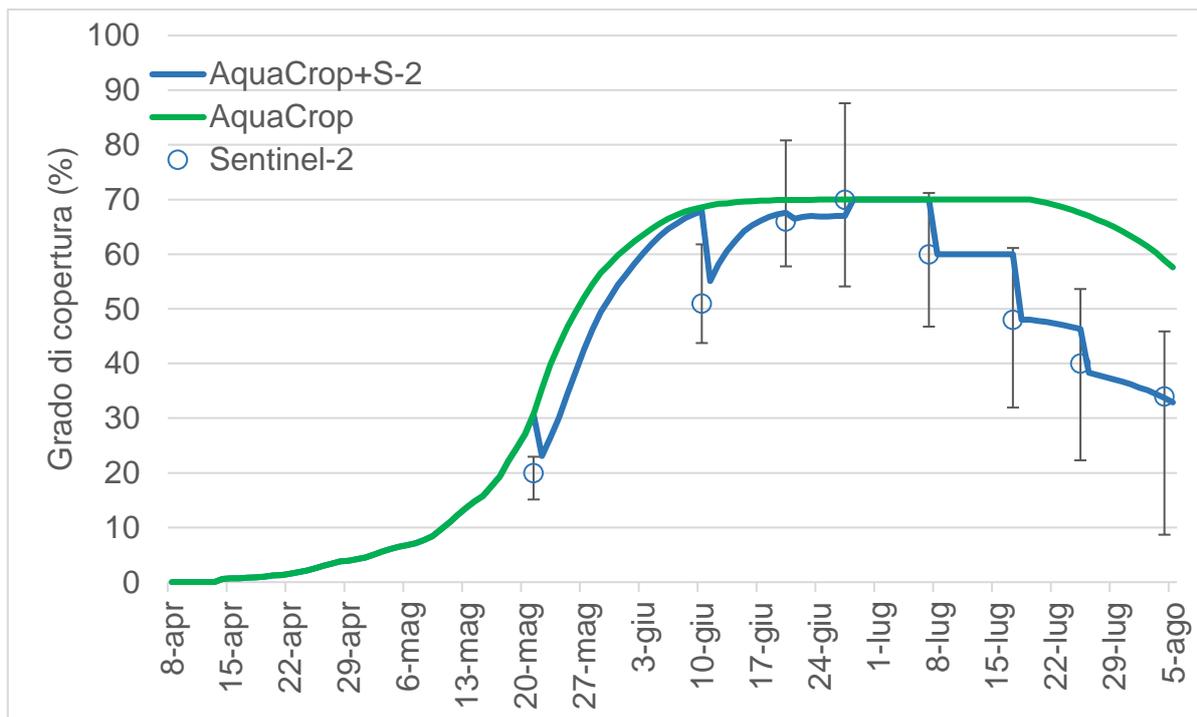


Figura 20. Confronto tra il contenuto di clorofilla della chioma (CCC) stimato utilizzando i dati in campo di LAI ottenuti con il LAI-2000 della LICOR e lo SPAD, e quelle stimate dalle immagini Sentinel-2. I simboli indicano i valori medi, mentre le barre i valori minimi e massimi, calcolati su dieci valori, corrispondenti alle 10 paline di riferimento.

Al fine di comprendere meglio le simulazioni del modello AquaCrop relativamente al fabbisogno idrico della coltura e alla corrispondente programmazione irrigua, è stata esaminata la ripartizione della pioggia totale risultante dal modello di bilancio idrico nel suolo adottato da AquaCrop nelle tre componenti:

- Ruscellamento superficiale;
- Drenaggio profondo;
- Pioggia netta utile a soddisfare la domanda evapotraspirativa.

La Figura 21 mostra la ripartizione della pioggia cumulata, attraverso le linee in pila. La figura è stata disegnata con i risultati ottenuti con l'assimilazione dei dati satellitari; tuttavia i risultati senza assimilazione non sono diversi a tale riguardo, come sarà meglio spiegato dopo.

Al 2 giugno, la pioggia netta accumulata nel suolo e resa disponibile per le piante risulta pari a circa 130 mm. Quindi, dei 240 mm totali, circa 110 mm sono andati persi per drenaggio e ruscellamento superficiale. Nelle successive figure, la pioggia netta è stata presa in esame ai fini dell'analisi delle diverse componenti di bilancio, ed in particolare nel raffronto con l'evapotraspirazione effettiva simulata da AquaCrop e con i volumi di irrigazione misurati, simulati da AquaCrop e consigliati da IRRISAT.

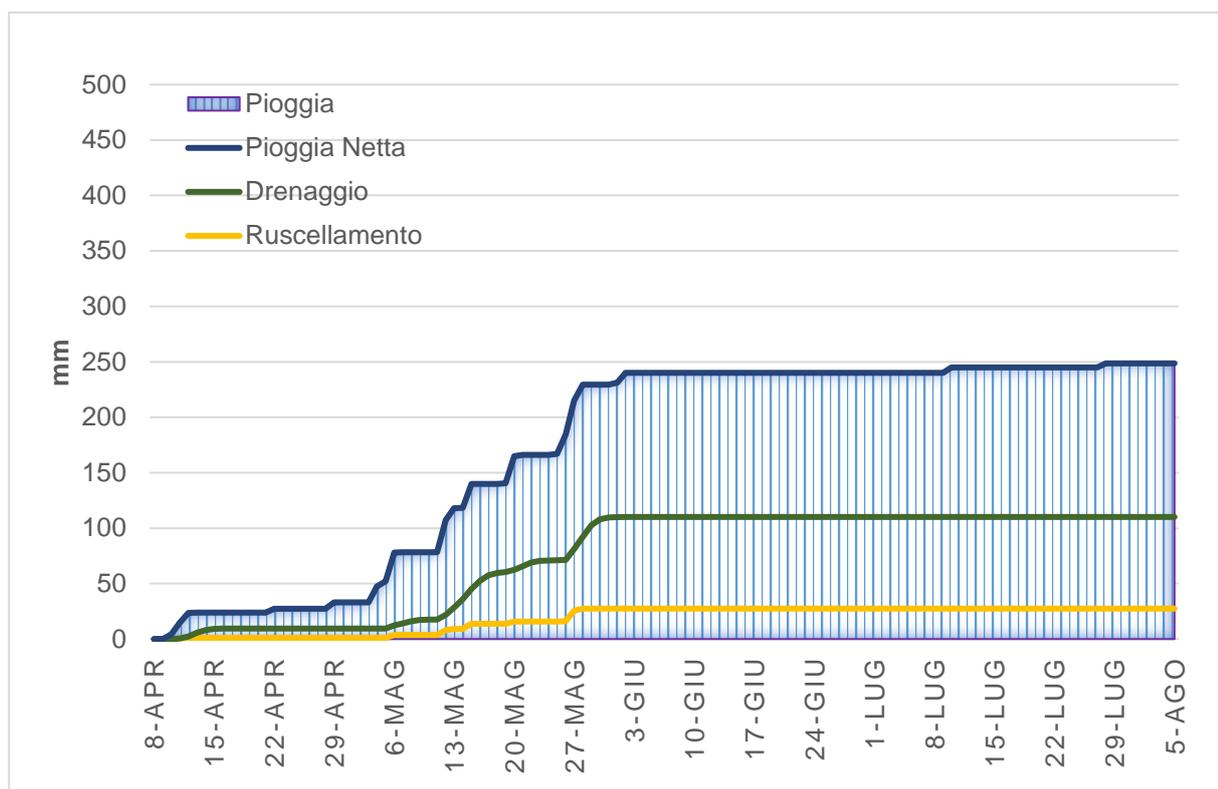


Figura 21. Partizione della pioggia totale in pioggia netta utile a soddisfare la domanda evapotraspirativa, drenaggio profondo e ruscellamento superficiale: i valori delle linee sono disegnate in pila.

La Figura 22 illustra l'evapotraspirazione cumulata della coltura ET_c secondo AquaCrop nei due scenari di simulazione, confrontata con i valori cumulati di pioggia netta, l'evapotraspirazione potenziale della coltura secondo IRRISAT (con i rispettivi intervalli di incertezza) e la variazione dell'acqua immagazzinata nel suolo nell'orizzonte esplorato dalle radici. A tal riguardo, si rammenta che la programmazione irrigua in AquaCrop è stata simulata adottando un valore di soglia inferiore pari a 280 mm con eventi irrigui di 15 mm.

Secondo il modello AquaCrop, la domanda evapotraspirativa è soddisfatta fino al 10 giugno con altezza di acqua nel suolo superiori a 280 mm; l'irrigazione risulta quindi necessaria dopo il 10 giugno. Le differenze tra i due scenari di simulazione risultano significativi solo dopo la fioritura e nella senescenza in particolare, come era prevedibile dai dati simulati relativi al grado di copertura.

L'evapotraspirazione potenziale (ET_p) stimata da IRRISAT è più bassa di ET_c secondo AquaCrop. I valori cumulati alla data del raccolto sono: ET_c di AquaCrop 493 mm; ET_c di AquaCrop con assimilazione 435 mm; ET_p di IRRISAT 350 mm. Le maggiori differenze tra ET_c e ET_p a scala giornaliera si registrano nelle prima fasi di sviluppo della coltura, quando il grado di copertura è ancora relativamente basso. A tal riguardo occorre evidenziare che IRRISAT, diversamente da AquaCrop, non simula esplicitamente l'evaporazione dal suolo nudo. Secondo l'approccio "big-leaf" adottato da IRRISAT, il campo è assunto come un unico sistema omogeneo, con un grado di sviluppo

della copertura vegetale unicamente definito dal LAI cui è associato un univoco valore della resistenza della coltura al processo evapotraspirativo.

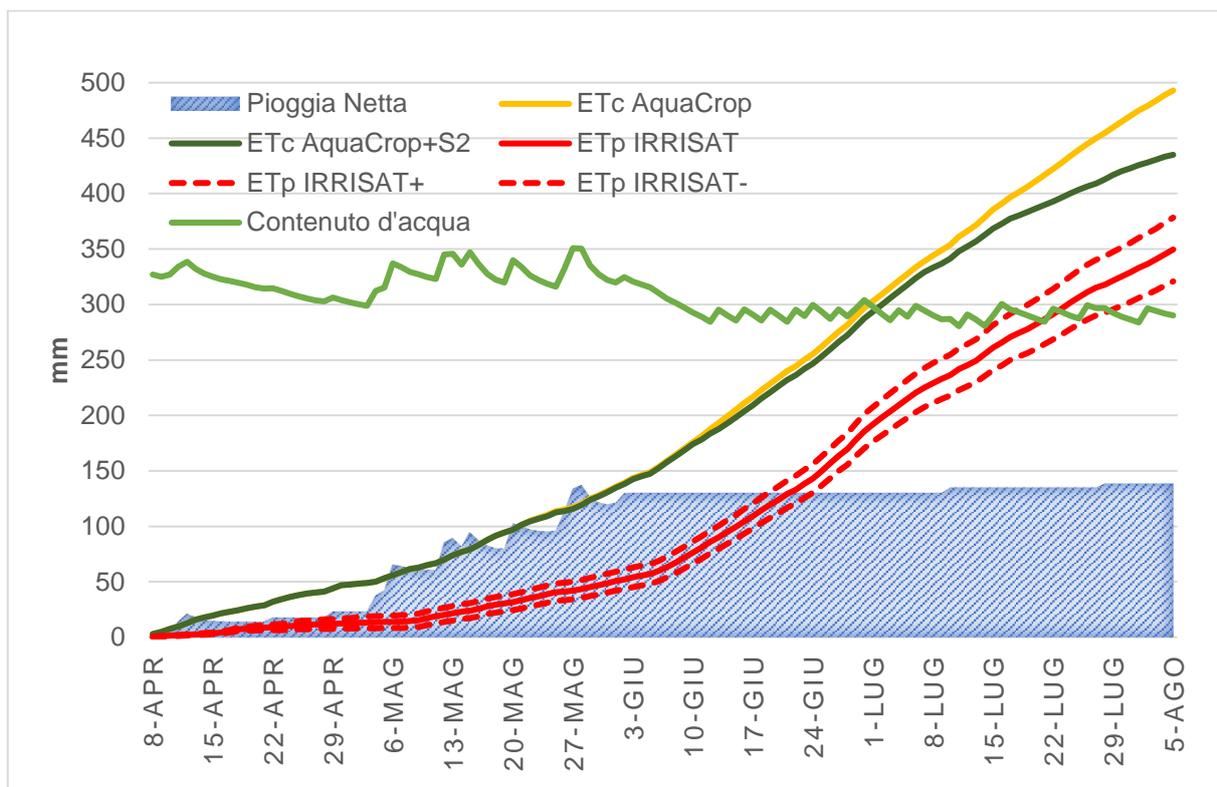


Figura 22. Evapotraspirazione cumulata della coltura ET_c secondo AquaCrop nei due scenari di simulazione, confrontata con i valori cumulati di pioggia netta, l'evapotraspirazione potenziale della coltura secondo IRRISAT (con i rispettivi intervalli di incertezza) e la variazione dell'acqua immagazzinata nel suolo nell'orizzonte esplorato dalle radici.

Tuttavia, nelle fasi iniziali di sviluppo della coltura, in particolare in un impianto per file binate come quello in esame, vi sono ampie superfici di suolo nudo, per cui la stima dell'evapotraspirazione potenziale della coltura secondo IRRISAT non è assimilabile all'evapotraspirazione effettiva complessiva media alla scala di campo, anche in assenza di condizioni stress. In termini numerici, la differenza tra ET_c di AquaCrop e ET_p di IRRISAT è particolarmente marcata in questo caso specifico di studio, caratterizzato da piogge copiose nei giorni immediatamente dopo l'impianto, prima della completa copertura del suolo. Le Figure 23 e 24 illustrano rispettivamente l'andamento dei valori di ET_c cumulati e giornalieri, con la relativa ripartizione nella componente evaporativa (E) e traspirativa (Tr), nello scenario di Aquacrop con assimilazione del dato satellitare. Fino al 27 maggio, in ET_c prevale la componente evaporativa dal suolo, che nel caso specifico è particolarmente elevata per effetto delle copiose piogge che assicurano un umettamento uniforme degli orizzonti superficiali di suolo.

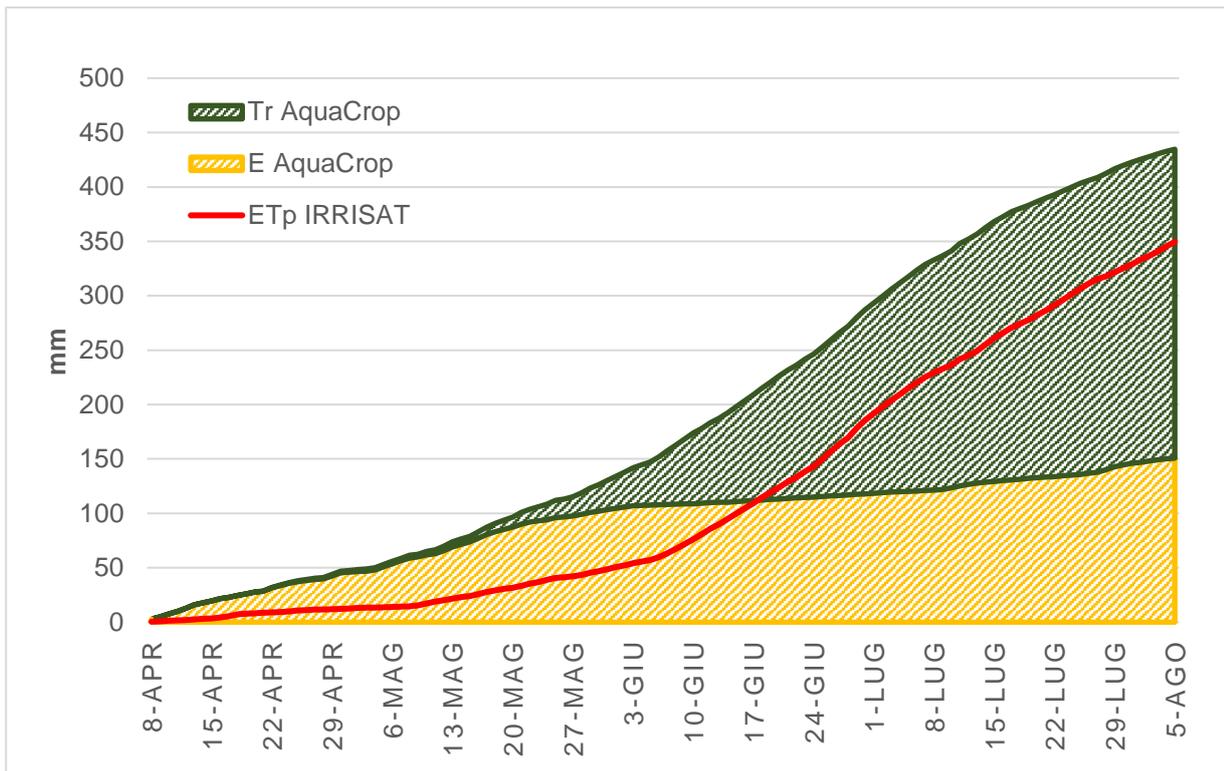


Figura 23. Evapotraspirazione cumulata della coltura ET_c , ripartita nella componente evaporativa (E) e traspirativa (Tr), e evapotraspirazione potenziale ET_p secondo IRRISAT.

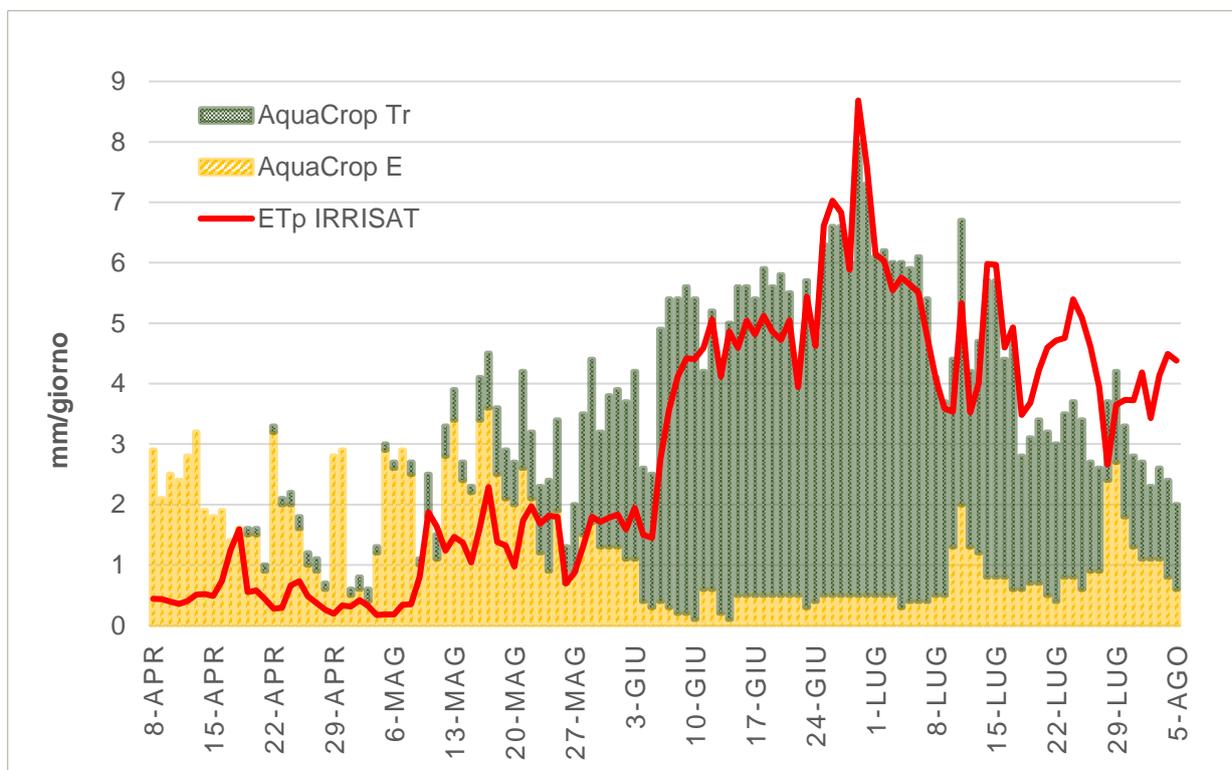


Figura 24. Valori giornalieri di evapotraspirazione della coltura ET_c , ripartita nella componente evaporativa (E) e traspirativa (Tr), e evapotraspirazione potenziale ET_p secondo IRRISAT.

Dopo il 27 maggio, ovvero dopo gli ultimi eventi di pioggia significativi, la componente di evaporazione dal suolo si riduce rapidamente, mentre diventa prevalente la componente traspirativa, con valori del grado di copertura superiori al 50%. In questa fase, il dato ET_p di IRRISAT resta basso rispetto a ET_c anche perché la procedura IRRISAT non dispone di dati aggiornati sulla copertura, mentre AquaCrop simula gradi di sviluppo della coltura superiori a quelli stimati da satellite. Nel periodo di maturità la differenza tra le stime di ET_c e ET_p sono molto piccole. Attesa l'indipendenza delle due stime, questo risultato conferma la validità della procedura IRRISAT, nei casi in cui l'evaporazione diretta dal suolo sia trascurabile. Nella fase di senescenza le stime di ET_p di IRRISAT tendono ad essere superiori ad ET_c secondo AquaCrop. Questo risultato può essere spiegato col fatto che AquaCrop adotta dei fattori correttivi in diminuzione dell'evapotraspirazione della coltura in senescenza, mentre ET_c IRRISAT si basa soltanto sul dato della chioma, indipendentemente da considerazioni di carattere fenologico.

Le ultime due figure analizzano i risultati in termini di programmazione irrigua. La Figura 25 confronta i valori cumulati delle altezze di irrigazione secondo il programma irriguo adottato dal conduttore (Irr. Azienda), con quelli relativi ai programmi irrigui simulati con AquaCrop nei due scenari di simulazione: senza assimilazione (Irr. AquaCrop) e con assimilazione (Irr. AquaCrop+S2). Nella stessa figura sono riportati le altezze di irrigazione secondo IRRISAT, dell'evapotraspirazione ET_c simulata con l'assimilazione e della pioggia netta.

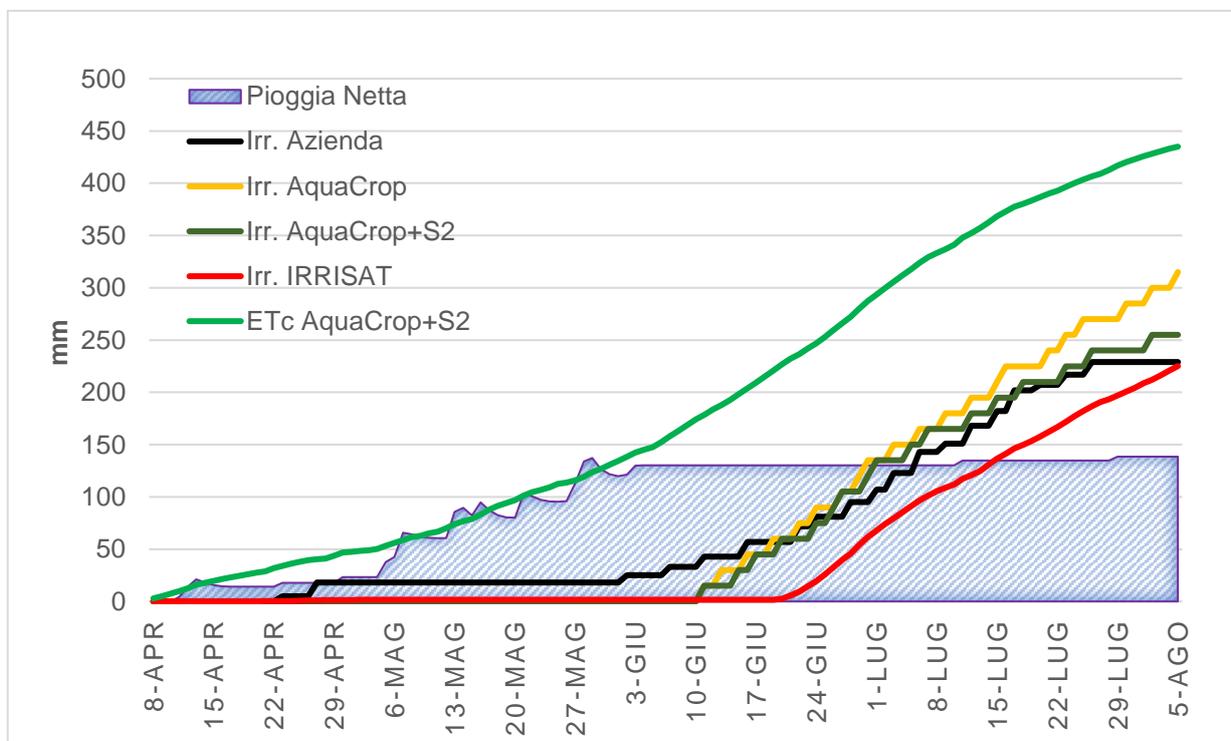


Figura 25. Altezze di irrigazione cumulate, secondo: il programma irriguo aziendale (Irr. Azienda); AquaCrop senza assimilazione (Irr. AquaCrop) e con assimilazione (Irr. AquaCrop+S2); consiglio irriguo IRRISAT (Irr. IRRISAT).

Per agevolare l'interpretazione dei risultati, sono stati rappresentate nella Figura 26 le altezze di irrigazione nell'intervallo 10 giugno – 5 agosto.

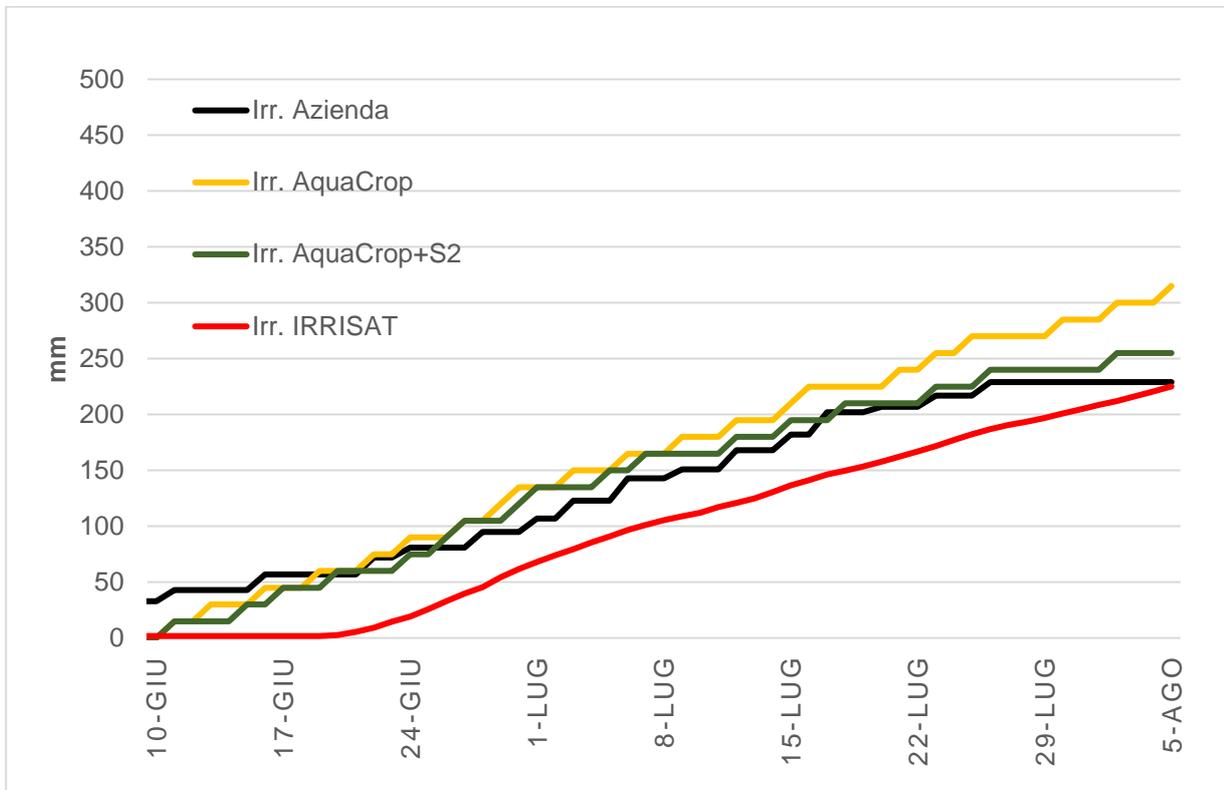


Figura 26. Altezze di irrigazione cumulate, secondo: il programma irriguo aziendale (Irr. Azienda); AquaCrop senza assimilazione (Irr. AquaCrop) e con assimilazione (Irr. AquaCrop+S2); consiglio irriguo (Irr. IRRISAT).

L'azienda ha avviato l'irrigazione al termine delle piogge al 3 giugno, con due interventi irrigui a scopo agronomico, anticipando gli interventi irrigui di una settimana circa rispetto a quanto previsto da AquaCrop. Nel periodo di sviluppo fino alla fioritura, AquaCrop calcola un fabbisogno irriguo di circa 30 mm superiore a quello adottato dall'azienda. Come già visto per l' ET_c , e differenze maggiori tra i due scenari di irrigazione simulati da AquaCrop si registrano dopo la fioritura e nella senescenza, quando più marcato è l'effetto correttivo indotto dall'assimilazione delle immagini satellitari. Gli scenari di irrigazione simulati con l'assimilazione convergono su quelli adottati dall'azienda, a meno dell'ultimo periodo di due settimane in cui l'azienda arresta l'irrigazione per migliorare la qualità delle bacche. IRRISAT ritarda di fatto il periodo irriguo, per effetto di una sottostima delle perdite evapotraspirative dal suolo dopo il 27 maggio, come già anticipato nel commento delle Figure 23 e 24. Nella fase di maturità le stime di fabbisogno irriguo di IRRISAT sono comparabili con le altezze di irrigazione adottate dall'azienda ET_p e quelle di AquaCrop con assimilazione. Nella fase di

senescenza IRRISAT suggerisce invece altezze di irrigazione superiori a quelle di AquaCrop con assimilazione e a quelle adottate dall'azienda.

La Tabella 7 riassume alcune statistiche complessive alla data della raccolta. La coincidenza delle altezze di irrigazione stimate da IRRISAT con quelle aziendali è risultato di una combinazione di una sottostima delle fasi iniziali e una sovrastima nelle fasi finali del ciclo colturale da parte di IRRISAT. Pur non essendo stato oggetto specifico di questa tesi la previsione delle rese, la Tabella 7, a puro scopo informativo, riporta anche i seguenti dati relativi alla produzione:

- Resa, espressa in peso biomassa secca per ettaro, nell'ipotesi di 95% di umidità del pomodoro fresco e un harvest index (HI) di Aquacrop pari a 0.5;
- La produttività rispetto all'evapotraspirazione (WP_{ET}), espresso come rapporto tra resa e volume di acqua evapotraspirata;
- La produttività rispetto all'acqua di irrigazione (WP_{IWR}), espresso come rapporto tra resa e volume di acqua di irrigazione.

Tabella 7: Altezze di irrigazione cumulate e simulate, resa e produttività dell'acqua evapotraspirata e dell'acqua di irrigazione

	ETc / ETp (mm)	Irrigazione (mm)	Resa (t/ha)	WP_{ET} (kg/m ³)	WP_{IWR} (kg/m ³)
AquaCrop	493	315	6.0	1.22	1.90
AquaCrop+S2	435	255	5.0	1.15	1.96
IRRISAT	350	225	-	-	-
Azienda	-	226	4.5	-	2.00

5. Conclusioni

Le tecniche di telerilevamento e i modelli agro-idrologici rappresentano utili strumenti per la gestione ottimale delle risorse idriche in agricoltura, in un contesto di cambiamenti climatici e forte competizione per le risorse idriche tra usi diversi.

Questa tesi ha esaminato le potenzialità di questi strumenti applicati al caso di una coltura di pomodoro da industria irrigata mediante un impianto di microirrigazione. A tal riguardo, è stata condotta un'intensa campagna sperimentale, volta ad acquisire dati utili per la verifica delle stime dei parametri colturali e fabbisogni irrigui, ottenuti sia attraverso l'analisi delle immagini multispettrali dei satelliti Sentinel-2A e Sentinel 2B dell'Agenzia Spaziale Europea, sia attraverso il modello agro-idrologico AquaCrop sviluppato dalla FAO.

La stagione irrigua 2019 è stata caratterizzata da piogge significative nel periodo aprile-maggio, determinando condizioni poco favorevoli per lo sviluppo regolare della coltura e certamente anomale anche per sistemi di previsione e monitoraggio come quelli esaminati in questo lavoro.

Lo studio ha confermato che il monitoraggio satellitare è uno strumento affidabile ed economico per la stima da remoto di parametri colturali quali LAI, grado di copertura del suolo da parte della chioma e contenuto di clorofilla nelle chiome. Grazie all'elevata frequenza dei passaggi dei satelliti della costellazione Sentinel-2, è stato possibile acquisire dati sullo sviluppo della coltura anche in un periodo particolarmente nuvoloso come quello di aprile-maggio.

Il servizio di consulenza, IRRISAT, che si basa esclusivamente su immagini satellitari e dati meteorologici, fornisce una stima affidabile del fabbisogno idrico irriguo della coltura, soprattutto nelle fasi di maggior sviluppo del grado di copertura del suolo. Nelle fasi di sviluppo iniziali, con ampie frazioni di suolo nudo, l'evapotraspirazione potenziale stimata da IRRISAT a scala di parcella non riproduce la maggiore domanda evaporativa dal suolo nudo, come invece simulata dal modello AquaCrop. Questo aspetto è stato particolarmente evidente in questa campagna sperimentale, caratterizzata da piogge significative, che hanno soddisfatto la domanda evaporativa delle ampie porzioni di suolo nudo presenti nel periodo iniziale di sviluppo della coltura. In stagioni irrigue ordinarie, con microirrigazioni localizzate lungo le file di impianto, queste perdite evaporative dal suolo sarebbero meno significative.

L'implementazione del modello AquaCrop è certamente più onerosa di IRRISAT, atteso che AquaCrop richiede una quantità di dati di input e di informazioni circa la coltura di gran lunga superiore. Le stime con il modello AquaCrop sono peraltro affette da diverse fonti di incertezza, quali errori nei parametri del modello, nella semplificazione dei processi che sottendono lo sviluppo della coltura e il bilancio idrologico, e nei dati di input. Il modello AquaCrop, pur calibrato per la specifica cultivar, ha fornito dati di crescita e stime di fabbisogno irriguo superiori a quelle effettivamente

osservate in campo. Il modello infatti non è in grado di riprodurre l'effetto di perturbazioni delle condizioni al contorno, che determinano variazioni delle condizioni di crescita rispetto a quelle attese in condizioni meteorologiche ordinarie.

Questo lavoro di tesi ha dimostrato che risultati migliori si possono ottenere combinando in modo ottimale i dati di monitoraggio remoto da satellite con il modello AquaCrop. A tal riguardo, in questo studio è stata implementata una tecnica di assimilazione molto semplice, consistente nella correzione sequenziale del grado di copertura simulato con il dato stimato da satellite. Questa tecnica di assimilazione, pur molto semplice, ha consentito di ottenere stime di crescita e di fabbisogno irriguo più coerenti con quelle riscontrate in campo.

Si può quindi concludere che la messa a punto di tecniche di assimilazione per la combinazione ottimale di dati remoti come quelli derivati dalla costellazione Sentinel-2, e modelli agro-idrologici come AquaCrop, rappresenta la migliore strategia da seguire per lo sviluppo di sistemi di gestione ottimali delle risorse idriche al fine di garantire la sostenibilità dell'agricoltura irrigua.

Bibliografia

- ALEXANDRATOS N. AND BRUINSMA J. (2012). World agriculture: Towards 2030/2050: The 2012 revision.
- ALLEN RG, PEREIRA LS, HOWELL TA AND JENSEN ME (2011) Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management* 98, 899–920.
- AMITOM (2016) (online country-by-country reports). Mediterranean International Association of the Processing Tomato <http://www.amitom.com/> (accessed July 2017).
- ANICAV (2016) Presentation. Associazione Nazionale Industriali Conserve Alimentari Vegetali (National Association of Canned-Vegetable Industries), Naples, Italy. Available at: <http://www.anicav.it/getfile/19800> (accessed 17 May 2018).
- AZAM-ALI, S.N., CROUT, N.M.J., BRADLEY, R.G., 1994. Perspectives in modelling resource capture by crops. In: Monteith, J.L., Unsworth, M.H., Scott, R.K. (Eds.), *Proceedings of the 52nd University of Nottingham Eastern School on Resource Capture by Crops*, Nottingham University Press, pp. 125-148.
- BELLE-GAUCHE, A., CHIFFOLEAU, Y. AND MAFFEZZOLI, C. (2015) Glamur Project Multidimensional Comparison of Local and Global Fresh Tomato Supply Chains. INRA, Montpellier, France.
- BOYHAN, G. AND KELLEY, W.T. (2010) Transplant production. In: *Commercial Tomatoes Production Handbook*. Bulletin 1312. University of Georgia Cooperative Extension, College of Agricultural and Environmental Sciences, Athens, Georgia.
- CAUSSE, M., BURET, M., ROBINI, K. AND VERSCHAVE, P. (2003) Inheritance of nutritional and sensory quality traits in fresh market tomato and relation to consumer preferences. *Journal of Food Science* 68, 2342–2350.
- CHEN Y., ZHANG Z. AND TAO F. (2018). Improving regional winter wheat yield estimation through assimilation of phenology and leaf area index from remote sensing data. *European journal of agronomy*, 101: 163-173.
- CHEN, L., J. ZHANG, H. SU, AND W. GUO. 2010. Weed identification method based on probabilistic neural network in the corn seedling field. *Proceedings of the Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Qingdao, China. 11–14 July 2010. IEEE, New York.
- COWAN, I.R., 1982. Regulation of water use in relation to carbon gain in higher plants. In: Lange, O.L., Nobel, P.S., Osmond, C.B., Zigler, H. (Eds.), *Physiological Plant Ecology II*. *Encyclopaedia of Plant Physiology*, vol. 12B. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg/New York, pp. 589–613.

- CTIFL (2011) Hortipratic Tomate: Qualité et Preferences. Centre Technique Interprofessionnel des Fruits et Légumes, Paris.
- CURNEL Y., DE WIT A. J., DUVEILLER G. AND DEFOURNY P. (2011). Potential performances of remotely sensed LAI assimilation in WOFOST model based on an OSS Experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(12): 1843-1855.
- DALL'OLIO, M. (2016) Focus pomodoro da industria e da mensa: produzioni, import, export, consumi, prezzi. Available at: <http://www.italiafruit.net/DetailNews/33775/> la-categoria-del-mese/focus-pomodoro-da-industria-e-da-mensa-produzioniimport-export-consumi-prezzi (accessed July 2017).
- DAVIES, J.N. AND HOBSON, G.E. (1981) The constituents of tomato fruit – the influence of environment, nutrition, and genotype. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 15, 205–280.
- DECKER W.L., 1985. Agriculture, in *Handbook of applied meteorology*, D.H. Houghton (edited by), John Wiley & Sons, New York.
- DONDARINI R. & DONDINI M., 2003. *Coltura & Coltura*, <<Il Pomodoro: Aspetti Storici>> (19-45).
- DONG J., XIAO X., KOU W., QIN Y., ZHANG G., LI L. AND BIRADAR C. (2015). Tracking the dynamics of paddy rice planting area in 1986–2010 through time series Landsat images and phenology-based algorithms. *Remote Sensing of Environment*, 160: 99-113.
- DORAIS, M., PAPADOPOULOS, A. AND GOSSELIN, A. (2001) Influence of electric conductivity management on greenhouse tomato yield and fruit quality. *Agronomie* 21, 367–383.
- DORAISWAMY P. C., MOULIN S., COOK P. W. AND STERN A. (2003). Crop yield assessment from remote sensing. *Photogrammetric engineering & remote sensing*, 69(6): 665-674.
- DRUSCH, M.; DEL BELLO, U.; CARLIER, S.; COLIN, O.; FERNANDEZ, V.; GASCON, F.; HOERSCH, B.; ISOLA, C.; LABERINTI, P.; MARTIMORT, P.; et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sens. Environ.* 2012, 120, 25–36.
- DUKES, M.D., ZOTARELLI, L., LIU, G.D. AND SIMONNE, E.H. (2012) Principles and practices of irrigation management for vegetables. In: Olson, S.M. and Santos, B.M. (eds) 2012–2013 *Vegetable Production Handbook for Florida*. Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, Florida, pp. 17–27.
- D'URSO, G., MENENTI, M., & SANTINI, A. (1999). Regional application of one-dimensional water flow models for irrigation management. *Agricultural Water Management*, 40(2-3), 291-302.
- ELATTIR, H. (2002) Plant density on processing tomatoes grown in Morocco. *Acta Horticulturae* 613, 197–200.

- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA), Sentinel-2 User Handbook. Available online: https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- EUROSTAT (2016) Fresh vegetables and strawberries by area. Available at: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-datasets/-/tag00115> (accessed January 2018).
- FAO. 2011. FAOSTAT online database, available at link <http://faostat.fao.org/>.
- FAOSTAT (2016) Food and agriculture data. Available at: <http://www.fao.org/faostat/en/#home> (accessed January 2018).
- FRASER, P.D., TRUESDALE, M.R., BIRD, C.R., SCHUCH, W. AND BRAMLEY, P.M. (1994) Carotenoid biosynthesis during tomato fruit development – evidence for tissue-specific gene expression. *Plant Physiology* 105, 405–413.
- GEIGER R., Aron R.H., Todhunter P., 1997. The climate near the ground, (fifth edition), Vieweg, Braunschweig, Weisbaden.
- GÉNARD, M., BERTIN, N., BOREL, C., BUSSIÈRES, P., GAUTIER, H. ET AL. (2007) Towards a virtual fruit focusing on quality: modelling features and potential uses. *Journal of Experimental Botany* 58, 917–928.
- Geoinformation*, 38: 321-334.
- GRANDILLO S., MUSTILLI A., PARISI M., MORELLI G., 2004. Tecniche avanzate per la valutazione qualitativa del pomodoro: il caso in Campania.
- GRISSE, R., ALLEY, M., WYSOR, W.G., HOLSHOUSER, D. AND THOMASON, W. (2009) Precision Farming Tools: Soil Electrical Conductivity. Publications and educational resources, Virginia Cooperative Extension. Available at: <https://pubs.ext.vt.edu/442/442-508/442-508.html> (accessed 6 December 2016).
- HADRIA R., DUCHEMIN B., JARLAN L., DEDIEU G., BAUP F., KHABBA S. AND LE TOAN T. (2010). Potentiality of optical and radar satellite data at high spatio-temporal resolutions for the monitoring of irrigated wheat crops in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12: S32-S37.
- HSIAO, T.C., BRADFORD, K.J., 1983. Physiological consequences of cellular water deficits. In: Taylor, H.M., Jordan, W.R., Sinclair, T.R. (Eds.), *Limitations to Efficient Water Use in Crop Production*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Society of America, Inc., Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, pp. 227–265.
- HSIAO T. C., STEDUTO P. AND FERERES E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. *Irrigation science*, 25(3): 209-231.

- IVORS, K. AND SANDERS, D. (eds) (2010) Commercial Production of Staked Tomatoes in the Southeast. Fact Sheet AG-405. North Carolina Cooperative Extension Service, Raleigh, North Carolina.
- JÉGO G., PATTEY E. AND LIU, J. (2012). Using Leaf Area Index, retrieved from optical imagery, in the STICS crop model for predicting yield and biomass of field crops. *Field Crops Research*, 131: 63-74.
- JIN X., LI Z., YANG G., YANG H., FENG H., XU X., WANG J., LI X. AND LUO J. (2017). Winter wheat yield estimation based on multi-source medium resolution optical and radar imaging data and the AquaCrop model using the particle swarm optimization algorithm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 126: 24-37.
- JRC, 1996. Soil geographical database for Europe at scale 1:1.000.000 Version 3.1 beta. European Community - JRC - European Soil Bureau.
- KING, D., BURRILL, A., DAROUSSIN, J., LE BAS, C., TAVERNIER, R., VAN RANST, E., 1995: The EU Soil Geographic Database, European Land Information Systems For Agro-Environmental Monitoring, Eur 16232 EN, pp 43-60.
- LARCHER W., 1983. *Physiological plant ecology*, Springer Verlag, Berlin.
- LI J., SONG J., LI M., SHANG S., MAO X., YANG J. AND ADELOYE A. J. (2018). Optimization of irrigation scheduling for spring wheat based on simulation-optimization model under uncertainty. *Agricultural water management*, 208: 245-260.
- LIANG S. AND QIN, J. (2008). Data assimilation methods for land surface variable estimation. In *Advances in Land Remote Sensing* (pp. 313-339). Springer, Dordrecht.
- LIANG, L., M.D. SCHWARTZ, AND S. FEI. 2012. Photographic assessment of temperate forest understory phenology in relation to springtime meteorological drivers. *Int. J. Biometeorol.* 56:343–355.
- LI-COR (1992) LAI-2000 Plant Canopy Analyzer Instruction Manual. Lincoln, NE, USA: LiCor Inc. Available at <https://www.licor.com/documents/q6hrj6s79psn7o8z2b2s>.
- MAIANI G., Antiossidanti e aromi. In: *Il pomodoro*, Ed. Script, Bologna, 2010.
- MARTIMORT P., BERGER M., CARNICERO B., DEL BELLO U., FERNANDEZ V., GASCON F., ET AL. Sentinel-2: The optical high-resolution mission for GMES operational services *ESA Bulletin*, 131 (2007), pp. 18-23
- NESMITH, D.S. AND DUVAL, J.R. (1998) The effect of container size. *HortTechnology* 8, 495–498.
- PARUELO, J.M., W.K. LAUENROTH, AND P.A. ROSET. 2000. Technical note: Estimating aboveground plant biomass using a photo-graphic technique. *J. Range Manage.* 53:190–193.

- PETERSON T.A., BLACKMER T.M., FRANCIS D.D., SCHEPPERS J.J., 1993. Using a chlorophyll meter to improve N management. A web-guide in soil resource management: D-13 Fertility, Cooperative extension, Institute of Nebraska, Lincoln, NE, USA.
- PHELAN D.C., HARRISON M.T., MCLEAN G., COX H., PEMBLETON K.G., DEAN G.J., PARSONS D., DO AMARAL RICHTER M.E., PENGILLEY G., HINTON S.J. AND MOHAMMED C.L., (2018). Advancing a farmer decision support tool for agronomic decisions on rainfed and irrigated wheat cropping in Tasmania. *Agricultural systems*, 167: 113-124.
- PHILLIPS, S.B., CEMBERATO, J.J. AND LEIKAM, D. (2009) Selecting the right fertilizer rate: a component of 4R nutrient stewardship. *Crops and Soils* 42, 14–17.
- RAES, D., STEDUTO, P., HSIAO, T.C., AND FERERES, E. 2009. AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3): 438-447.
- RAES D., STEDUTO P., HSIAO, T. C. AND FERERES E. (2011). AquaCrop Reference Manual. FAO. Land and Water Division, Rome, Italy.
- REICHLER R. H. (2008). Data assimilation methods in the Earth sciences. *Advances in water resources*, 31(11): 1411-1418.
- RICHARDSON, A.D., J.P. JENKINS, B.H. BRASWELL, D.Y. HOLLINGER, S.V. OLLINGER, AND M.L. SMITH. 2007. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. *Oecologia* 152:323–334.
- RUTLEDGE, A.D., WILLS, J.B. AND BOST, S. (1999) Commercial Tomato Production. PB 737. Agricultural Extension Service, The University of Tennessee, Knoxville, Tennessee.
- SALMON J. M., FRIEDL M. A., FROLKING S., WISSER D. AND DOUGLAS E. M. (2015). Global rain-fed, irrigated, and paddy croplands: A new high resolution map derived from remote sensing, crop inventories and climate data. *International Journal of Applied Earth Observation and*
- SEEMAN J.R., SHARKEY T.D., WANG J., OSMOND C.B., 1987. Environmental effects on photosynthesis, nitrogen use efficiency and metabolic. Pools in leaves of sun and shade plants. *Plant Physiol*, 84: 796-802.
- SEYMOUR, G.B., MANNING, K., ERIKSSON, E.M., POPOVICH, A.H. AND KING, G.J. (2002) Genetic identification and genomic organization of factors affecting fruit texture. *Journal of Experimental Botany* 53, 2065–2071.
- SLIMESTAD, R. AND VERHEUL, M. (2009) Review of flavonoids and other phenolics from fruits of different tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) cultivars. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 89, 1255–1270.

- SODI F., Atlante delle coltivazioni erbacee, Pomodoro, Agraria.org, 2018.
- STEDUTO, P., 2003. Biomass water-productivity. Comparing the growth-engines of crop models. In: FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply, Rome, February 26–28.
- STEDUTO P. AND ALBRIZIO R. (2005). Resource use efficiency of field-grown sunflower, sorghum, wheat and chickpea: II. Water use efficiency and comparison with radiation use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130(3-4): 269-281.
- STÖCKLE CO (2001) *Environmental Impact of Irrigation: a Review*. Pullman, WA, USA: State of Washington Water Research Center, Washington State University.
- TESTA, R., TRAPANI, A.M.D., SGROI, F. AND TUDISCA, S. (2014) Economic sustainability of Italian greenhouse cherry tomato. *Sustainability* 6, 7967–7981.
- TOUMI J., ER-RAKI S., EZZAHAR J., KHABBA S., JARLAN L. AND CHEHBOUNI A. (2016). Performance assessment of AquaCrop model for estimating evapotranspiration, soil water content and grain yield of winter wheat in Tensift Al Haouz (Morocco): Application to irrigation management. *Agricultural Water Management*, 163: 219-235.
- VUOLO, F.; D'URSO, G.; DE MICHELE, C.; BIANCHI, B.; Cutting, M. Satellite-based irrigation advisory services: A common tool for different experiences from Europe to Australia. *Agric. Water Manag.* 2015, 147, 82–95.
- WOOD C.K., REEVE D.W., DUFFIELD R.R., EDMISTEN K.I. 1992. Field Chlorophyll measurements corn nitrogen status, *Plant Nutr.* 15: 487-500.
- WRIEDT G., VAN DER VELDE M., ALOE A. AND BOURAOUI F. (2009) Estimating irrigation water requirements in Europe. *Journal of Hydrology* 373, 527–544.
- XIAO X., BOLES S., FROLKING S., LI C., BABU J. Y., SALAS W. AND MOORE III B. (2006). Mapping paddy rice agriculture in South and Southeast Asia using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment*, 100(1): 95-113.
- YAO A.Y.M., 1981. Agricultural climatology. In world survey climates, vol 3, *General Climatology*, H.E.Landsberg (edited by), Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.