



Il Progetto RHEA: robot autonomi per la difesa mirata delle colture agrarie

*Atti della giornata studio dell'Accademia dei
Georgofili: "Il progetto RHEA: risultati e acquisizioni"*

A cura di Andrea Peruzzi

Accademia dei Georgofili

Il Progetto RHEA : robot autonomi per la difesa mirata delle colture agrarie : atti della giornata di studio dell'Accademia dei Georgofili: "Il progetto RHEA: risultati e acquisizioni" : [Pisa, 19-21 settembre 2012] / a cura di Andrea Peruzzi. - Pisa : Pisa university press, 2014. - (Atti di convegno)

630 (22.)

I. Peruzzi, Andrea 1. Agricoltura - Automazione

CIP a cura del Sistema bibliotecario dell'Università di Pisa

© Copyright 2014 by Pisa University Press srl
Società con socio unico Università di Pisa
Capitale Sociale € 20.000,00 i.v. - Partita IVA 02047370503
Sede legale: Lungarno Pacinotti 43/44 - 56126 Pisa
Tel. + 39 050 2212056 - Fax + 39 050 2212945
press@unipi.it
www.pisauniversitypress.it

ISBN 978-88-6741-462-8

impaginazione: 360grafica.it

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633.

Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, Corso di Porta Romana, 108 - 20122 Milano, segreteria@aidro.org - www.aidro.org

*“Un giorno le macchine riusciranno a risolvere tutti i problemi,
ma mai nessuna di esse potrà porne uno”.*
Albert Einstein

“Nulla è più scientifico della fantasia”.
Roberto Benigni

*“La terra che coltiviamo l’abbiamo avuta in prestito dai nostri nipoti
e non in eredità dai nostri nonni”.*
Anonimo nativo americano

Gli autori di questo volume sono:

Andrea Peruzzi, Marco Fontanelli, Christian Frasconi, Michele Raffaelli, Roberta Del Sarto e Calogero Plaia

Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari e Agro-Ambientali - Università di Pisa

Luisa Martelloni, Michel Pirchio

Centro di Ricerche Agro-Ambientali "Enrico Avanzi" - Università di Pisa

Marco Vieri, Giancarlo Cosi, Riccardo Lisci, Marco Rimediotti, Daniele Sarri

Unità di Ricerca Ingegneria dei Biosistemi - Scuola di Agraria - Università di Firenze

La giornata studio è stata organizzata da:

- Accademia dei Georgofili - Sezione Centro Ovest



Accademia dei Georgofili
Sezione Centro Ovest

In collaborazione con:

- C.I.R.A.A. "Centro Interdipartimentale di Ricerche Agro-Ambientali *Enrico Avanzi*" - Università di Pisa



UNIVERSITÀ DI PISA
centro interdipartimentale
di ricerche agro-ambientali
Enrico Avanzi

Con il patrocinio di:

- Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari e Agro-Ambientali - Università di Pisa
- GESAAF "Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali - Università degli Studi di Firenze



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE**
GESAAF
DIPARTIMENTO DI GESTIONE
DEI SISTEMI AGRARI,
ALIMENTARI E FORESTALI

Ringraziamenti

RHEA è un progetto finanziato dall'UE nel quadriennio 2010-2014 nell'ambito del Settimo Programma Quadro (Progetto n°245986). Gli autori desiderano ringraziare tutti i partner del progetto RHEA, la lista dei quali non viene riportata per motivi di spazio, ma può essere facilmente reperita sul web (www.rhea-project.eu).



European
Commission

Indice

BREVE NOTA DEL CURATORE	11
INDIRIZZI DI SALUTO DEL PROF. FILIBERTO LORETI	13
PRESENTAZIONE DEL PROF. PIETRO PICCAROLO	15
1. AGRICOLTURA DI PRECISIONE: STATO DELL'ARTE, TECNOLOGIE DISPONIBILI E APPLICAZIONI	17
1.1. Considerazioni preliminari	17
1.2. Sistema Satellitare Globale di Navigazione (GNSS)	20
1.3. Il Sistema di Posizionamento Globale (GPS)	24
1.4. Sistema Globale Orbitante di Navigazione Satellitare (GLONASS)	26
1.5. Galileo	27
1.6. COMPASS (BeiDou-2), Sistema di Posizionamento Satellitare Regionale In- diano (IRNSS) e Sistema Satellitare Quasi-Zenith (QZSS)	28
1.7. Dispositivi di navigazione GNSS	29
1.7.1. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per creare mappe delle piante	30
1.7.2. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per la guida automatica delle macchine agricole	33
1.7.3. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per l'applicazione degli agrofarmaci	34
1.8. Visione computerizzata	35
1.9. Il telerilevamento	36
1.10. I sistemi aerei senza pilota (Unmanned Aerial Systems - UAS)	37
1.11. I sensori prossimali	40
1.11.1. I sensori elettromagnetici	41
1.11.2. I sensori ottici e optoelettronici	41
1.11.3. I sensori meccanici	43
1.11.4. I sensori elettrochimici	44
1.11.5. I sensori di flusso d'aria	44
1.11.6. I sensori acustici	45
1.11.7. I sensori a ultrasuoni	45

1.12.	Il Sistema Informativo Geografico (GIS)	46
1.13.	L'applicazione a rateo variabile (VRA)	47
1.13.1.	La VRA basata sulle mappe	48
1.13.2.	La VRA basata sui sensori	48
1.13.3.	Seminatrici a rateo variabile	49
1.13.4.	Protezione delle colture a rateo variabile	49
1.13.4.1.	I sistemi basati sul controllo del flusso	50
1.13.4.2.	Sistemi a iniezione diretta dei prodotti fitosanitari	51
1.13.4.3.	Sistemi basati sul controllo della modulazione della portata degli ugelli	53
1.13.5.	I distributori di fertilizzanti a rateo variabile	54
1.13.6.	L'irrigazione a rateo variabile	55
1.14.	I sistemi di monitoraggio della resa	55
2.	IL PROGETTO RHEA	57
2.1.	Considerazioni preliminari	57
2.2.	Requisiti tecnici e specifiche	58
2.3.	Il gestore di missione (mission manager)	60
2.4.	Unità mobili	61
2.5.	Base station e interfaccia grafica	63
2.6.	Sistemi di percezione	64
2.7.	Sistema decisionale di alto livello (High Level Decision Making System - HLDMS) e sistema di basso livello di attuazione (Low Level Actuation System - LLAS)	68
2.8.	Sistemi di comunicazione e localizzazione	70
3.	LA MACCHINA AUTOMATICA PER EFFETTUARE IL CONTROLLO FISICO SITO-SPECIFICO DELLA FLORA SPONTANEA SU COLTURE A FILE SPAZIATE	73
3.1.	Considerazioni preliminari	73
3.2.	Progettazione e descrizione della macchina	74
3.2.1.	Struttura della macchina	74
3.2.2.	Sistema per il controllo meccanico delle infestanti	75
3.2.3.	Il sistema per il controllo termico delle infestanti	76
3.2.4.	Il sistema idraulico	83
3.3.	Integrazione ed applicazione	84
3.4.	Considerazioni conclusive	85
4.	SMART TECHNOLOGIES - TECNOLOGIE AVANZATE DELLA AIRBLAST RHEA SPRAYER NELLA IRRORAZIONE ANTIPARASSITARIA	87
4.1.	Considerazioni preliminari	87
4.2.	Le fasi di sviluppo: materiali e metodi	89
4.3.	Risultati	102
4.4.	Considerazioni conclusive	105
	BIBLIOGRAFIA	111

Breve nota del curatore

Questo volume riporta gli atti della Giornata Studio dell'Accademia dei Georgofili "Il Progetto RHEA: risultati e acquisizioni" che ha avuto luogo il 18 Luglio 2014 presso il centro "Enrico Avanzi" dell'Università di Pisa che sono stati suddivisi in tre capitoli (2, 3 e 4), cui è stata aggiunto il primo capitolo che prende in considerazione lo stato dell'arte, le tecnologie disponibili e le applicazioni inerenti l'agricoltura di precisione. Questa integrazione è apparsa necessaria tenendo in considerazione la natura prettamente divulgativa di quest'opera in modo da fornire a tutti i lettori, ivi compresi quelli completamente neofiti o non molto informati sugli argomenti inerenti l'agricoltura di precisione, la possibilità di apprenderne le nozioni di base, necessarie per poter comprendere al meglio i risultati e le acquisizioni conseguiti nel progetto di Ricerca RHEA ("Robot Fleets for Higly Effective Agriculture and Forestry Management") finanziato dall'UE nell'ambito di una call del Settimo Programma Quadro riservata a ricerche sull'utilizzo e sulle applicazioni delle nanotecnologie in agricoltura, che è iniziato il 1 Agosto 2010 e terminato il 31 Luglio 2014.

ANDREA PERUZZI

Indirizzi di Saluto del Prof. Filiberto Loreti rivolti ai partecipanti alla Giornata Studio dell'Accademia dei Georgofili sul Progetto RHEA che ha avuto luogo il 18 Luglio 2014 presso il Centro "Enrico Avanzi" dell'Università di Pisa

Sono particolarmente lieto di portare il saluto e porgere a voi tutti un cordiale benvenuto da parte della sezione Centro Ovest dell'Accademia dei Georgofili che, grazie alla preziosa collaborazione dei Proff. Marco Vieri e Andrea Peruzzi, ha potuto organizzare questo incontro congiuntamente con il Centro di Ricerche Agro-Ambientali "Enrico Avanzi".

L'Accademia è da sempre stata molto sensibile ai problemi della meccanizzazione che ha affrontato con diverse iniziative riguardanti vari settori delle coltivazioni: basti qui ricordare il convegno sulla meccanizzazione della collina e gli specifici incontri sulla vendemmia meccanizzata o sulla raccolta meccanica delle olive.

L'argomento affrontato nella Giornata di Studio sul Progetto RHEA riveste senza dubbio una notevole importanza e una grande attualità poiché riguarda l'Agricoltura di Precisione che si sta sempre più diffondendo in quelle aziende dove vengono automatizzate varie operazioni colturali, ricorrendo a sistemi innovativi come quelli studiati con il Progetto RHEA di cui vengono riferiti oggi i risultati e le acquisizioni.

Tale progetto è stato finanziato nell'ambito del settimo programma quadro della Unione Europea ed ha un rilevante carattere multidisciplinare in quanto ha coinvolto 15 partner europei appartenenti a diverse tipologie di competenze tecniche, ingegneristiche e agronomiche, come la robotica, l'informatica, la meccanica agraria, la malerbologia e le telecomunicazioni.

L'obiettivo è stato quello di progettare, realizzare e testare un sistema automatico e robotico per il controllo delle infestati e per effettuare trattamenti su specie arboree e forestali i cui risultati verranno riferiti dai relatori che desidero ringraziare fin da ora.

Il Progetto RHEA: robot autonomi per la difesa mirata delle colture agrarie

Prima di terminare questo mio breve intervento desidero ringraziare calorosamente tutti coloro che hanno voluto sostenere questa iniziativa ed in particolare il Prof. Marco Mazzoncini, Direttore del Centro di Ricerche Agro-Ambientali "Enrico Avanzi," che oggi ci ospita.

PROF. FILIBERTO LORETI
Presidente della Sezione Centro Ovest dell'Accademia dei Georgofili

Presentazione del Prof. Pietro Piccarolo

Quello agricolo-forestale è un sistema complesso ma al contempo fragile. Questo significa che, per una sua gestione all'altezza delle esigenze del terzo millennio, è necessario adottare modelli agricoli avanzati, basati però su tecnologie ecocompatibili. Tecnologie cioè capaci di garantire, attraverso adeguati profili di efficienza tecnologica e gestionale, un'elevata produttività senza però compromettere le risorse naturali e l'ambiente. Da qui deriva il concetto di agricoltura sostenibile promosso anche dalla nuova PAC. Il progetto RHEA (Robot Fleets for Highly Effective Agriculture and Forestry Management), finanziato nell'ambito del 7° Programma Quadro dell'UE, a cui hanno partecipato, con approccio multidisciplinare, ben 15 partner europei, si è sviluppato proprio in questa direzione. L'obiettivo del progetto infatti, è stato quello di ridurre drasticamente i fitofarmaci chimici di sintesi impiegati per il controllo delle erbe infestanti su specie erbacee e per l'effettuazione dei trattamenti su specie arboree e forestali. In sintesi, il progetto rappresenta una corretta proposta di applicazione dell'agricoltura di precisione alla difesa dei vegetali, nel quadro generale di una gestione sostenibile dell'agroecosistema.

L'obiettivo del progetto è stato perseguito con l'impiego di un sistema operativo coordinato, costituito da una flotta di robot tecnologicamente molto evoluti, equipaggiati con sensori ed attuatori ad alta efficienza e controllati da innovativi software gestionali. In concreto si sono impiegati droni aerei dotati di GPS e fotocamera ad alta risoluzione, particolarmente efficienti nell'operazione di mappatura, in collegamento con unità robotiche terrestri dotate di sistema visivo autonomo.

Nella giornata di studio presso il Centro di Ricerche Agro-Ambientali "Enrico Avanzi" dell'Università di Pisa, organizzata dalla Sezione Centro-Ovest dei Georgofili, in collaborazione con lo stesso Centro, sono stati presentati, oltre ai contenuti generali del progetto RHEA, le attività, i risultati della ricerca condotta dalle unità operative dell'Università di Pisa e di Firenze nell'ambito del progetto stesso.

In particolare, l'unità operativa dell'Università di Pisa, ha progettato una macchina automatica per il controllo sito-specifico delle infestanti su mais in grado di eseguire l'applicazione, in tempo reale, di dosi variabili di pirodiserbo, in relazione alla percentuale di copertura delle infestanti. Copertura rilevata attraverso un sensore ottico. Con questa macchina innovativa è possibile ottenere una riduzione dei consumi di GPL dal 30% all'80% rispetto al trattamento termico su tutta la superficie.

L'unità operativa facente capo all'Università di Firenze, ha realizzato il prototipo RHEA Airblast Sprayer , cioè una macchina irroratrice autonoma per la gestione a rateo variabile, in tempo reale, dei trattamenti di difesa antiparassitaria delle colture arboree, in relazione allo sviluppo della chioma. Il rilievo delle caratteristiche della chioma bersaglio è effettuato da un sistema costituito da otto sensori a ultrasuoni (quattro per lato), che operano su quattro differenti fasce verticali. Ogni sensore gestisce l'irrorazione secondo specifiche regole impostate su un PLC. L'impiego di doppi ugelli su ogni modulo di irrorazione muniti di elettrovalvole azionate in funzione delle caratteristiche della chioma bersaglio, rilevata dai sensori, permette l'irrorazione a rateo variabile evitando così la dispersione del fitofarmaco.

Dalla presentazione dei risultati ottenuti dalle due unità operative, sono emerse prospettive veramente promettenti, con soluzioni che consentono di ottenere la difesa dei vegetali con un risparmio dell'input chimico dell'ordine del 50%.

PROF. PIETRO PICCAROLO
Presidente dell'Accademia di Agricoltura di Torino
Vice-Presidente dell'Accademia dei Georgofili

1. Agricoltura di precisione: stato dell'arte, tecnologie disponibili e applicazioni

1.1. Considerazioni preliminari

L'agricoltura di precisione è una strategia di gestione aziendale che utilizza informazioni precise e tecnologie dedicate per la raccolta delle stesse. Tali informazioni riguardano le variazioni spaziali e temporali riscontrate all'interno di un'area coltivata che, successivamente, vengono usate per gestire gli input e i trattamenti necessari, al fine di aumentare il reddito degli agricoltori e ridurre l'impatto ambientale. L'informazione è un requisito fondamentale ed è considerato il "cuore" di questa strategia.

L'agricoltura di precisione è un sistema di produzione che coinvolge la gestione colturale in conformità con la variabilità presente in campo e con le condizioni sito-specifiche.

Essa persegue i seguenti obiettivi e le seguenti finalità: incrementare la redditività e la sostenibilità, migliorare la qualità dei prodotti, effettuare una gestione efficiente delle specie nocive, conservare l'energia, l'acqua e il suolo, evitare fenomeni di inquinamento delle acque superficiali e profonde.

Il concetto centrale dell'agricoltura di precisione è quello di applicare gli input soltanto quando e dove sono necessari e questo può essere fatto solo se è disponibile una grande quantità di dati geo-referenziati, così da poter attuare una gestione fondata su decisioni derivanti da informazioni precise. Questo sistema gestionale delle pratiche agricole fornisce quindi strumenti alternativi e realistici per ridurre e ottimizzare l'utilizzo di composti potenzialmente nocivi, riducendo i rischi di contaminazione dell'agro-ecosistema e salvaguardando la salute degli esseri umani.

L'adozione dell'agricoltura di precisione prevede in ogni caso la raccolta dei dati, la mappatura della variabilità, il processo decisionale e, infine, la gestione colturale. Le superfici coltivate vengono suddivise in zone di gestione in base al pH del terreno, alle rese, alla presenza di specie nocive e ad altri fattori che influenzano la produttività delle colture. Le decisioni di gestione si basano sui requisiti di ogni zona

e sulle tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione e vengono utilizzate per controllare gli input nelle diverse zone.

L'agricoltura di precisione si basa su tre principi: l'informazione, la tecnologia e la gestione. Informazioni dettagliate e puntuali rappresentano la risorsa più preziosa per l'agricoltore moderno. Tali informazioni devono includere dati sulle caratteristiche della coltura, sulle risposte degli ibridi, sulle proprietà del suolo, sui requisiti di fertilità, sulle previsioni meteorologiche, sulle popolazioni di infestanti e specie nocive, sulle risposte di crescita delle piante, sulle rese, sulla trasformazione dopo la raccolta e sulle previsioni di vendita. Gli agricoltori che si avvalgono delle tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione devono pertanto trovare, analizzare e utilizzare tutte le informazioni disponibili in ciascuna fase del sistema colturale e devono valutare come le nuove tecnologie possano essere adattate alle proprie attività. Ad esempio, un semplice personal computer (PC) può essere impiegato per organizzare, analizzare e gestire i dati in modo efficace. La conservazione dei documenti su un PC è semplice e le informazioni raccolte negli anni precedenti sono facilmente accessibili. I programmi disponibili includono fogli elettronici, banche dati, il Sistema Informativo Territoriale (GIS) e altri tipi di applicazioni software disponibili. Un'altra tecnologia che gli agricoltori utilizzano è il GNSS (Sistema Satellitare Globale di Navigazione), che permette di localizzare posizioni specifiche in un'area coltivata. Il GIS può essere usato per creare mappe di campo basandosi sui dati di posizione raccolti con il GNSS e per valutare l'impatto delle decisioni di gestione aziendale. I sensori per raccogliere le informazioni sono anch'essi disponibili o in fase di sviluppo e vengono utilizzati per monitorare le proprietà del terreno, lo stress delle colture, le condizioni di crescita, le rese o le trasformazioni dopo la raccolta. Questi sensori forniscono all'agricoltore informazioni istantanee (in tempo reale) che possono essere utilizzate per regolare o controllare gli input operativi. L'agricoltura di precisione si serve di tre tecnologie generali: (1) sensori per la coltura, il suolo e il posizionamento, che possono essere di tipo "remoto" oppure essere montati su un veicolo per il rilevamento della tessitura del suolo, dell'umidità, dello stress colturale, delle malattie, della presenza di infestanti, etc.; (2) controllori delle macchine, impiegati per guidare le macchine operatrici e che possono variare la dose, la miscela e il posizionamento di semi, acqua, fertilizzanti o prodotti chimici; (3) sistemi computerizzati come le mappe GIS e le banche dati, che utilizzano le informazioni raccolte con i sensori per prescrivere specifici comandi alle macchine. Il supporto alle decisioni unisce le tecniche di gestione tradizionali alle tecnologie per l'agricoltura di precisione in modo da aiutare gli agricoltori a formulare le migliori scelte (o prescrizioni) per il loro sistema produttivo (**Fig. 1.1**).

Le tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione possono essere impiegate singolarmente o in modo combinato, come mezzo per realizzare l'agricoltura di precisione in base alle necessità. Al momento le tecnologie disponibili in commercio sono i dispositivi di navigazione GNSS, la visione computerizzata, il telerilevamento e i sensori prossimali, il GIS, le applicazioni a rateo variabile e il monitoraggio delle

rese. A partire dagli anni '80 nei Paesi a Economia Sviluppata sono state promosse iniziative sia pubbliche che private per facilitare l'adozione delle tecnologie per l'agricoltura di precisione da parte degli agricoltori e dei contoterzisti. In tempi più recenti iniziative analoghe sono state introdotte anche nei Paesi in via di sviluppo come Brasile, Cina, India e Uruguay. Queste iniziative sono state mirate soprattutto ad alcune "major crops" (cotone, mais, canna da zucchero, frumento e riso), allo scopo di aumentarne in modo rilevante sia le rese che la redditività.

Lo scopo primario degli agricoltori è infatti quello di utilizzare le tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione per aumentare il loro reddito. Tutto ciò risulta possibile mediante un uso più razionale del concetto "costo-effetto" degli input aziendali (agrofarmaci, carburante, lavoro e macchine), al fine di ottenere elevate rese di granella e permettere di realizzare tecniche di raccolta selettiva in base alla qualità dei prodotti. Al tempo stesso, i risultati di molti studi suggeriscono che le tecnologie per l'agricoltura di precisione hanno la potenzialità per ridurre l'impatto am-

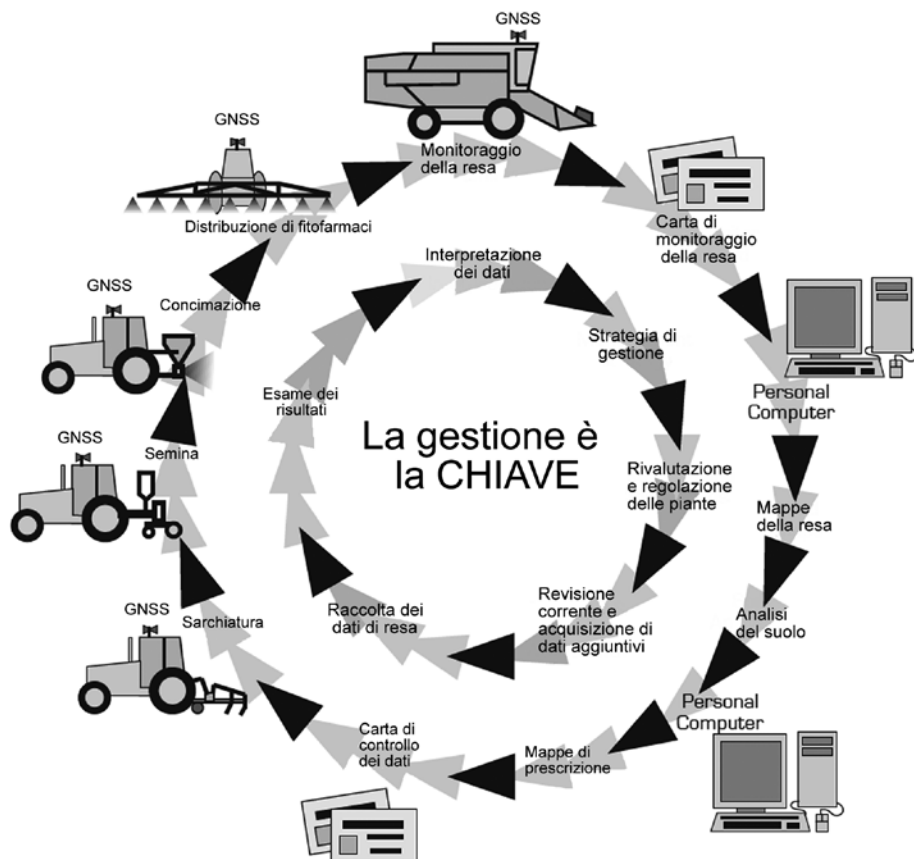


Fig. 11 Il ciclo di apprendimento con sovrapposto quello delle attrezzature e delle tecnologie. Le tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione forniscono i mezzi e salvano le informazioni per poter operare confronti su una posizione anno dopo anno (rielaborato da Grisso et al., 2009c).

bientale causato dalle attività agricole, in quanto un impiego ottimizzato degli input aziendali in accordo con le necessità delle colture evita di impiegare dosi eccessive e inutili. Ad esempio, distribuire soltanto la quantità di azoto necessaria alle colture per raggiungere le loro massime rese potenziali potrebbe ridurre la contaminazione da nitrati delle falde e, conseguentemente, l'inquinamento dell'acqua. Questo concetto è particolarmente importante poiché l'inquinamento non puntiforme derivato dall'agricoltura è il fattore principale nella contaminazione di molti corsi d'acqua del mondo. Pertanto, l'agricoltura di precisione, oltre a permettere un aumento dell'efficienza economica delle attività aziendali, consente anche di ottenere una apprezzabile protezione ambientale.

L'adozione delle tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione risulta positivamente collegata a fattori socio-economici (agricoltori che possiedono un alto livello formativo), a fattori agro-ecologici (agricoltori proprietari di aziende di grandi dimensioni caratterizzate da terreni fertili), a fattori istituzionali (agricoltori realmente impegnati per la sostenibilità), a fattori informativi (agricoltori che hanno assunto consulenti e sono d'accordo sull'utilità dei servizi di divulgazione), all'intuizione dell'agricoltore (agricoltori che hanno percepito che queste tecniche possono aumentare il loro reddito) e a fattori tecnologici (agricoltori che utilizzano i computer).

1.2. Sistema Satellitare Globale di Navigazione (GNSS)

Il posizionamento satellitare è la determinazione della posizione di luoghi osservati sulla terraferma, in mare, in aria o nello spazio per mezzo di satelliti artificiali.

Un sistema di navigazione satellitare con copertura globale può essere definito un Sistema Satellitare Globale di Navigazione (GNSS) e indica ognuno dei sistemi di navigazione basati su satelliti esistenti e programmati. Un sistema di navigazione satellitare è un sistema di satelliti che fornisce autonomamente un posizionamento geo-spaziale con copertura globale.

Il GNSS viene utilizzato per fornire la posizione di un utente in termini di latitudine, longitudine, altitudine, velocità, direzione e tempo usando un procedimento matematico chiamato "trilaterazione". Questo metodo permette di determinare la posizione di un qualunque oggetto misurando la sua distanza rispetto ad altri oggetti di cui è nota la posizione. La trilaterazione localizza un punto quando è nota la posizione di almeno due punti di riferimento e sono conosciute almeno tre distanze.

Solitamente, utilizzando la trilaterazione da sola, sono necessari almeno tre punti di riferimento per determinare accuratamente e inequivocabilmente la posizione relativa di un punto su un piano bidimensionale. L'idea di base della trilaterazione è quella di individuare la posizione (x_d, y_d) di un punto (d) partendo da tre punti di riferimento (a), (b) e (c), le cui posizioni (x_a, y_a) , (x_b, y_b) e (x_c, y_c) sono conosciute. Come illustrato in figura 1.2, la posizione del punto (d) è localizzata nel punto di intersezione di tre circonferenze aventi centro rispettivamente in (a), (b) e (c). La trilaterazione

può essere utilizzata anche in spazi tridimensionali, ma sono necessari quattro punti di riferimento anziché tre.

Per determinare la posizione di un ricevitore è necessario avere due informazioni: la posizione dei satelliti nello spazio e la distanza intercorrente tra questi e il ricevitore. I sistemi di posizionamento satellitare hanno come presupposto che le posizioni dei satelliti siano note in ogni momento e che gli “pseudorange” (le distanze fra l’antenna dei satelliti e l’antenna del ricevitore) siano misurati moltiplicando la velocità della luce per il tempo che il segnale derivato dal satellite impiega per raggiungere il ricevitore. La trilaterazione determina la posizione del ricevitore e il “bias” (orario) dell’orologio (**Fig. 1.3**). In un sistema con orario sincronizzato il calcolo di una posizione nello spazio tridimensionale richiederebbe la conoscenza della posizione e della distanza di tre satelliti. Tuttavia, un ricevitore non è mai perfettamente sincronizzato con l’orario del GNSS rendendo necessaria la presenza di quattro satelliti per determinare le posizioni (x, y, z) del ricevitore e il bias dell’orologio (t). Geometricamente parlando, la posizione ignota viene individuata da una sfera tangente alle quattro sfere definite dagli pseudorange. Il centro di questa sfera corrisponde alla posizione sconosciuta del ricevitore e il suo raggio è uguale

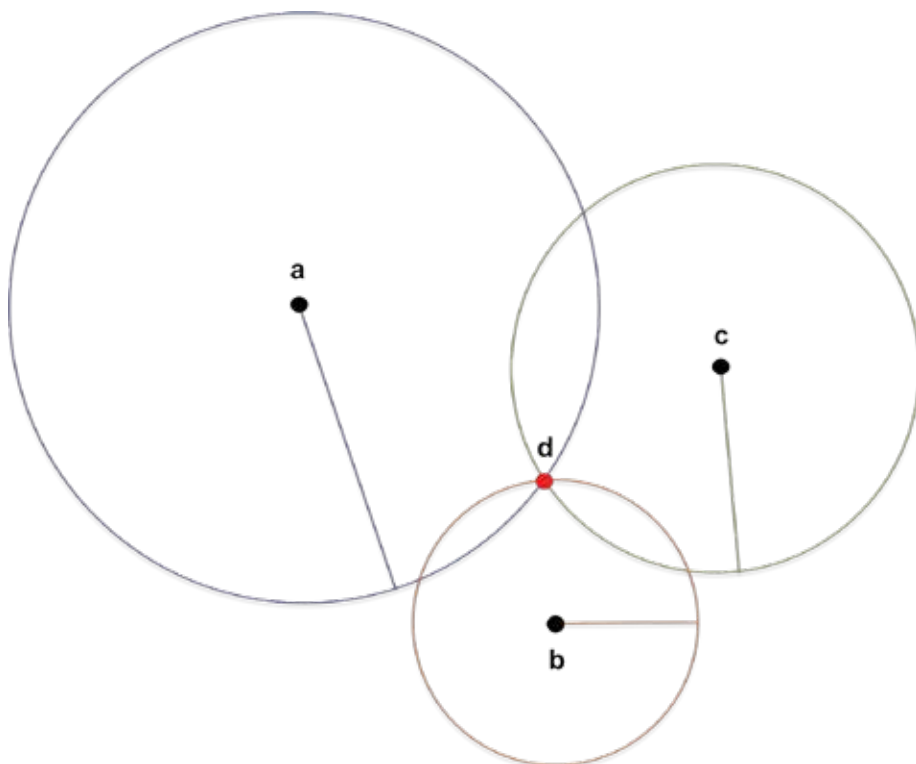


Fig. 1.2 Concetto base di trilaterazione. Punti di riferimento: (a), (b), (c). Punto sconosciuto: (d) (rielaborato da Wang & Li, 2010).

alla correzione di distanza determinata dall'errore dell'orologio del ricevitore stesso. L'accuratezza della posizione determinata utilizzando un singolo ricevitore è essenzialmente influenzata dall'accuratezza della posizione di ogni singolo satellite, delle misurazioni degli pseudorange e della geometria.

Il GNSS è costituito da tre segmenti: il segmento spaziale, il segmento di controllo e il segmento di utilizzo (**Fig. 1.4**). Il segmento spaziale è rappresentato dalla costellazione dei satelliti. Al fine di fornire una continua capacità di posizionamento globale, per ogni GNSS deve essere sviluppata una costellazione con un numero sufficiente di satelliti in grado di garantire che almeno 4 siano simultaneamente ed elettronicamente visibili in ogni luogo. I satelliti sono equipaggiati con accurati orologi atomici in modo da generare segnali orari.

Il segmento di controllo è responsabile della direzione di tutto il sistema e solitamente comprende una stazione principale che coordina tutte le attività, una stazione che costituisce la rete di monitoraggio e un'antenna terrestre che rappresenta il sistema di collegamento e di comunicazione con i satelliti.

Il settore di utilizzo può essere classificato in categorie di utilizzatori (militari o civili), tipologie di ricevitore, e vari servizi d'informazione. I ricevitori sono costituiti da un'antenna, sintonizzata sulle frequenze trasmesse dai satelliti, da un certo numero di processori e da un orologio altamente stabile che confronta i segnali orari ricevuti dai satelliti con quelli generati al suo interno. I ricevitori possono inoltre essere dotati di un display che fornisce la posizione e la velocità all'utente.

Le costellazioni GNSS esistenti sono il Sistema di Posizionamento Globale ame-

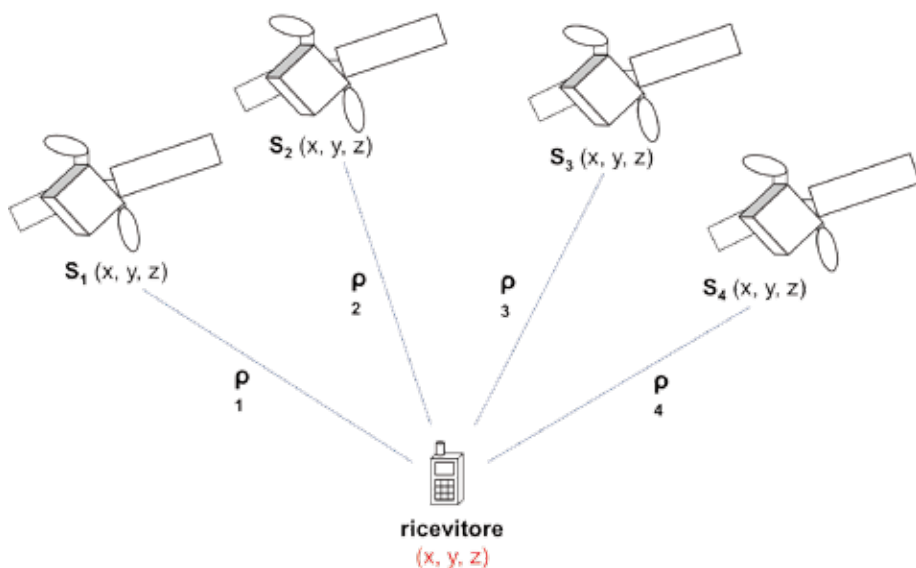


Fig. 1.3 Schema del processo di trilaterazione. La posizione dei satelliti (S_1 , S_2 , S_3 e S_4) e i relativi pseudorange (ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 e ρ_4) è nota e necessaria per la determinazione della posizione del ricevitore (rielaborato da Harper, 2010).

ricano (GPS), il Sistema Globale Orbitante di Navigazione Satellitare (GLONASS) della Federazione Russa, l'europeo GALILEO, il cinese COMPASS/BeiDou, il Sistema di Posizionamento Satellitare Regionale Indiano (IRNSS) e il sistema satellitare Quasi-Zenith giapponese (QZSS). Soltanto due di queste costellazioni sono attualmente operative: il GPS e il GLONASS. L'accuratezza di posizionamento del GNSS varia da meno di un centimetro a circa 10 metri in funzione di molti fattori, quali la disponibilità e la visibilità dei satelliti, il blocco del segnale dovuto all'eventuale presenza di alberi o edifici, la possibile distorsione del segnale, la tipologia di ricevitore GNSS utilizzato, il numero e la geometria delle osservazioni raccolte, la modalità usata (posizionamento puntiforme *vs* relativo) e il tipo di osservazione, il modello di misurazione adottato, il livello dei bias e degli errori che influenzano le osservazioni e il servizio di correzione differenziale dell'errore utilizzato. I servizi di correzione differenziale disponibili sono il DGPS, lo Space-Based Augmentation System (SBAS) e il Real-Time Kinematic (RTK). Il DGPS può fornire un'accuratezza metrica. Lo SBAS fornisce una correzione del segnale attraverso l'utilizzo di messaggi addizionali derivati dai satelliti. L'accuratezza in questo caso è decimetrica. L'RTK è il sistema che garantisce la maggiore accuratezza di posizione fornendo errori a livello centimetrico ($\pm 2,5$ cm).

Per molte applicazioni la costellazione satellitare GPS da sola non è sufficiente per la determinazione di una posizione poiché in certi luoghi (specialmente nelle aree

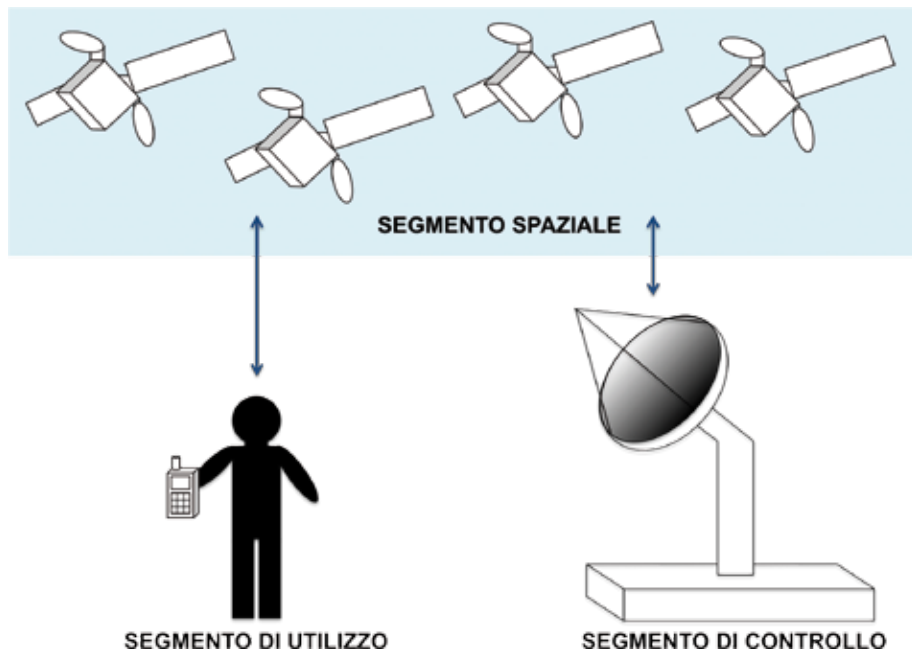


Fig. 1.4 Schema dei segmenti del GNSS (rielaborato da Rao, 2010).

urbane) i segnali sono spesso “distorti” e/o parzialmente o totalmente schermati. In tali condizioni, l'utilizzo di tutti i segnali GNSS disponibili generalmente migliora le prestazioni di posizionamento. Infatti, i ricevitori GNSS possono combinare i segnali provenienti sia dal GPS che dal GLONASS. Il GPS sommato al GLONASS garantisce la presenza sopra l'orizzonte di un minimo di 6 satelliti fino ad un massimo di 14 su tutta la superficie terrestre. Nel prossimo futuro, l'utilizzo combinato di GPS, GLONASS e Galileo fornirà una miglior precisione e una maggior disponibilità (dovuta a un più elevato numero di satelliti visibili), una maggior velocità, e una migliore stima del bias ionosferico grazie alle frequenze sommate. Le costellazioni GNSS dovranno altresì fornire dei segnali simili in modo da semplificare i ricevitori GNSS che utilizzano costellazioni GNSS combinate. Le costellazioni GNSS possono essere combinate anche con costellazioni non GNSS, quali il rilevamento convenzionale, i sistemi di navigazione a lungo raggio (LORAN-C) e il sistema di navigazione inerziale (INS) per mantenere una determinazione precisa della posizione anche nei luoghi dove le costellazioni GNSS falliscono, come ad esempio nelle foreste o nelle gallerie.

1.3. Il Sistema di Posizionamento Globale (GPS)

Il GPS è un sistema mondiale di navigazione satellitare sviluppato dal Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America nel contesto del proprio programma satellitare NAVSTAR. Il GPS fornisce la posizione degli oggetti in maniera molto accurata, la loro velocità e i dati orari. Il sistema aveva originariamente lo scopo di servire le applicazioni militari, ma negli anni '80 il governo degli Stati Uniti lo ha reso disponibile anche per usi civili. Il segmento spaziale è costituito da 31 o più satelliti attivi e dispersi in modo uniforme su sei orbite approssimativamente circolari che ospitano 4 o più satelliti ciascuna (**Fig. 1.5**). Ogni orbita si trova a un'altitudine di 20200 km ed è inclinata di 55° rispetto all'equatore. Le orbite sono separate le une dalle altre per multipli di 60° in modo da coprire 360° completi. Non sono geostazionarie, hanno un raggio di 26560 km e un periodo orbitale di metà giorno siderale (circa 11967 ore). Teoricamente, tre o più satelliti GPS sono sempre visibili dalla maggior parte dei luoghi situati sulla superficie terrestre e quattro o più satelliti GPS possono essere utilizzati per determinare la posizione sulla Terra di un osservatore 24 ore al giorno. Ogni satellite trasmette segnali su due frequenze, L1 (1575,42 MHz) ed L2 (1227,60 MHz), che possono essere rilevate dai ricevitori a terra. I segnali dei satelliti GPS sono generati utilizzando un procedimento conosciuto come modulazione “Direct Sequence Spread Spectrum” (DSSS). I satelliti GPS sono equipaggiati con 4 orologi atomici estremamente stabili costituiti da rubidio (Rb) e cesio (Cs). Per distinguere i satelliti il GPS utilizza la tecnica “Code Division Multiple Access” (CDMA). Il segmento di controllo consiste di una stazione principale (MCS), una stazione principale sostitutiva (AMCS), quattro antenne terrestri e sei stazioni di monitoraggio dedicate che mantengono i satelliti sulle proprie orbite. Il settore di

controllo segue i movimenti dei satelliti GPS, scarica i dati di navigazione aggiornati e mantiene lo stato della costellazione satellitare.

Il segmento di utilizzo è rappresentato dal ricevitore GPS (che l'utilizzatore può tenere in mano o montare su un veicolo), il quale riceve il segnale dai satelliti e utilizza le informazioni trasmesse per calcolare la posizione tridimensionale dell'utilizzatore e l'orario. Nel segmento di utilizzo ci sono due classi di ricevitori, militari e civili. I ricevitori civili possono leggere soltanto le frequenze L1. Quelli militari o comunque gli utenti autorizzati in possesso di un'attrezzatura crittografica, chiavi e ricevitori appositamente equipaggiati, possono leggere sia la frequenza L1 che quella L2. La combinazione delle due frequenze aumenta in maniera apprezzabile l'accuratezza della determinazione della posizione.

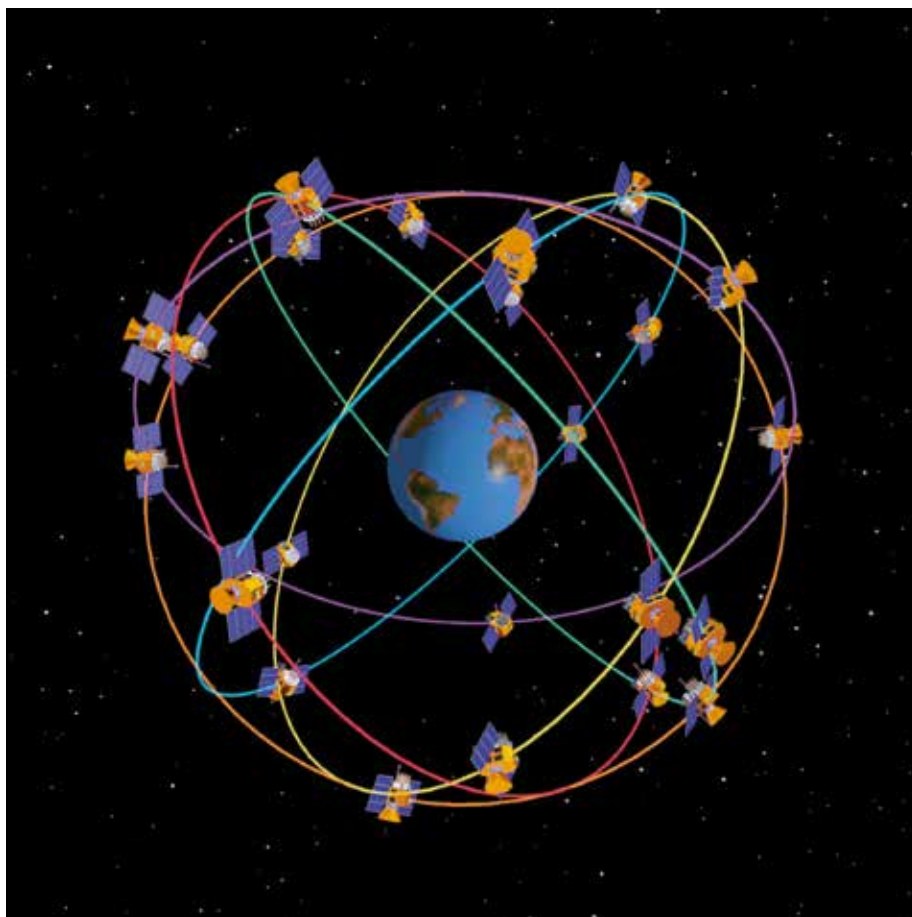


Fig. 1.5 Schema delle sei orbite GPS contenenti quattro o più satelliti ciascuna (rielaborato da Dev Track Solution, 2013).

1.4. Sistema Globale Orbitante di Navigazione Satellitare (GLONASS)

Il GLONASS è la controparte della Federazione Russa al GPS e ne differisce in termini di segmento spaziale, di segmento di controllo e di struttura del segnale. Il GLONASS è l'unica alternativa operativa al GPS dotata di copertura globale e di precisione comparabile. Lo sviluppo del GLONASS è iniziato nell'Unione Sovietica nel 1976. A partire dal 2 ottobre 1982 numerosi lanci di razzi hanno aggiunto satelliti al sistema fino a quando la costellazione non è stata completata nel 1995. Durante gli anni 2000 la reintegrazione del sistema ha avuto la più alta priorità da parte del governo russo, che ha investito in questa operazione una grande quantità di risorse. GLONASS è il più costoso programma sostenuto dall'Agenzia Spaziale della Federazione Russa. Alla fine del 2010, GLONASS ha raggiunto il 100% di copertura del territorio della Federazione Russa e nell'ottobre del 2011 la piena costellazione orbitale costituita da 24 satelliti operativi è stata reintegrata, consentendo una copertura globale. Le conformazioni dei satelliti GLONASS sono state sottoposte a progressivi aggiornamenti fino alla messa a punto dell'ultima versione, il GLONASS-K, messo in orbita nel febbraio 2011 (**Fig. 1.6**). I satelliti GLONASS forniscono la determinazione della posizione e della velocità in tempo reale per un utilizzo sia militare che civile.

Il segmento spaziale opera in tre orbite con 8 satelliti uniformemente distanziati



Fig. 1.6 Schema del satellite GLONASS-K (rielaborato da Zoonar GmbH, 2013).

su ciascuna di esse. Le orbite sono situate a 19100 km di altitudine, hanno un'inclinazione di 64,8° e un periodo di 11,15 ore. Le orbite GLONASS sono particolarmente adatte per essere utilizzate a latitudini elevate (sia nord che sud) dove ricevere il segnale GPS potrebbe essere problematico. I satelliti trasmettono due tipi di segnale, uno di precisione standard (SP) e uno offuscato ad alta precisione (HP). Tutti i satelliti trasmettono lo stesso codice con segnali SP. Tuttavia, ognuno di essi trasmette su una differente frequenza utilizzando un protocollo di accesso multiplo a divisione di frequenza (FDMA) a 15 canali, che si estende su due lati da 1602 MHz, conosciuta come banda L1. I segnali L2 impiegano lo stesso FDMA come i segnali a banda L1, ma trasmettono a 1246 MHz.

Il segmento di controllo è quasi interamente localizzato all'interno del territorio della ex Unione Sovietica. Il centro di controllo terrestre si trova a Mosca, mentre le stazioni di telemetria e monitoraggio sono a San Pietroburgo, a Ternopol, a Eniseisk e a Komsomolsk-na-Amure.

La differenza principale fra GPS e GLONASS consiste nel fatto che mentre nel GLONASS ogni satellite ha una propria frequenza e uno stesso codice, nel GPS tutti i satelliti utilizzano le stesse frequenze, ma hanno codici diversi. Il GLONASS impiega il protocollo FDMA mentre il GPS quello CDMA. Le orbite GLONASS hanno un'altitudine leggermente inferiore a quelle del GPS, così che si ripetono ogni 8 giorni.

1.5. Galileo

Galileo è il terzo sistema di navigazione satellitare esistente ed è ancora in fase di costruzione. In questo caso il controllo del sistema è civile e non militare. Galileo è in grado di fornire un'elevata accuratezza garantendo un servizio globale di posizionamento. I primi satelliti di Galileo, GIOVE-A e GIOVE-B, sono stati lanciati rispettivamente nel 2005 e nel 2008.

Altri due satelliti sono stati lanciati nell'ottobre 2011 e hanno iniziato a trasmettere nel dicembre 2011. Il sistema è diventato operativo nell'agosto 2014, con il lancio di due ulteriori satelliti. Il completamento della costellazione è previsto per il 2017, anno in cui nelle orbite saranno presenti 24 satelliti, più 4 di riserva.

La differenza principale tra il sistema GPS e Galileo è che quest'ultimo utilizza soltanto tre piani orbitali invece di 6, ognuno contenente 9 satelliti. Ogni orbita si trova a un'altitudine di 23616 km e ha un periodo di 14,22 ore (**Fig. 1.7**). Le orbite sono inclinate di 56° rispetto all'equatore in modo da assicurare una buona copertura delle latitudini polari, che sono scarsamente servite dal GPS. Galileo trasmette il segnale su 4 bande di frequenza: E5a, E5b, E6 e L1 e fornisce 4 tipologie di servizio rispetto al GPS.

1.6. COMPASS (BeiDou-2), Sistema di Posizionamento Satellitare Regionale Indiano (IRNSS) e Sistema Satellitare Quasi-Zenith (QZSS)

Un sistema cinese chiamato COMPASS, che è lo sviluppo della prima generazione del sistema BeiDou, è attualmente in fase di costruzione. BeiDou è stato sviluppato dalla Repubblica Popolare Cinese (PRC) iniziando con servizi regionali e, entro il 2020, ne è prevista l'espansione al servizio globale. Saranno fornite due tipologie di servizio: libero per uso civile e autorizzato per il governo cinese ed i militari.

BeiDou-2 sarà costituita da 35 satelliti che offriranno una copertura globale completa. I segnali trasmessi sono basati sul principio CDMA. Le frequenze sono ripartite in quattro bande: E1, E2, E5b ed E6, sovrapposte a Galileo.

L'IRNSS è un sistema di navigazione satellitare regionale autonomo che è stato sviluppato dall'Organizzazione Indiana per le Ricerche Spaziali (ISRO), che è sotto il completo controllo del governo. La necessità di sviluppare questo sistema di navigazione è nata dal fatto che l'accesso al GPS non è garantito in situazioni ostili. Anche questo sistema fornisce due servizi: quello per uso civile e l'altro disponibile solo per gli utenti autorizzati. È stato pianificato che l'intero sistema sia realizzato entro il 2014 e dovrebbe consistere in una costellazione di sette satelliti e un segmento di

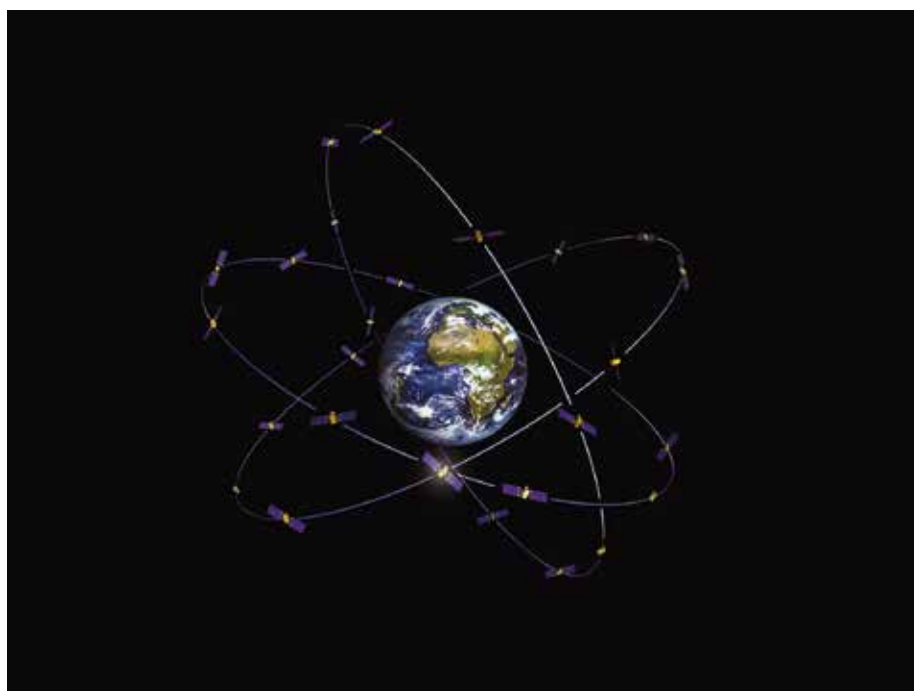


Fig. 1.7 Schema della costellazione Galileo contenente le tre orbite con nove satelliti ciascuna (immagine ESA rielaborato da Gibbons Media & Research LLC, 2013).

supporto terrestre. I segnali IRNSS saranno trasmessi sulle bande L5 (1176,45 Mhz) e S (2492,08 MHz).

Il QZSS è un sistema di posizionamento composto da tre satelliti sviluppato allo scopo di potenziare il GPS. Il QZSS può intensificare i servizi GPS in due modi: aumentando la disponibilità di segnali GPS e potenziandone il rendimento, in modo da aumentarne l'accuratezza e l'affidabilità.

1.7. Dispositivi di navigazione GNSS

Il sistema di navigazione GNSS è basato sull'utilizzo di dispositivi in grado di ricevere i segnali GNSS con lo scopo di determinare la loro posizione corrente sulla Terra. I dispositivi GNSS forniscono informazioni sulla latitudine e sulla longitudine. I prodotti di navigazione GNSS si contraddistinguono per la compattezza dei loro componenti e delle interfacce utente e vengono utilizzati per molte operazioni agricole. Il GNSS permette di effettuare una gestione sito-specifica delle pratiche e delle risorse agricole nel tentativo di ottimizzare l'efficienza produttiva e al contempo di minimizzare i costi ambientali. I sistemi GNSS sono particolarmente utili per l'applicazione dei pesticidi e dei fertilizzanti, e per monitorare le seminatrici e le macchine per la raccolta. Nel caso dell'impianto delle colture, i sistemi di navigazione aiutano gli operatori a ridurre le fallanze e le sovrapposizioni, specialmente quando vengono impiegati metodi basati su stime visive della distanza tra le piante e/o del numero di file. Inoltre, questa tecnologia riduce la possibilità di un'applicazione errata degli agrofarmaci e ha la potenzialità di salvaguardare la qualità dell'acqua. Infine, i dispositivi di navigazione GNSS possono essere utilizzati per mantenere un sistema a traffico controllato anno dopo anno, in modo da minimizzare il compattamento del terreno. Gli agricoltori hanno iniziato ad adottare questi sistemi, perché la navigazione GNSS rappresenta una possibilità eccellente per aumentare l'accuratezza, la velocità e l'uniformità delle operazioni agricole. Un corretto allineamento e un'appropriata installazione di un sistema di navigazione GNSS è un requisito fondamentale per una gestione efficace delle pratiche di campo. Sistemi di controllo di sterzata di bassa qualità, un terreno in pendenza o macchine operatrici disallineate possono causare gravi problemi alle prestazioni dei navigatori GNSS. Un terreno in pendenza rende impegnativo il controllo delle dinamiche di un veicolo. L'inclinazione laterale e frontale del trattore e la rotazione intorno all'asse verticale alterano la posizione dell'antenna GNSS rispetto al centro di un veicolo proiettato sul terreno (**Fig. 1.8**). Ad esempio, durante la guida su un terreno in pendenza, la posizione orizzontale dell'antenna GNSS è inclinata rispetto al centro del veicolo e la guida avviene in maniera errata (**Fig. 1.9**). Alcuni sistemi si avvalgono di giroscopi, accelerometri o antenne GPS aggiuntive per risolvere il problema. Dispositivi meno avanzati compensano solamente l'inclinazione laterale e frontale, mentre altri possono rilevare l'assetto dinamico con sei gradi di libertà, consentendo al sistema di navigazione di affrontare terreni caratterizzati da pendenze variabili.

1.7.1. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per creare mappe delle piante

L'RTK-GNSS (caratterizzato da errori di circa ± 2 cm) può essere utilizzato per creare una mappa delle piante monitorando la posizione dei semi o delle piantine durante la semina o il trapianto. Successivamente, la mappa delle piante può essere sfruttata per l'esecuzione dei trattamenti agronomici. Le applicazioni dell'agricoltura di precisione come il monitoraggio delle rese, la distribuzione di prodotti a rateo

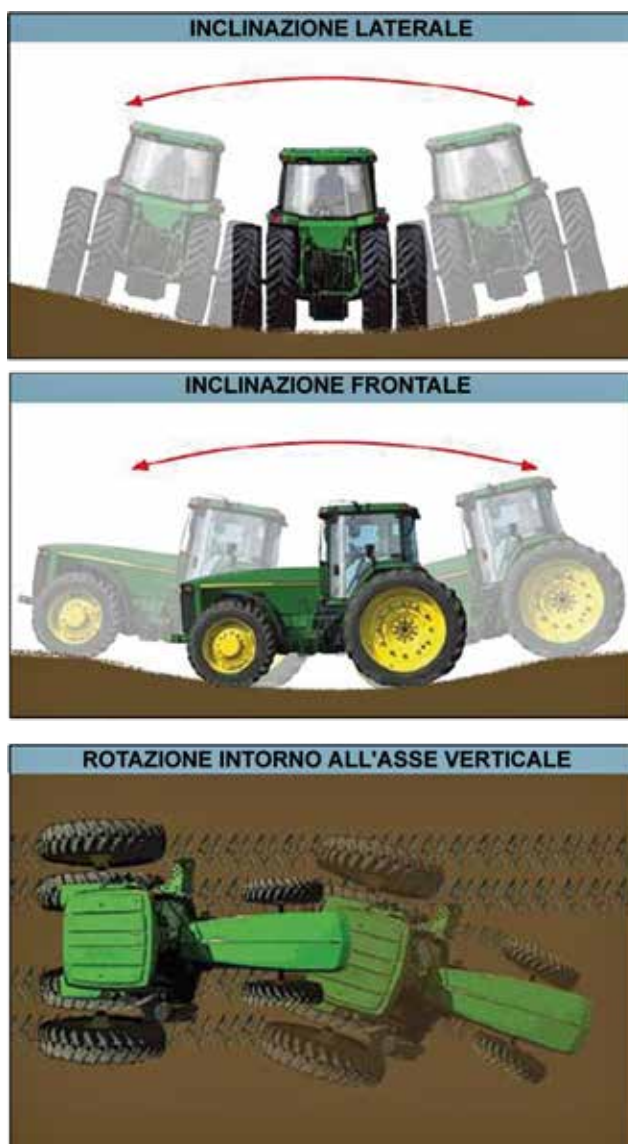


Fig. 1.8 Compensazione necessaria in base all'orientamento del veicolo ed alle operazioni in campo (rielaborato da Grisso et al., 2009a).

variabile, la mappatura delle piante, la gestione sito-specifica, etc. necessitano di un numero elevato di sensori per l'acquisizione dei dati in campo, che però possono essere collegati soltanto realizzando una mappa per mezzo delle informazioni di posizione fornite da un ricevitore GNSS. Alcuni ricercatori hanno sviluppato una seminatrice adattata con un dispositivo RTK-GPS costituito da due microcomputer, uno dei quali effettua il monitoraggio dei semi utilizzando sensori ottici (uno per fila) e registra l'evento insieme con l'orario. Vengono ottenute così le coordinate RTK-GPS che sono registrate insieme alla variabile temporale. Il secondo microcomputer esegue il monitoraggio del primo microcomputer e mostra le informazioni riguardanti le prestazioni della seminatrice su uno schermo installato nella cabina di guida. La variabile temporale permette di determinare la posizione esatta dove un seme è stato deposto nel terreno rendendo facile la creazione di una mappa di semina. Le mappe così ottenute possono essere utilizzate successivamente per applicazioni di controllo delle infestanti, poiché ciascuna pianta osservata in una posizione differente rispetto a quella in cui si trovavano i semi viene classificata come infestante.

In uno studio simile, è stato testato un sistema per la semina di precisione capace di creare automaticamente una mappa dei semi in un campo di barbabietola da zucchero utilizzando un RTK-GPS per il posizionamento e sensori ottici per osservare la caduta del seme dal distributore. È stato osservato un errore medio fra la mappa dei semi generata automaticamente con il GPS e la posizione effettiva delle piante dopo l'emergenza variabile tra 16 e 43 mm, a seconda della velocità di avanzamento della seminatrice e della distanza tra i semi sulla fila. Gli errori di posizione sono stati attribuiti alla mancanza di accuratezza del sistema di posizionamento RTK-GPS, al movimento della seminatrice rispetto all'antenna GPS, allo spostamento dei semi dopo il passaggio dei sensori ottici (ad esempio il rimbalzo dei semi nei solchi) e alle condi-

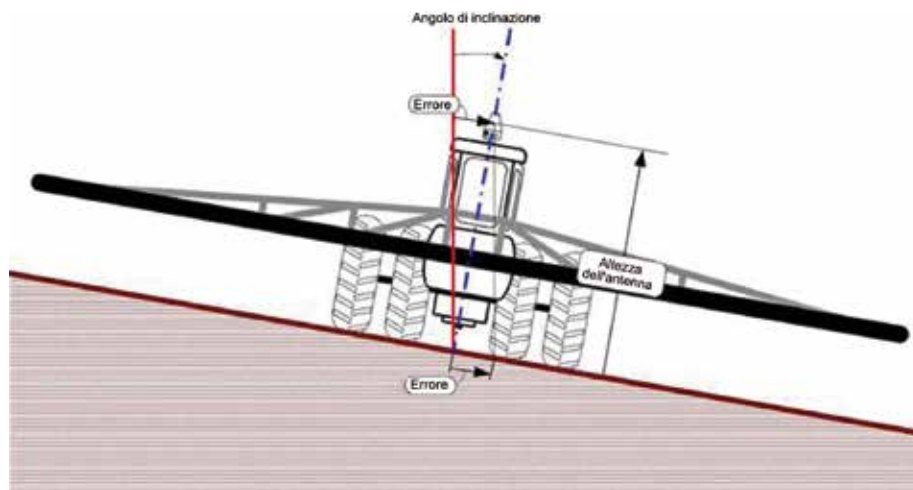


Fig. 1.9 Errore di posizionamento dell'antenna su un terreno in pendenza (rielaborato da Grisso *et al.*, 2009a).

zioni del suolo (ad esempio presenza di zolle) che possono incidere su una deviazione della localizzazione della pianta emersa rispetto alla posizione iniziale del seme.

In altre ricerche è stato sviluppato un sistema di mappatura delle piante con un livello di accuratezza centimetrico per colture trapiantate che utilizza un RTK-GPS montato sul trattore. Quando un trattore è equipaggiato con un sistema RTK-GPS che fornisce i dati sulle coordinate può essere creata una mappa rilevando la posizione delle piante durante il trapianto con un'accuratezza di circa 3,2 cm. La figura 1.10 mostra la localizzazione delle piante determinata dalla trapiantatrice dotata di sistema di mappatura automatico (triangoli gialli). La fotografia inserita mostra le misurazioni effettuate con il sistema di telerilevamento manuale RTK-GPS della posizione delle piante ottenuta durante i campionamenti. I punti effettivi ottenuti attraverso rilievi manuali (cerchi neri) sono stati sovrapposti alla mappa generata automaticamente in modo da effettuare una comparazione.

Il maggior vantaggio di utilizzare la tecnologia RTK-GPS per la mappatura anziché i metodi basati sulla visione artificiale è dato dal fatto che l'accuratezza e la

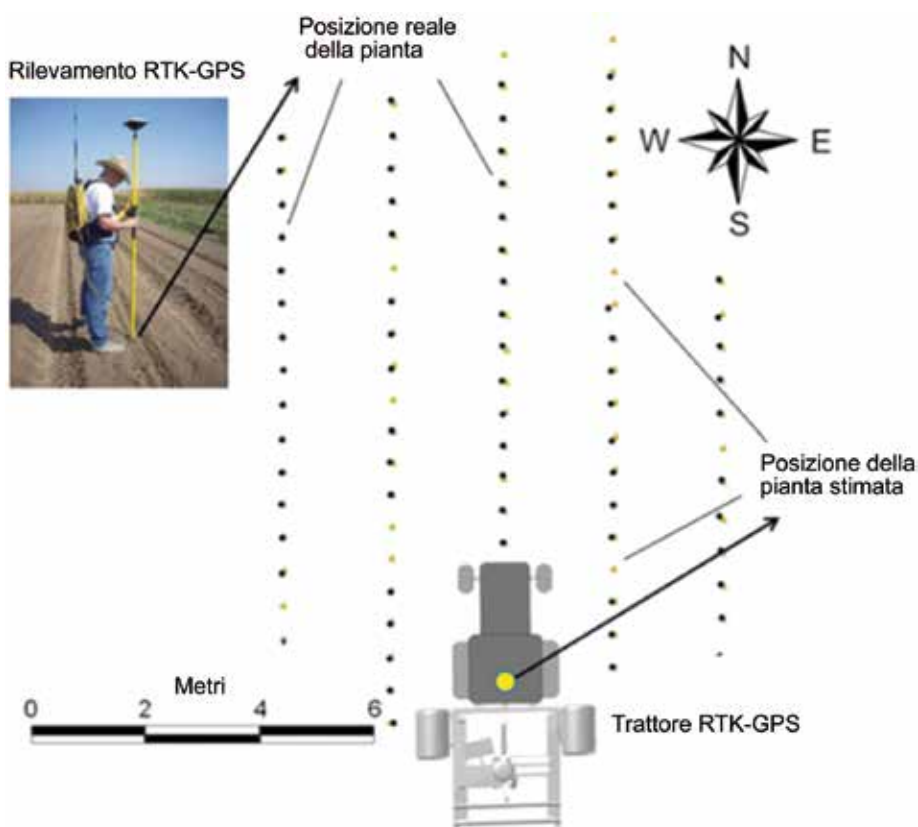


Fig. 1.10 Mappa georeferenziata della coltura generata automaticamente (rielaborato da Perez-Ruiz & Upadhyaya, 2012).

precisione sono indipendenti dall'aspetto visivo della coltura, dalle ombre, dalle piante mancanti, dalla densità delle infestanti o da altre condizioni che ostacolano le prestazioni della visione artificiale. Inoltre il posizionamento con l'RTK-GNSS non richiede conoscenze specifiche sulla coltura, quali ad esempio la morfologia biologica o le caratteristiche di riflettanza spettrale. Infine, mentre le tecniche basate sulla visione artificiale sono gravemente ostacolate dall'occlusione o dal cambiamento dell'aspetto della pianta con il passare del tempo, le mappe ottenute con il GNSS rimangono valide per tutto il ciclo colturale e non sono influenzate dalla diversità o dalla quantità delle specie infestanti presenti.

1.7.2. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per la guida automatica delle macchine agricole

La definizione e la realizzazione di sistemi di guida automatica per le macchine agricole (trattori, raccogliatrici, irroratrici, spandiconcime) è stata effettuata per diverse ragioni, la più importante delle quali riguarda la possibilità di alleviare l'operatore dal fare continui aggiustamenti della sterzata nel tentativo di mantenere le prestazioni di una macchina agricola a livelli accettabili. Alcuni dispositivi relativamente economici conosciuti come Parallel-Tracking aiutano gli operatori a visualizzare la loro posizione rispetto alle passate precedenti, mettendoli in grado di realizzare se sono necessari aggiustamenti della sterzata. Questi aiuti sono disponibili in commercio con svariate configurazioni. Uno di questi è la Barra Luminosa (**Fig. 1.11**) che consiste in una serie di diodi a emissione luminosa (LED) disposti in una scatola di plastica. Questo sistema è collegato a un ricevitore GNSS e a un microprocessore. La Barra Luminosa viene solitamente posizionata di fronte all'operatore, così che possa vedere lo schermo che indica l'accuratezza senza distogliere lo sguardo dal campo. La Barra Luminosa può essere montata sia all'interno che all'esterno della cabina. Quando la luce è sulla linea centrale la macchina è allineata, quando invece una barra di luce è spostata verso sinistra o verso destra la macchina è fuori traiettoria e necessita di essere corretta.

I sistemi di navigazione più avanzati (sistemi automatici di sterzata) hanno funzionalità simili ai dispositivi Parallel-Tracking e possiedono inoltre l'opzione addizionale di far sterzare automaticamente il veicolo. Un sistema automatico di sterzata è realizzato con un dispositivo che agisce sulla colonna dello sterzo oppure sul sistema elettro-idraulico. La precisione di questi sistemi si basa sulla qualità della correzione differenziale e sull'elaborazione interna dei dati. All'aumentare dell'accuratezza corrispondono costi più elevati dei dispositivi.

Negli ultimi anni i trattori con guida automatica equipaggiati con RTK-GNSS si stanno diffondendo sempre di più. I sistemi di guida automatici basati sull'RTK-GNSS possono essere utilizzati per effettuare sarchiature o per distribuire fitofarmaci molto vicino alle file della coltura (circa 5 cm) a una velocità di avanzamento sensibilmente elevata (più di 11 km h⁻¹). Con questo sistema viene inoltre evitato il rischio di danneggiare le manichette di irrigazione interrate quando vengono effettuate lavorazioni con discursori, quali chisel o subsoiler.

1.7.3. Utilizzo dei dispositivi di navigazione GNSS per l'applicazione degli agrofarmaci

L'impiego del GNSS per l'applicazione degli agrofarmaci sta aumentando rapidamente e esistono sul mercato molti sistemi che adottano questo strumento. I dispositivi di navigazione GNSS riducono l'utilizzo degli agrofarmaci attraverso la diminuzione delle sovrapposizioni. Ad esempio se una sovrapposizione del 10% è ridotta al 5% anche l'uso degli agrofarmaci diminuisce del 5%. La stessa cosa vale per i fertilizzanti e per i semi. Per questo il GNSS è uno strumento organico a una gestione sostenibile delle attività agricole, in quanto appare in grado di tutelare l'ambiente e nel contempo di ridurre i costi di produzione.

Il sistema può inoltre ridurre la fatica e l'ansia dell'operatore legata all'applicazione dei fitofarmaci e dei fertilizzanti. Infine, l'uso di questa tecnologia può aiutare a dimostrare anche ai non "addetti ai lavori" che le tecnologie avanzate possono essere impiegate su scala aziendale in modo da aumentarne l'efficienza e la sicurezza.

Un RTK-GNSS collegato ad una stazione base può essere utilizzato per guidare

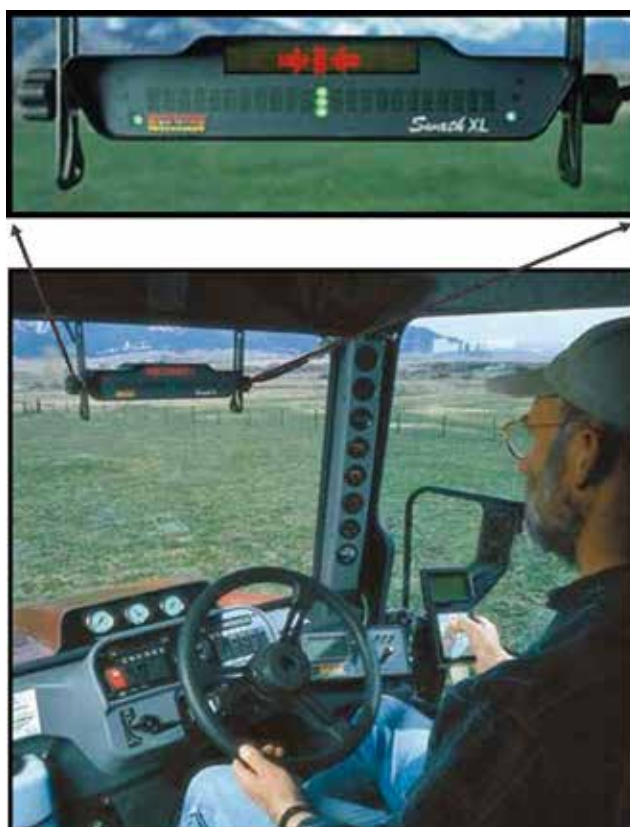


Fig. 1.11 Sistema di navigazione a Barra Luminosa installato nella cabina di una trattore (rielaborato da Grisso *et al.*, 2009a).

trattori o macchine operatrici allo scopo di effettuare trattamenti in banda o per aumentarne l'efficienza generale.

La distribuzione di fitofarmaci in banda è in grado di ridurre gli input, con conseguenti vantaggi sia economici che ambientali. Tuttavia, per ottenere un completo beneficio è necessario mantenere un'elevata precisione per lunghi periodi.

1.8. Visione computerizzata

La visione computerizzata è la scienza responsabile dello studio e dell'applicazione di metodi che permettono ai computer di analizzare e di valutare il contenuto di un'immagine. Questa interpretazione comporta l'estrazione di alcune caratteristiche che sono importanti per un dato scopo. Un sistema di ispezione visiva richiede un'immissione di dati (immagine), ottenuti solitamente con fotocamere o videocamere, e una successiva elaborazione degli stessi per trasformarli nelle informazioni desiderate. Lo sviluppo della visione computerizzata ha comportato la messa a punto di sistemi in grado di duplicare le abilità della visione umana, percependo ed interpretando elettronicamente un'immagine.

L'utilizzo della visione computerizzata in agricoltura è abbastanza diffuso e ha molteplici applicazioni, quali: il rilevamento delle malattie delle piante, della qualità dei frutti, della fioritura, delle aree coltivate, la stima delle rese, etc. Attualmente l'agricoltura rappresenta uno dei principali campi di applicazione della visione computerizzata, poiché nell'analisi di prodotto è richiesta una riproduzione della percezione umana (la vista) per analizzare caratteristiche quali la taglia, la forma, la tessitura, la brillantezza, il colore, etc., che sono direttamente influenzate dalla valutazione della qualità.

Nonostante i sistemi di ispezione visiva siano organizzati in base a una particolare applicazione, sono stati osservati degli stadi comuni e tipici nei diversi metodi computazionali: l'acquisizione dell'immagine, la pre-elaborazione, la segmentazione, l'estrazione delle caratteristiche e l'elaborazione vera e propria. La fase di acquisizione consiste nel catturare un'immagine reale e trasformarla in un equivalente digitale utilizzando dispositivi quali fotocamere, scanner, videocamere, etc. Un'immagine digitale è una rappresentazione numerica che può essere elaborata computazionalmente. La pre-elaborazione è la fase che precede l'estrazione delle caratteristiche, e ha lo scopo di migliorare l'immagine acquisita, evidenziandone le caratteristiche o le regioni di interesse, così da rimuovere le distorsioni e gli elementi di disturbo senza aggiungere ulteriori informazioni al contenuto. La pre-elaborazione coinvolge le tecniche capaci di valutare i dettagli e rimuovere ogni elemento di disturbo che potrebbe interferire nell'analisi degli oggetti e/o delle regioni di interesse. In questo contesto è disponibile una grande varietà di tecniche che permettono di mettere in evidenza la scala dei grigi e la trasformazione dei colori, così come le soglie e i filtri. Questo rappresenta uno stadio davvero importante in un sistema di ispezione auto-

matico. Il processo di segmentazione può essere basato sulla similarità del colore di ogni pixel e dei pixel vicini. A volte pixel simili, in termini di colore, non fanno parte dello stesso oggetto o della stessa caratteristica. L'estrazione dei parametri consente l'associazione tra le regioni dell'immagine e gli oggetti nella scena. Lo stadio finale (elaborazione) mira a riconoscere e a interpretare le immagini, cercando di dare senso al gruppo di oggetti in esse contenuti, con lo scopo di aumentare la visualizzazione umana e la percezione dei dati computerizzata.

Dopo gli stadi di pre-elaborazione e di segmentazione, l'immagine è pronta per l'estrazione di caratteristiche importanti, da cui è possibile ottenere dati sull'oggetto che deve essere analizzato. Le più comuni caratteristiche estratte sono il numero di oggetti, le dimensioni, la geometria, la luminosità e la tessitura e possono essere raggruppate in 4 categorie: morfologiche, cromatiche, di tessitura e strutturali. Le caratteristiche morfologiche, come la rotondità, la superficie, la larghezza, etc., consistono nella misurazione della forma degli oggetti presenti senza considerare l'intensità dei pixel, e possono essere calcolate sulle immagini binarie derivanti dall'elaborazione di quelle a colori.

Le proprietà cromatiche descrivono il colore o la composizione spettrale delle radiazioni emesse o riflesse dagli oggetti, quantificate dall'intensità dei pixel nelle diverse bande dello spettro. Le caratteristiche di tessitura consistono nella misura della variabilità locale dell'intensità dei pixel. La struttura o le caratteristiche contestuali descrivono la relazione tra uno o più oggetti che formano l'immagine.

Le applicazioni della visione artificiale in agricoltura possono essere classificate nelle tre seguenti aree: misurazioni non-distruttive, navigazione visiva e sorveglianza comportamentale. In conformità con l'aumento delle conoscenze nel campo della ricerca e dello sviluppo e alla disponibilità di hardware non costosi e veloci, i sistemi automatici di visione artificiale sono diventati soluzioni promettenti per la valutazione della qualità e per la classificazione delle piante.

Negli ultimi anni è stato sviluppato un sistema di guida basato sulla visione artificiale con campo visivo variabile per la gestione di un robot fra le file di mais. Il sistema permette di guidare il robot con un'accuratezza e una stabilità accettabile, senza danneggiare la coltura. La visione artificiale è stata utilizzata anche per individuare e per identificare specie vegetali (sia colture che infestanti) sulla base della loro forma, del colore e della tessitura.

1.9. Il telerilevamento

Il telerilevamento è il soggetto di studio associato con l'estrazione delle informazioni riguardanti un oggetto senza venire in contatto fisico con esso. Esistono due tipi principali di telerilevamento: passivo e attivo. I sensori passivi individuano la radiazione naturale che viene emessa o riflessa da un oggetto o dalle aree circostanti. La luce solare riflessa è la più comune fonte di radiazione misurata dai sensori passi-

vi. Esempi di sensori passivi includono la fotografia su pellicola, gli infrarossi e i radiometri. I sensori attivi, invece, emettono energia in modo da eseguire la scansione degli oggetti e delle aree, dopo di che un sensore rileva e misura la radiazione riflessa o retro-diffusa dal bersaglio. Il telerilevamento utilizza i satelliti e le immagini aeree ottenute da velivoli per l'acquisizione dei dati. Attualmente per l'acquisizione delle informazioni sono disponibili numerose piattaforme senza pilota, aerei e sistemi di telerilevamento basati sui satelliti, caratterizzati da differenti risoluzioni temporali, spaziali e spettrali.

La protezione delle colture in agricoltura di precisione richiede informazioni spaziali esplicite sull'eterogeneità in campo delle condizioni di crescita delle piante in determinati momenti. Il telerilevamento offre la possibilità di identificare questa eterogeneità con una spesa relativamente ridotta e potrebbe essere utilizzato nella raccolta dei dati, nella mappatura della variabilità di campo e nel processo decisionale della pratica dell'agricoltura di precisione.

Il telerilevamento è utilizzato in molte applicazioni agricole quali il monitoraggio delle proprietà del suolo, la mappatura, la classificazione delle colture, la gestione delle specie nocive, l'identificazione dello stress idrico delle piante, l'analisi del contenuto chimico delle foglie e il rilievo delle infestanti. Il telerilevamento ambientale fa uso essenzialmente dell'energia radiante per estrarre le informazioni sulle caratteristiche del terreno su grandi estensioni in un breve periodo di tempo. Il telerilevamento, insieme a altre tecniche geospaziali, è stato applicato in agricoltura a partire dagli anni '50.

1.10. I sistemi aerei senza pilota (Unmanned Aerial Systems – UAS)

I recenti progressi tecnologici nell'ingegneria aerospaziale hanno permesso di sviluppare il sistema di telerilevamento a bassa altitudine del sistema (LARS), un concetto relativamente nuovo di acquisizione delle immagini della superficie terrestre a bassa altitudine che è stato promosso come un'alternativa alle comuni piattaforme precedentemente impiegate. A tal fine, vengono utilizzati velivoli senza pilota (UAS). La risoluzione spaziale estremamente elevata (centimetrica), i costi operativi relativamente bassi e l'acquisizione delle immagini in tempo reale rendono questi sistemi particolarmente promettenti, in quanto potrebbero rappresentare la soluzione tecnologica ideale per effettuare la mappatura e il monitoraggio in agricoltura di precisione.

Le comuni piattaforme di telerilevamento includono i satelliti, gli aerei, le mongolfiere e gli elicotteri equipaggiati con una varietà di sensori come quelli ottici, quelli a infrarossi e i RADAR. Le informazioni diagnostiche derivate dalle immagini raccolte con questi sensori a bordo, come la biomassa, l'indice di area fogliare (LAI), le patologie e lo stress idrico, possono così essere di aiuto nella gestione delle colture, nella previsione delle rese e nella protezione dell'ambiente.

Le immagini acquisite con gli UAS sono caratterizzate da una risoluzione temporale e spaziale più alta rispetto a quella garantita dalle immagini satellitari. Inoltre gli UAS rappresentano un'alternativa poco costosa e più pratica rispetto agli altri sistemi di telerilevamento.

Negli ultimi anni, piccoli UAS in commercio (<50 kg) sono diventati disponibili per applicazioni ambientali e agricole. Molte applicazioni utilizzano piccoli velivoli senza pilota, elicotteri senza pilota, alianti motorizzati, paracaduti motorizzati e droni (**Fig. 1.12**).

Complementarmente alle numerose piattaforme disponibili, esistono numerosi tipi di sensori per il telerilevamento che possono essere utilizzati per effettuare la raccolta dei dati. I sensori per acquisire le immagini includono le fotocamere di tipo commerciale e quelle digitali modificate con una banda dell'infrarosso.

Un GNSS a bordo dell'UAS e una stazione di controllo terrestre con un sistema di pianificazione del volo sono necessari per ottenere immagini da utilizzare per la futura georeferenziazione e/o per creare mosaici o immagini dei punti predefiniti. Le immagini acquisite possono così essere trasmesse alla stazione terrestre o stocate nella memoria dell'unità del sensore fino a che il veicolo non atterra. Per le nuove generazioni di UAS esistono componenti per la navigazione e per il controllo del volo. La componente di navigazione è utilizzata per controllare la traiettoria di volo dell'UAS e per monitorare o correggere lo stato del volo (posizione e orientamento) della piattaforma. La componente di controllo del volo è usata per mantenere la



Fig. 1.12 Esempi di UAS correntemente utilizzati per studi ambientali: (A) aliante motorizzato, (B) paracadute motorizzato, (C) elicottero, (D) aereo ad ali fisse, (E) drone Draganflyer X8 e (F) drone Aeryon Scout (rielaborato da Zhang & Kovacs, 2012).

stabilità della piattaforma in modo da assicurare che la posizione della piattaforma sia ottimale per l'acquisizione delle immagini. La stazione terrestre fornisce un'interfaccia utente che include la programmazione del volo, il controllo del volo e/o l'acquisizione delle immagini (**Fig. 1.13**).

Le immagini acquisite con gli UAS sono state impiegate con successo per mappare le specie erbacee, la vegetazione nei pascoli e gli incendi boschivi, per misurare la biomassa degli arbusti, per fornire informazioni per la gestione dei vigneti, etc.. Esse sono state inoltre impiegate per individuare piccole aggregazioni di infestanti nei pascoli, per documentare lo stress idrico e per monitorare la biomassa delle colture, per mappare il vigore dei vigneti e per esaminare i risultati determinati dall'impiego di diverse dosi di azoto sulle colture. Gli UAS sono stati utilizzati anche per valutare i sistemi irrigui su scala aziendale, per campionare il polline, le spore e gli agenti patogeni.

Le norme dell'aviazione potrebbero rappresentare uno dei maggiori impedimenti all'adozione degli UAS nelle applicazioni ambientali e agricole. In molti Paesi queste norme sono piuttosto permissive, come in Germania, dove non sono richiesti permessi per UAS con massa complessiva inferiore a 5 kg e luogo di volo che disti 1,5 km dalle aree residenziali e dai campi di aviazione. Tuttavia, negli Stati Uniti è necessario possedere un Certificato di Autorizzazione (COA) così come una squadra a terra durante l'operazione. Anche in Canada viene richiesto un certificato speciale per le operazioni di volo (SFOC) annuale ed è fortemente raccomandato un certo livello di formazione per l'uso degli UAS. Come parte del certificato, è richiesta un'assicurazione in caso di guasti alla piattaforma che potrebbero causare danni a esseri umani, bestiame o edifici. Questi requisiti sono sentiti come il più grande ostacolo all'utilizzo degli UAS negli studi ambientali.



Fig. 1.13 Esempi di stazioni di controllo degli UAS: (A) la stazione di comando per il Aeryon Scout UAS, (B) il controllore per il Draganflyer X8 UAS (rielaborato da Zhang & Kovacs, 2012).

1.11. I sensori prossimali

I sensori per la coltura, il suolo e il posizionamento, oltre al telerilevamento, includono i sensori prossimali (sensori terrestri e fotocamere) che individuano la tessitura e l'umidità del suolo, gli stress colturali, le patologie e le infestanti. Il rilevamento prossimale, che utilizza sensori a breve distanza, ha recentemente ricevuto un interesse crescente. Molti tipi di sensori prossimali sono attualmente disponibili. I sensori "on-the-go" si riferiscono alle tecnologie di rilevamento prossimale utilizzate per raccogliere dati durante lo spostamento attraverso un luogo. Un esempio è quello di impiegare un sensore on-the-go per misurare le proprietà di un terreno basandosi sulla spettroscopia visibile e del vicino infrarosso. Un vantaggio chiave di questi sensori è quello di mappare le variazioni spaziali del suolo e della coltura a livello di campo o porzione di esso, come contributo prezioso per il supporto alle decisioni. Una serie di strumenti on-the-go sono disponibili per misurare i parametri essenziali sul suolo e sulle colture.

Alcuni sistemi di rilevamento prossimale possono essere collocati in una posizione stazionaria del campo con la finalità di effettuare le misurazioni in un singolo luogo, produrre una serie di misure relative a differenti profondità oppure monitorare i cambiamenti delle proprietà del suolo. Sebbene le misurazioni in un singolo luogo possano essere utili per molte applicazioni, le mappe del suolo tematiche ad

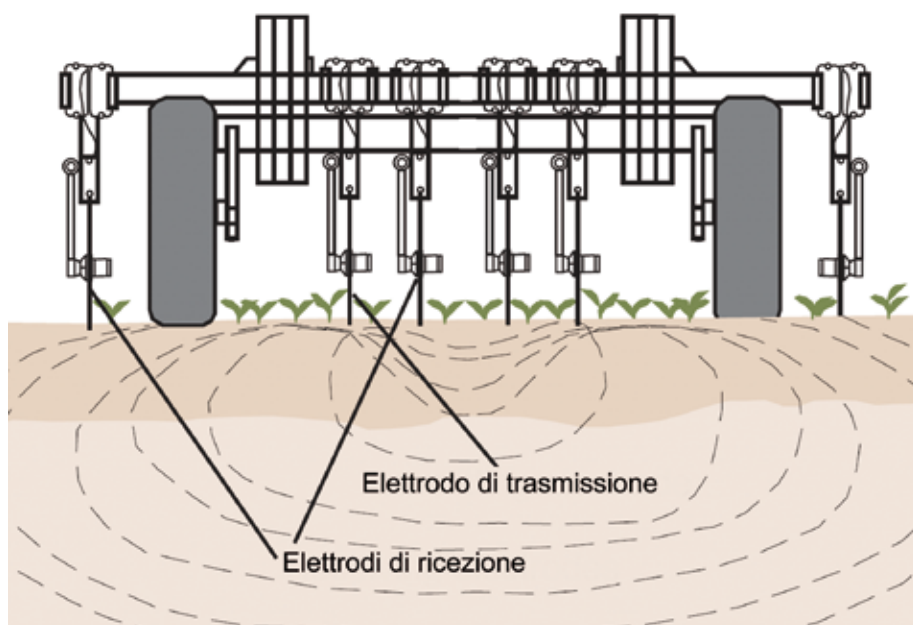


Fig. 1.14 Sistema per la mappatura della conducibilità elettrica Veris® EC Probe (rielaborato da Adamchuck & Jasa, 2002).

alta risoluzione possono essere ottenute soltanto nel caso in cui le misurazioni vengono effettuate mentre il sistema di sensori si muove attraverso un campo. Queste tecnologie di rilevamento prossimale del suolo on-the-go sono diventate un argomento multidisciplinare per la ricerca e il loro sviluppo fornisce strumenti essenziali per l'agricoltura di precisione.

Sensori prossimali per le colture sono stati usati per determinare, sia parametri fisiologici come la biomassa, il contenuto di clorofilla, l'altezza, etc. che denotano uno stato spazialmente non uniforme delle colture agricole, sia la carenza di azoto o lo stress idrico. I sensori che misurano una serie di proprietà essenziali del suolo durante il loro passaggio possono essere impiegati per controllare le macchine operatrici per l'applicazione a rateo variabile in tempo reale, oppure, in combinazione con i dispositivi GNSS, per generare mappe di campo che rappresentano la variabilità di particolari proprietà del suolo.

1.11.1. I sensori elettromagnetici

I sensori elettromagnetici utilizzano circuiti elettrici per misurare la capacità delle particelle del terreno di condurre o accumulare carica. Quando questi sensori vengono usati, il suolo diventa parte di un circuito elettromagnetico, e i cambiamenti delle condizioni locali influenzano immediatamente il segnale registrato dai data logger. La tessitura del suolo, la salinità, la sostanza organica e il contenuto idrico influenzano le proprietà elettromagnetiche del terreno. In alcuni casi, altre proprietà del suolo come i residui azotati o il pH possono essere monitorati utilizzando questi sensori.

Un sensore elettromagnetico disponibile in commercio è il Veris® EC Probe (**Fig. 1.14**), che misura la conducibilità elettrica impiegando un set di elettrodi che inviano un segnale attraverso il terreno. Il segnale viene ricevuto da due set di elettrodi che misurano il calo di tensione dovuto alla resistività del suolo, indicando la conducibilità elettrica di due intervalli di profondità.

1.11.2. I sensori ottici e optoelettronici

I sensori ottici utilizzano la spettroscopia di riflettanza per individuare il livello di energia assorbito e quello riflesso dalle particelle del suolo e dagli ioni nutritivi. Questi sensori possono simulare l'occhio umano quando guarda il suolo, così come possono misurare il vicino infrarosso, il medio infrarosso o la riflessione della luce polarizzata. I sensori ottici installati sui veicoli usano la stessa tecnica di principio del telerilevamento.

I sensori optoelettronici abbinano i sistemi ottici e quelli elettronici. Il sensore optoelettronico di tipo base combina fibre di conduzione della luce con la spettrofotometria, la fluorimetria o la riflettometria. È in grado di indicare i cambiamenti dei parametri ottici, come l'assorbimento della luce, la lunghezza d'onda o l'indice di rifrazione, in quella parte del mezzo di misurazione immediatamente circostante la

fibra. Questi dispositivi includono un singolo o un doppio fascio di fibre ottiche atte alla misurazione della luce incidente e del fascio di luce.

Dal momento che i sensori optoelettronici non sono dotati di visione computerizzata, non sono in grado di discriminare coltura e infestanti, pertanto il loro utilizzo è limitato all'interfila della coltura. Nonostante ciò, sono stati riportati risultati incoraggianti riguardo all'utilizzo di sensori optoelettronici appositamente progettati per lavorare su frumento seminato con interfila pari a 0,25 m o per altri monitoraggi comunque limitati allo spazio tra le file. Le informazioni non specifiche generate da questo tipo di sensore possono essere utili per individuare le zone ad alto rischio di infestazione da parte delle specie spontanee.

I sensori ottici a distanza ravvicinata, sotto-superficiali, installati sui veicoli (**Fig. 1.15**) possono essere impiegati in movimento e riuscendo a fornire maggiori informazioni in merito a singoli punti di dati, poiché la riflettanza può essere facilmente misurata in più di una parte dello spettro per volta.

I sensori ottici sono stati utilizzati in passato per mappare e/o per trattare con erbicidi chimici le aggregazioni di infestanti presenti su terreni incolti o in varie colture a fila larga. A tale riguardo, infatti, i dati relativi alla riflettanza del terreno nudo contrastano con il verde delle infestanti cresciute tra le file della coltura e permettono ad alcune irroratrici di attivare o disattivare il dispositivo per l'applicazione degli erbicidi. Un esempio di un'unità in commercio è il sistema WeedSeeker[®], che ha un sensore di riflettanza in grado di identificare la clorofilla. Il microprocessore interpreta quei dati e quando viene superato un segnale di soglia, in presenza di infestanti, un dispositivo di controllo attiva gli ugelli dell'irroratrice. Il sistema WeedSeeker[®] è stato sviluppato basandosi su sensori ottici di prossimità che utilizzano

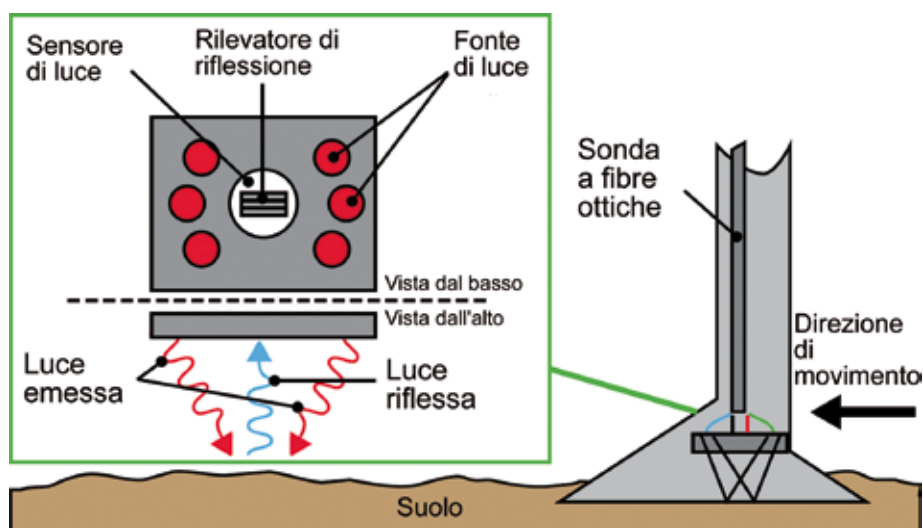


Fig. 1.15 Sezione trasversale schematica di un sensore ottico sottosuperficiale di riflessione del suolo utilizzato per misurare la sostanza organica (rielaborato da Adamchuck & Jasa, 2002).

il vicino infrarosso e le misurazioni della riflessione della luce per distinguere fra il verde della vegetazione, il terreno nudo e i residui colturali. Ciascuna unità sensoriale è costituita da una sorgente di luce e da un sensore ottico (**Fig. 1.16**). I sensori sono montati su una barra o sull'irroratrice davanti agli ugelli e sono direzionati verso il terreno. Quando un segnale di riflettanza "verde" della clorofilla oltrepassa una soglia (stabilita da un operatore durante la calibratura) dal dispositivo di controllo viene inviato un segnale a un'elettrovalvola per la distribuzione dell'erbicida. Il sistema è stato progettato per attivarsi leggermente prima che un'infestante sia raggiunta e rimane attivo fino a poco dopo che l'infestante sia stata superata dall'ugello stesso. Nelle aree in cui i livelli di infestazione sono variabili, l'unità può ridurre in modo significativo la quantità di prodotti chimici distribuiti rispetto ad un'applicazione uniforme e continua. Poiché il sensore del WeedSeeker® non è stato progettato per distinguere fra diversi tipi di pianta (discriminazione coltura/infestanti), il suo utilizzo per scopi agricoli è focalizzato ad applicazioni tra le file della coltura o a trattamenti localizzati di terreni incolti.

I sensori del sistema commerciale WEEDit® hanno una sorgente attiva di luce rossa che irradia continuamente il terreno. Quando la luce rossa passa sopra una pianta viva, la sua clorofilla assorbe una parte di questa luce rossa, la converte e la emette come luce nel vicino infrarosso (NIR) (**Fig. 1.17**). I sensori WEEDit® effettuano una ricerca accurata e continua della presenza di NIR, mediante rilievi sul terreno attuate 40000 volte al secondo. Sono sistemi molto promettenti nel caso di adozione di strategie che prevedono la distribuzione notturna degli erbicidi.

Sebbene questi tipi di sensori non siano in grado di differenziare le specie infestanti dalle colture, ciò non rappresenta un problema se il monitoraggio riguarda soltanto l'interfila e le aree infestate vengono trattate con erbicidi di contatto con azione ad ampio spettro. Tuttavia, la mancanza di potere discriminante e il costo relativamente alto rappresentano un forte ostacolo alla diffusione su ampia scala di questi sensori.

1.11.3. I sensori meccanici

I sensori meccanici possono essere utilizzati per stimare la resistenza meccanica del suolo, spesso legata al compattamento. Questi sensori usano un meccanismo che penetra o taglia il terreno e registra la forza misurata da estensimetri o da celle di carico (**Fig. 1.18**).



Fig. 1.16 Dispositivo di controllo dell'ugello con sensore ottico (rielaborato da WeedSeeker®, 2013).

1.11.4. I sensori elettrochimici

I sensori elettrochimici possono fornire informazioni riguardo ai nutrienti presenti nel suolo e al pH. Alcune misurazioni vengono effettuate utilizzando elettrodi iono-selettivi che permettono di individuare ioni specifici (NO_3^- , K^+ o H^+ nel caso del pH).

I migliori risultati per il rilevamento dei nitrati nel suolo sono stati ottenuti con membrane iono-selettive in PVC preparate con composti di ammonio quaternario come il TDDA o il MTDA. Queste membrane sono state capaci di determinare i nitrati su tutta la gamma di concentrazione importante per la gestione dell'applicazione di fertilizzanti azotati.

Le membrane iono-selettive preparate con la valinomicina sono gli ionofori comunemente utilizzati per rilevare il potassio grazie alla sua notevole sensibilità e selettività allo ione K. I sensori utilizzati per la determinazione del fosforo possono essere classificati in tre tipi principali: membrane polimeriche basate sui composti organostannici, sulla poliammina ciclica o sui derivati dell'uranil-salofene, biosensori a base di proteine e elettrodi a base di cobalto. In particolare, gli elettrodi a cobalto solido hanno dimostrato di avere sufficiente sensibilità, selettività e durata per fornire una misura quantitativa dei fosfati presenti negli estratti del suolo.

1.11.5. I sensori di flusso d'aria

I sensori di flusso d'aria sono stati utilizzati per misurare la permeabilità del terreno all'aria in tempo reale. La pressione richiesta per comprimere un dato volume d'aria nel terreno a una determinata profondità è stato confrontato con molte proprietà del suolo.

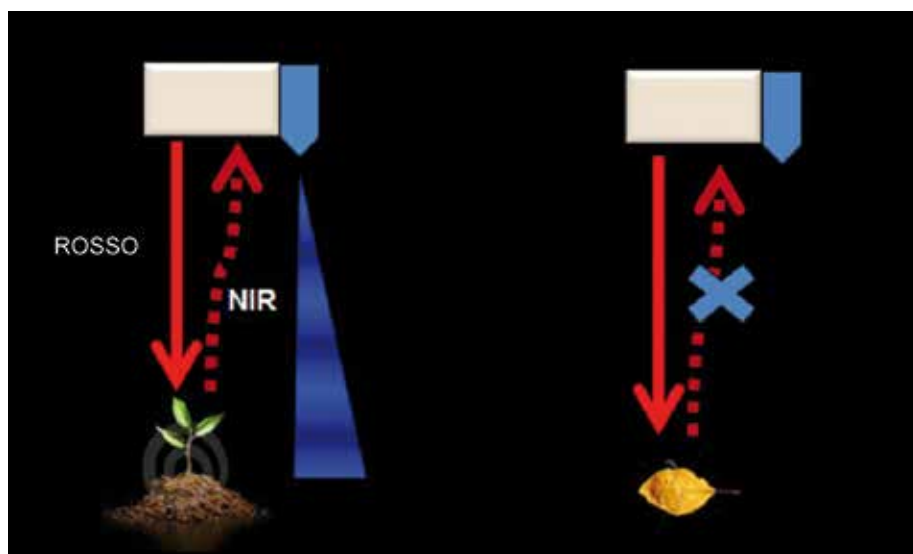


Fig. 1.17 Schema di funzionamento dei sensori WEEDit® (rielaborato da WEEDit, 2013).

1.11.6. I sensori acustici

I sensori acustici sono stati studiati per determinare la tessitura del terreno attraverso la misurazione del cambiamento del livello di rumore dovuto all'interazione di uno strumento con le particelle del suolo. Tuttavia un rapporto segnale-rumore (SNR) troppo basso non ha permesso a questa tecnologia di svilupparsi.

1.11.7. I sensori a ultrasuoni

I sensori a ultrasuoni forniscono una stima della distanza fra il sensore e il primo ostacolo, generando un eco in accordo con il metodo del tempo di volo. Questi sensori sono stati utilizzati nella produzione delle colture a partire dagli ultimi anni '80 allo scopo di misurare il volume della chioma degli alberi e, successivamente, controllare l'irrorazione per risparmiare prodotti chimici. Le tecnologie sonar potrebbero anche descrivere la geometria delle infestanti e discriminare le diverse specie.

Un dispositivo di controllo a ultrasuoni posizionato sulla barra porta-ugelli è in grado di aumentare la precisione di un'irroratrice (**Fig. 1.19**), eliminando le sovrapposizioni. I sensori a ultrasuoni misurano la distanza dal suolo e questa informazione permette a un sistema di controllo di effettuare regolazioni tempestive dell'altezza in modo da consentire alla barra di seguire automaticamente il profilo del terreno. I sensori a ultrasuoni standard sono robusti e relativamente economici rispetto ad altri tipi di sensori. Tuttavia le loro prestazioni sono influenzate dalle caratteristiche del bersaglio che deve essere individuato.

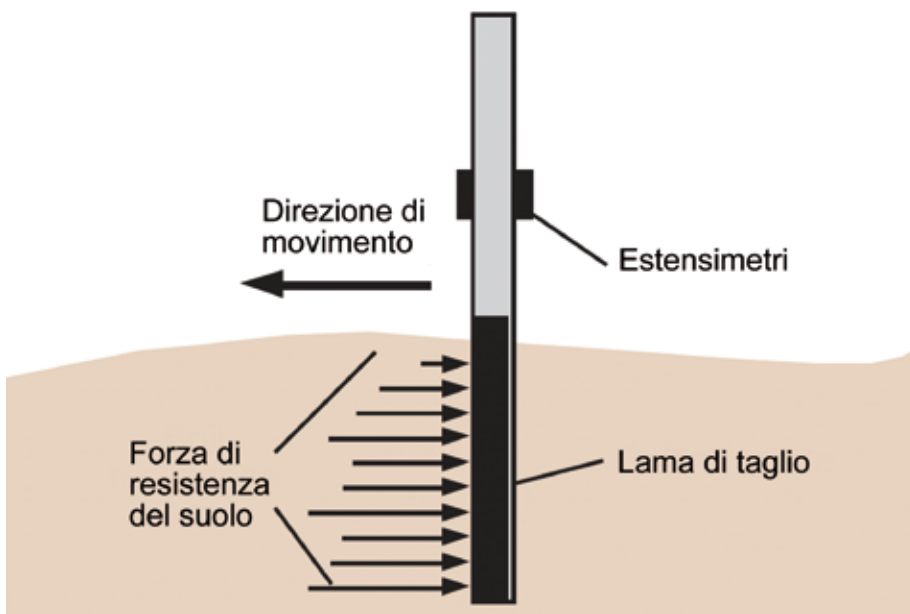


Fig. 1.18 Esempio di un dispositivo per la misurazione della resistenza meccanica del suolo (rielaborato da Adamchuck & Jasa, 2002).

1.12. Il Sistema Informativo Geografico (GIS)

L'Associazione per l'informazione geografica ha definito il GIS come un sistema per l'acquisizione, la memorizzazione, il controllo, l'integrazione, la manipolazione, l'analisi e la visualizzazione dei dati che sono stati spazialmente referenziati sulla Terra. Un GIS può anche essere definito, più semplicemente, come un approccio basato sull'utilizzo del computer per interpretare le mappe e le immagini e utilizzarle per la risoluzione dei problemi. Un GIS è composto da quattro componenti principali: i dati geografici, la conoscenza e l'esperienza umana, gli hardware e i software di mappa. L'interazione fra questi componenti consente di produrre, analizzare e presentare le informazioni sulla Terra grazie all'aiuto della tecnologia digitale.

Le tecnologie GIS sono molto importanti in agricoltura di precisione per la gestione e la manipolazione dei dati. Vengono descritte come tecnologie di informazione e comunicazione geospaziale. I dati acquisiti per mezzo del telerilevamento e del rilevamento prossimale devono essere georeferenziati da un ricevitore GNSS. Questi dati spaziali fluiscono nel GIS attraverso la componente di comunicazione e sono utilizzati per analisi successive in cui "geodati" supplementari derivati da fonti ufficiali (ad



Fig. 1.19 Dispositivo di controllo della barra porta-ugelli utilizzato al fine di eliminare le sovrapposizioni (rielaborato da Norac, 2013).

esempio modelli di valutazione digitali, dati topografici) possono essere integrati nel sistema. I dati spaziali rappresentano l'elemento più prezioso per il GIS e necessitano di essere considerati anche in un contesto di costo/beneficio. I dati fondamentali per l'agricoltura di precisione sono quelli di gestione, quelli meteorologici e quelli telerilevati, nonché le mappe delle rese, quelle dei nutrienti, quelle del suolo e quelle catastali, la valutazione delle indagini, il modello digitale di elaborazione e le mappe topografiche. I GIS vengono utilizzati per associare ed analizzare le informazioni di sensori diversi e aiutare lo sviluppo di nuovi approcci così che stanno diventando sempre più una parte integrante delle strumentazioni di campo. Le informazioni possono essere utilizzate per ridurre l'impiego degli erbicidi e ottimizzare la gestione.

I dati relativi alla gestione vengono solitamente forniti dagli agricoltori e sono strettamente legati ad aspetti agronomici. Temi importanti sono il tipo di gestione (ad esempio il diserbo), il tempo (ad esempio la data di semina), la quantità (ad esempio la dose di applicazione dei fertilizzanti), la rotazione colturale, etc. Solitamente i dati sono memorizzati per il controllo e la documentazione e sono di supporto alle strategie di miglioramento della gestione. Per l'applicazione di fertilizzanti o prodotti fitosanitari per la protezione delle colture sono richiesti dati derivati da valutazioni. Queste ultime sono inerenti alle infestanti, alle patologie, alla vitalità delle piante e vengono raccolti dall'agricoltore o da specialisti. I risultati permettono di effettuare trattamenti mirati nello spazio e a concentrazione variabile di principio attivo. Ulteriori dati raccolti in azienda sono le mappe relative alle rese. Attualmente, queste mappe vengono create in tempo reale dalle raccogliatrici e risultano disponibili per le analisi spaziali immediatamente dopo la raccolta. Oltre alla quantità unitaria, vengono rilevati anche l'umidità dei prodotti e altri elementi. Le mappe delle rese sono strettamente connesse a quelle dei nutrienti e permettono di ottimizzare la distribuzione dei fertilizzanti nelle diverse zone monitorate.

Molti dei dati spaziali digitali memorizzati in un GIS derivano da fonti esterne, come le mappe analogiche, i rilievi in campo, il GNSS e il telerilevamento. L'altitudine, l'idrologia e la copertura del suolo vengono digitalizzate e inserite nel GIS. I dati telerilevati, provenienti dai satelliti, possono essere utilizzati per generare informazioni correnti, accurate e sinottiche di tutte le zone della Terra, come base per l'analisi geoscientifica nel GIS. Di conseguenza, quasi tutti i principali pacchetti software GIS offrono almeno la possibilità di mostrare e ricercare le immagini digitali come parte della propria banca dati.

1.13. L'applicazione a rateo variabile (VRA)

L'applicazione a rateo variabile (VRA) è una tecnica che permette di cambiare le dosi degli input agricoli in base a caratteristiche eterogenee come le proprietà del suolo o la densità delle piante. Il campo di applicazione riguarda tutte le operazioni colturali, quali la semina, la fertilizzazione, l'irrigazione e la protezione delle colture.

Sono necessari sensori adeguati per ottenere informazioni spaziali di un'area coltivata, come le caratteristiche del suolo, la stima delle rese, la densità e la composizione floristica delle infestanti. I dati acquisiti sono utilizzati per controllare le dosi applicate dalle macchine agricole come le seminatrici, gli spandiconcime e le irroratrici.

Gli obiettivi della VRA consistono nella riduzione dei costi e nell'incremento del reddito, attraverso l'ottimizzazione dell'applicazione degli input che garantisce anche la sostenibilità e la sicurezza ambientale. Molti agricoltori praticano una sorta di VRA con irroratrici meccaniche convenzionali. In queste macchine, infatti, ogni variazione della pressione rispetto a quella calibrata determina una dose applicata diversa rispetto a quella pianificata. Questi cambiamenti possono essere vantaggiosi per gli agricoltori. Ad esempio, quando viene osservata un'area fortemente infestata, l'agricoltore può aumentare manualmente la pressione oppure ridurre la velocità in modo da applicare una più alta, sebbene sconosciuta, dose di erbicida.

Le due tecnologie essenziali per la VRA sono basate sulle mappe o sui sensori, o su entrambi i sistemi. La VRA basata sulle mappe aggiusta la dose di applicazione basandosi su una mappa di prescrizione (un file elettronico di dati contenente specifiche informazioni riguardo alle dosi che devono essere applicate in ogni zona del campo). Utilizzando la posizione in campo derivata da un ricevitore GNSS e una mappa di prescrizione delle dosi desiderate, la concentrazione degli input varia mentre l'irroratrice avanza. La VRA basata sui sensori non richiede mappe o sistemi di posizionamento. In questo caso, i sensori presenti sull'irroratrice misurano le proprietà del suolo o le caratteristiche della coltura durante il passaggio in campo. Un sistema di controllo calcola il fabbisogno di input del suolo o delle piante sulla base delle informazioni fornite dai sensori che vengono trasferite a un dispositivo di controllo, che permette di variare le dosi di prodotto distribuite.

1.13.1. La VRA basata sulle mappe

Questo metodo si basa sull'utilizzo di mappe contenenti elementi precedentemente misurati e consente di definire diverse strategie per variare gli input basate sul terreno, sulla sua tessitura, sulla topografia, sulle rese delle colture, sui dati di ispezione in campo, sulle immagini telerilevate e su molte altre fonti di informazione che possono essere specifiche per la coltura o per la posizione. Alcune strategie sono basate su una singola fonte di informazione mentre altre coinvolgono una combinazione di fonti. Indipendentemente dalla strategia, l'utilizzatore è in definitiva in grado di controllare la dose di applicazione. Questi sistemi devono riuscire a determinare la posizione della macchina all'interno del campo e metterla in relazione alla dose da applicare, attraverso la lettura della mappa di prescrizione.

1.13.2. La VRA basata su sensori

Il metodo basato sui sensori fornisce la possibilità di variare la dose di applicazione senza mappare o raccogliere i dati precedentemente. I sensori che lavorano in tempo reale misurano le proprietà desiderate, solitamente le caratteristiche del

suolo o della coltura mentre la macchina si muove. Le misurazioni effettuate da questo tipo di sistema vengono poi elaborate e impiegate per controllare il sistema di distribuzione a rateo variabile.

Quando i dati forniti dai sensori sono registrati e georeferenziati, le informazioni possono essere utilizzate nei futuri esercizi di gestione colturale sito-specifica per creare mappe di prescrizione o per altre operazioni, nonché per conservare una registrazione delle dosi applicate dall'agricoltore.

1.13.3. Seminatrici a rateo variabile

La semina a rateo variabile è basata sull'adeguamento della dose di seme alla resa potenziale. Una densità di semina alta è raccomandata nelle zone caratterizzate da elevati livelli di fertilità del terreno e disponibilità idrica e quindi potenzialmente più produttive.

Le operatrici possono attuare la semina VRA agendo sul sistema di distribuzione. La semina VRA è realizzata separando o scollegando il sistema di distribuzione dalla ruota motrice. La dose di seme può essere variata durante l'avanzamento utilizzando un motore o un riduttore in grado di cambiare la velocità della ruota. La maggior parte di questi dispositivi sono abbinati a una mappa di prescrizione e possono avere due o più regolazioni della dose. Uno scenario a due dosi potrebbe essere un sistema che riduce la quantità di seme al di fuori della portata del sistema di irrigazione a pivot, mentre dosi multiple possono essere necessarie per una regolazione in base al tipo di suolo e al contenuto di sostanza organica. Per la semina VRA possono essere utilizzati anche i sensori on-the-go (**Fig. 1.20**), in grado di rilevare i livelli diversi di sostanza organica e di aggiustare di conseguenza la dose di seme. Sono inoltre disponibili anche strumenti per la misurazione dell'umidità del terreno, che possono essere utilizzati per modificare la profondità di semina e le dosi di seme.

1.13.4. Protezione delle colture a rateo variabile

La VRA nell'ambito della protezione delle colture può essere suddivisa in base all'applicazione di agrochimici. Una tecnica per la distribuzione variabile di prodotti fungicidi e insetticidi si basa sull'applicazione della stessa concentrazione di principio attivo per unità di superficie da trattare in modo da ottenere una copertura omogenea. Un buon indicatore per calcolare la densità della copertura è l'indice di area fogliare (LAI) che può essere misurato in tempo reale da un sensore. L'individuazione automatica di un fungo o la stima dell'importanza della malattia non è al momento realizzabile.

Un approccio simile è stato impiegato per l'applicazione dei regolatori di crescita. Il segnale del sensore Yara N-Sensor[®], che analizza lo spettro della luce riflessa della superficie fogliare della coltura, è stato utilizzato per calcolare il LAI in modo da poter applicare dosi di principio attivo a esso proporzionali.

La dose ottimale di erbicida dipende da numerosi fattori. Nel caso di erbicidi distribuiti direttamente sul terreno è importante la quantità di principio attivo di-

sponibile per le piante. L'assorbimento potenziale dipende da numerose proprietà del terreno come il contenuto di sostanza organica, il pH, la tessitura, l'umidità e la capacità di scambio cationico. Altri parametri utilizzati per regolare la dose ottimale di erbicida sono la densità delle infestanti o la composizione floristica.

Al momento dell'applicazione degli erbicidi in pre-emergenza normalmente non è disponibile nessuna informazione sulle future specie infestanti. Quindi questi prodotti sono tipicamente distribuiti in dosi uniformi sull'intera superficie o in banda. In questo caso, per poter adottare la VRA devono essere disponibili informazioni spaziali di campo sulle proprietà del suolo o mappe "storiche" delle infestanti.

Nei sistemi di controllo delle infestanti a rateo variabile di post-emergenza è necessaria una elaborazione computerizzata che fornisca un segnale che permetta ad un attuatore di variare la dose nelle diverse zone. In commercio sono disponibili numerosi sistemi di controllo delle irroratrici adattabili alla distribuzione variabile, che, fondamentalmente possono essere suddivisi in tre tipologie basate: sul controllo del flusso della miscela, sul controllo dell'iniezione del prodotto e sulla modulazione della portata degli ugelli. Questi sistemi permettono di eliminare gran parte degli errori che potrebbero verificarsi durante l'applicazione se la velocità di avanzamento cambia rispetto a quella calibrata.

1.13.4.1. I sistemi basati sul controllo del flusso

I sistemi basati sul controllo del flusso della miscela (noti anche come sistemi basati sul controllo della pressione) sono i più semplici da utilizzare e sono equipaggiati con un flussimetro, un sensore di velocità, una valvola regolabile e un dispositivo di controllo elettronico (**Fig. 1.21**). La portata del flusso della soluzione premiscelata viene controllata regolando la pressione del sistema. Un microprocessore nel quadro di comando utilizza le informazioni riguardanti la larghezza

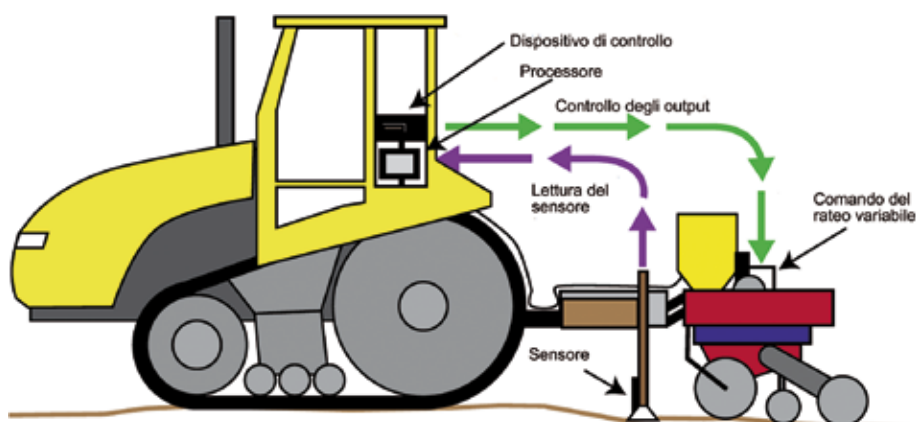


Fig. 1.20 Sensori che misurano le caratteristiche del terreno durante l'avanzamento (tessitura, conducibilità elettrica o sostanza organica) prima della semina e regolazione della dose di seme (rielaborato da Grisso *et al.*, 2011).

di lavoro e la dose prescritta ($L ha^{-1}$) per calcolare la portata in base alla velocità di avanzamento. La valvola risulta quindi aperta o chiusa fino a quando la misurazione del flussimetro corrisponde alla portata calcolata. Ove venga stabilita una comunicazione tra questo dispositivo di controllo e un sistema di mappe può essere effettuata l'applicazione a rateo variabile. Tali sistemi hanno il vantaggio di essere ragionevolmente facili da utilizzare, ma presentano alcune limitazioni essenzialmente consistenti nel fatto che la miscela giunge agli ugelli con pressioni variabili, determinando modifiche nella dimensione delle gocce con conseguenti potenziali problemi di deriva.

1.13.4.2. Sistemi a iniezione diretta dei prodotti fitosanitari

Un approccio alternativo consiste nell'utilizzare l'iniezione diretta del formulato in un flusso di acqua. Nei sistemi a iniezione diretta il principio attivo e l'acqua risultano infatti separati. Gli agrofarmaci vengono iniettati nell'acqua in dosi diverse al momento della distribuzione. Questi sistemi (**Fig. 1.22**) impiegano un dispositivo di controllo e una pompa per gestire le dosi di formulato iniettato. La portata di acqua è solitamente costante, mentre le dosi variano in modo da adattarsi ai cambiamenti di velocità e a valori prescritti. Anche in questo caso, se il dispositivo di controllo è stato disegnato o modificato per ricevere un comando esterno da un segnale GNSS e mappe di prescrizione il sistema può essere utilizzato per realizzare l'applicazione a rateo variabile.

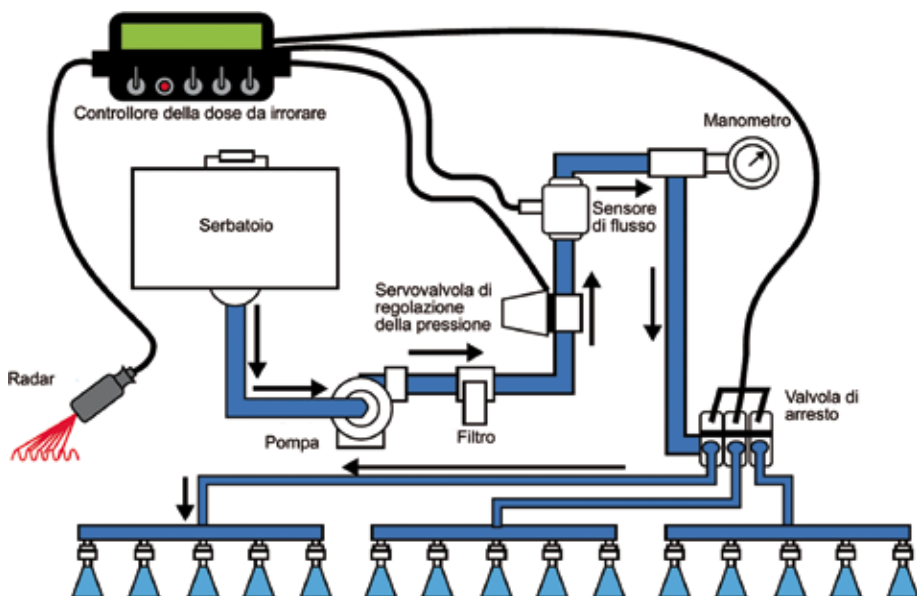


Fig. 1.21 Sistema di irrorazione a rateo variabile basato sul controllo del flusso (rielaborato da Grisso et al., 2011).

L'iniezione diretta evita che nel serbatoio rimanga miscela non utilizzata e riduce l'esposizione degli operatori ai prodotti chimici durante la fase di miscelazione e quella di lavaggio/manutenzione dell'irroratrice. Il più grande vantaggio dei sistemi a iniezione diretta è rappresentato dalla possibilità di utilizzare molte dosi diverse e di cambiare la tipologia del principio attivo durante il trattamento. Un ulteriore vantaggio è costituito dal fatto che il flusso costante dell'acqua può essere regolato in modo da ottenere dimensioni e distribuzione delle gocce ottimali. Il principale svantaggio di questo sistema è rappresentato dal ritardo con cui la pompa di iniezione determina le variazioni della concentrazione dei principi attivi. A tale riguardo, infatti, il volume presente nel circuito idraulico deve essere distribuito prima che possa essere impiegata una nuova dose. Questo può causare ritardi nel cambiamento della dose e modelli di applicazione a "albero di natale". Questi problemi possono essere risolti utilizzando sistemi che prevedono anche il controllo della portata dell'acqua.

I sistemi basati sul controllo dell'iniezione del principio attivo e della portata dell'acqua richiedono che il sistema sia in grado di variare contemporaneamente entrambi i dosaggi. In questo caso devono essere presenti due sistemi di controllo: uno per la pompa di iniezione e una per la portata dell'acqua, in modo da garantire un passaggio veloce da una dose all'altra. Gli svantaggi risiedono nel costo elevato di questo sistema e nel fatto che la variazione della portata (e quindi anche della pressione dell'acqua) determina modifiche delle dimensioni delle gocce, causando gli stessi problemi dei sistemi basati sul controllo del flusso.

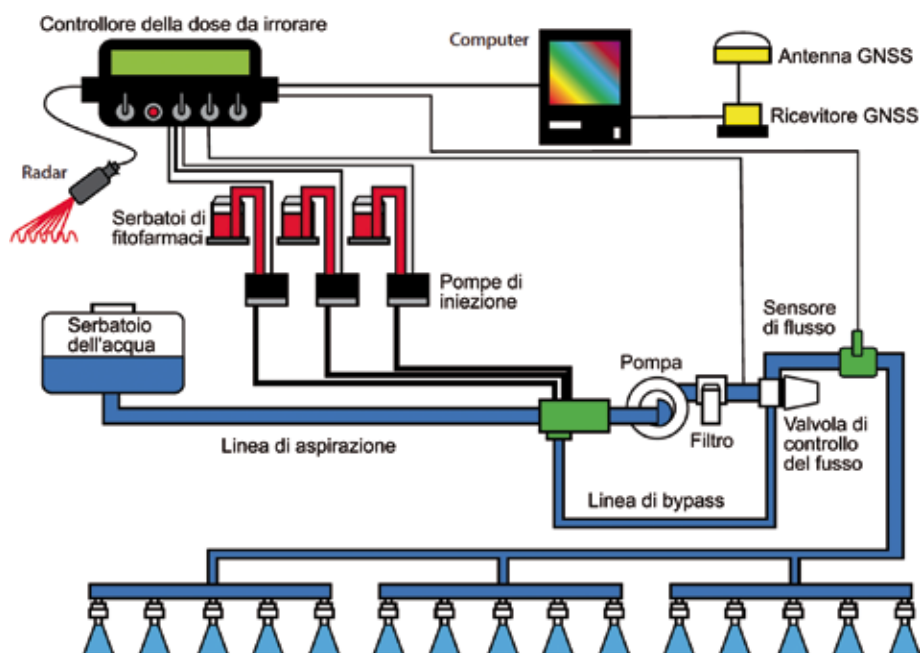


Fig. 1.22 Irrorazione per applicazioni a rateo variabile che integra la tecnologia dell'iniezione diretta. Tre pompe di iniezione e tre serbatoi sono disponibili per tre diversi principi attivi per essere applicati a differenti dosi (rielaborato da Grisso *et al.*, 2011).

1.13.4.3. Sistemi basati sul controllo della modulazione della portata degli ugelli

I sistemi di controllo della portata degli ugelli permettono di effettuare applicazioni a rateo variabile senza creare significativi fenomeni di deriva in un ampio intervallo di condizioni operative. Questi sistemi sono capaci di controllare il momento e la durata della fuoriuscita della miscela attiva dagli ugelli. Per regolare la durata della polverizzazione vengono utilizzate valvole ad alta velocità. Questi sistemi permettono di cambiare la portata e le dimensioni delle gocce durante l'avanzamento dell'irroratrice. Le irroratrici equipaggiate con un sistema di controllo della portata degli ugelli utilizzano ugelli convenzionali che lavorano in associazione con valvole a solenoidi ad azionamento diretto. Nella figura 1.23 è riportato uno schema del sistema di irrorazione che include il controllo della portata degli ugelli. Il sistema è gestito da un microprocessore e da un dispositivo di controllo dell'applicazione che opera in funzione dei segnali inviati dai sensori di flusso e di pressione. Il concetto di base di questi sistemi è quello di far funzionare ciascun ugello alla piena pressione di progettazione quando la valvola di controllo del flusso è aperta. Il punto chiave è quello di variare la durata in cui la valvola rimane aperta in modo da produrre una variazione della portata senza cambiare le dimensioni delle gocce o il getto di nebulizzazione. I sistemi di controllo della portata degli ugelli sono equipaggiati con valvole a solenoide che operano alla frequenza di 10 Hz. Questo significa che la posizione della valvola a solenoide può essere variata da aperta a chiusa 10 volte al secondo, come prescritto dal dispositivo di controllo che risponde agli input inviati da un computer e da una serie di sensori. Un ciclo di eventi (valvola aperta/nebulizzazio-

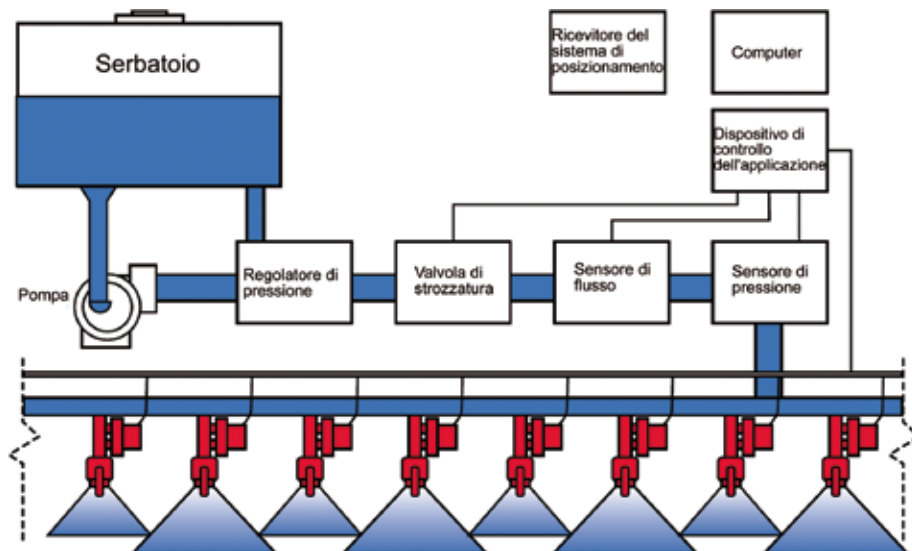


Fig. 1.23 Irroratrice per le applicazioni a rateo variabile che utilizza la VRA con tecnologia del controllo della portata degli ugelli. Il dispositivo può agire sugli ugelli singoli o su tutta l'irroratrice (rielaborato da Grisso *et al.*, 2011).

ne/valvola chiusa) ha luogo in un decimo di secondo. Per operare in modo efficace, la risposta della valvola deve essere rapida. Per produrre una delle due condizioni di flusso è utilizzato un segnale elettrico per ogni valvola: flusso completo (valvola completamente aperta) e flusso nullo (valvola completamente chiusa). Le valvole a solenoide impiegano circa 0,004 s per rispondere a un segnale elettrico.

Inoltre, i sistemi di controllo della portata degli ugelli possono funzionare a pressioni ridotte in modo da aumentare le dimensioni delle gocce e ridurre la deriva in caso di condizioni predisponenti (ad esempio in presenza di elevata velocità del vento). Le dosi di applicazione possono essere mantenute, anche se la pressione del sistema si abbassa, aumentando la durata in cui l'ugello rimane aperto. I benefici potenziali derivanti dall'utilizzo di un sistema di applicazione degli agrofarmaci che permette di legare insieme la dose di applicazione con la dimensione delle gocce distribuite, includono la possibilità di: produrre una gamma più ampia di portate rispetto alle irroratrici convenzionali; variare la portata degli ugelli e/o la velocità di avanzamento in un ampio intervallo senza influire sulla qualità della nebulizzazione o sulla dimensione delle gocce distribuite; variare la dimensione delle gocce distribuite senza cambiare la dose di applicazione in modo da minimizzare la deriva (aumentando il diametro delle gocce) o incrementando la copertura (diminuendo il diametro delle gocce).

1.13.5. I distributori di fertilizzanti a rateo variabile

Le applicazioni di fertilizzanti possono coprire una vasta area di dispositivi di applicazione. Molte delle tecnologie VRA per le applicazioni di fertilizzanti sono simili a quelle utilizzate per la distribuzione di erbicidi (applicazioni di prodotti liquidi).

L'applicazione GNSS e le relative tecnologie al servizio dell'agricoltura di precisione permettono agli agricoltori di scegliere se distribuire l'azoto mantenendo uniforme la dose o se utilizzare l'applicazione a rateo variabile all'interno dell'area coltivata. La variazione delle dosi di azoto in base alle esigenze di colture quali mais, frumento, riso, cotone, etc., dovrebbe determinare un miglioramento dei risultati tecnici ed economici (aumento delle rese e del reddito), ridurre i rischi di contaminazione ambientale e avere effetti positivi sulla qualità della granella.

Le prime strategie di applicazione di azoto a rateo variabile hanno previsto un approccio di tipo prescrittivo. In tal caso, gli appezzamenti devono essere suddivisi in parcelle uniformi nelle quali vengono distribuite dosi differenziate di fertilizzante, effettuando gli interventi nelle epoche ordinarie. Ovviamente la mappa di prescrizione deve essere definita prima della distribuzione. Un secondo approccio alla gestione a rateo variabile dell'azoto ha previsto di monitorare in tempo reale il contenuto dell'elemento nelle piante durante il ciclo colturale. In questo modo le dosi aggiuntive sono state distribuite solo quando e dove necessario. Con questo metodo gli stress da carenza dell'elemento sono stati determinati in base al monitoraggio della riflessione della luce delle piante del contenuto di clorofilla. Questo approccio può utilizzare le immagini telerilevate della coltura e richiede come riferimento la presenza all'interno dell'area coltivata di sotto-aree adeguatamente fertilizzate.

Per l'applicazione a rateo variabile di altri fertilizzanti come fosforo e potassio vengono solitamente utilizzate mappe basate sui dati relativi alla fertilità del suolo raccolte con griglie di campionamento.

1.13.6. L'irrigazione a rateo variabile

Normalmente i sistemi di irrigazione a pivot distribuiscono una quantità più o meno uniforme di acqua su uno o più appezzamenti senza rispettare la non-uniformità ambientale come la variabilità dei tipi di suolo, le diverse colture o le variazioni di tipo topografico. Per suddividere i campi in zone di gestione in base al loro fabbisogno idrico stimato vengono utilizzate immagini aeree del suolo o della coltura, mappe del suolo e della resa e le conoscenze degli agricoltori. Le mappe di applicazione vengono realizzate da un dispositivo speciale di controllo della dose irrigua variabile, che cambia il rateo di applicazione attraverso l'accensione o lo spegnimento degli irrigatori e variando la velocità di avanzamento del sistema di irrigazione a pivot. Utilizzando questa tecnica sono state ottenute dosi di applicazione variabili tra lo 0 ed il 200%, ottimizzando l'impiego dell'acqua in funzione dei risultati produttivi ed economici.

1.14. I sistemi di monitoraggio della resa

La mappatura delle rese di una specie coltivata, l'interpretazione delle mappe e la correlazione con la variabilità spaziale e temporale dei differenti parametri agronomici fornisce un valido aiuto per lo sviluppo delle strategie di gestione della coltura successiva.

L'adozione di queste pratiche di agricoltura di precisione ha riguardato prevalentemente i cereali, le oleaginose e il cotone. Solitamente le mietitrebbiatrici sono dotate di sensori fisici (di impatto) per misurare la portata della granella, mentre il monitoraggio della resa del cotone è basato sull'utilizzo di microonde o sensori del vicino infrarosso. Anche in questo caso i dispositivi GNSS rappresentano una parte fondamentale nel monitoraggio delle rese consentendo di determinarne la variabilità spaziale. Inoltre le mietitrebbiatrici sono equipaggiate con sensori che misurano la velocità, l'umidità della granella, l'altezza della testata, etc.. In questo modo è possibile mappare la variabilità spaziale dei dati delle rese, monitorando le prestazioni anno dopo anno. Queste mappe sono ovviamente molto utili per poter applicare quantità differenziate di input nelle diverse zone delle aree coltivate, sempre con la finalità di massimizzare i risultati tecnici ed economici.

2. Il progetto RHEA

2.1. Considerazioni preliminari

Il progetto RHEA (**R**obot Fleets for **H**ighly **E**ffective **A**griculture and Forestry Management) è stato finanziato dall'UE nell'ambito del Settimo Programma Quadro. Questo progetto di ricerca ha avuto come tema la progettazione, lo sviluppo e il collaudo di una nuova generazione di sistemi automatici e robotici per il controllo sia chimico che fisico della flora spontanea e per la protezione delle colture.

Il fine ultimo del progetto RHEA è stato quello di diminuire del 75% l'utilizzo degli agrofarmaci su colture erbacee seminate a file sia strette che larghe e su specie arboree, di aumentare la qualità dei prodotti, di ridurre i costi di produzione attraverso una gestione colturale sostenibile, e di tutelare la salute e la sicurezza degli operatori e dei cittadini.

L'obiettivo è stato raggiunto attraverso l'impiego di una flotta eterogenea di robot aerei e terrestri equipaggiati con sensori ed effettori di ultima generazione, gestiti da software e algoritmi di controllo altamente innovativi. Proprio per questo il progetto RHEA può essere considerato un sistema robotico di cooperazione.

Il progetto ha coinvolto 15 partner europei: (1) Agencia Estatal Consejo Superior de Investigaciones Cientificas (CSIC, Spagna), (2) CogVis Software und Consulting GmbH (CV, Austria), FTW Forschungszentrum Telekommunikation Wien GMBH (FTW, Austria), (4) Cyberbotics SARL (CY, Svizzera), (5) Università di Pisa (UP, Italia), (6) Universidad Complutense de Madrid (UCM, Spagna), (7) Tropical S.A. (TRO, Grecia), (8) Soluciones Agrícolas de Precision S.L. (SAP, Spagna), (9) Universidad Politécnica de Madrid (UPM, Spagna), (10) Airrobot GmbH & CO KG (AR, Germania), (11) Università degli Studi di Firenze (UF, Italia), (12) Centre National du Machinisme Agricole, du Genie Rural, des Eaux et des Forets (CE, Francia), (13) CNH Belgium NV (CNH, Belgio), (14) Bluebotics SA (BL, Svizzera) and (15) C.M. Srl (CM, Italia).

2.2. Requisiti tecnici e specifiche

Il requisito essenziale del progetto è stato quello di sviluppare un sistema costituito da una flotta di unità mobili (tre terrestri e due aeree) in grado di monitorare un terreno agricolo al fine di individuare, discriminare e controllare piante spontanee e coltivate e di effettuare trattamenti fitosanitari mirati e a rateo variabile su colture arboree. La gestione della flotta viene attuata all'interno di una "base station" (che viene montata e smontata in modo molto semplice e veloce) da cui un operatore supervisiona lo stato della missione lanciata attraverso un'interfaccia grafica.

Le unità aeree sono controllate sia manualmente che automaticamente attraverso un sistema di controllo posto all'interno della base station. Le unità mobili aeree sono in grado di sostenere un carico massimo avente massa pari a circa 2 kg e hanno un'autonomia di volo di 30 minuti. Ogni unità ha una massa totale pari a circa 8 kg ed è equipaggiata con due fotocamere per il monitoraggio delle piante infestanti.

Le unità mobili terrestri (UMT) sono di fatto "trattori autonomi" dotati di un motore endotermico a ciclo diesel e sono controllate da un sistema appositamente realizzato posizionato a bordo. Ogni UMT ha una massa pari a circa 1200 kg, porta un carico utile avente massa pari a 500 kg e possiede tutti i requisiti che soddisfano la normativa europea relativa ai veicoli autonomi operanti negli ambienti esterni. Il circuito elettronico è alimentato da un sistema a pannelli solari e celle a idrogeno. Le UMT sono equipaggiate con un sistema di visione artificiale, costituito da videocamere digitali, in grado di riconoscere le file della coltura (nelle colture a file larghe) e di rilevare gli oggetti presenti sulla traiettoria del veicolo.

Una delle unità mobili terrestri utilizza un sistema di percezione basato sulla visione artificiale per discriminare le infestanti dalla coltura. Le UMT sono inoltre accoppiate con differenti operatrici automatiche che sono in grado di attuare i trattamenti sia fisici che chimici. Una delle unità è equipaggiata con un'irroratrice meccanica a barra che distribuisce erbicidi chimici basandosi sulle informazioni derivate dal sistema di percezione a bordo dell'unità aerea (**Fig. 2.1**). Un'altra UMT è in



Fig. 2.1 Irroratrice meccanica automatica per la distribuzione di erbicidi chimici.

grado di devitalizzare le infestanti basandosi su mezzi termici e meccanici (**Fig. 2.2**). Una terza UMT è dotata di un'irroratrice mista che permette di attuare una distribuzione ridotta e mirata di agrofarmaci su colture arboree (**Fig. 2.3**).

Il sistema di gestione della missione, operante all'interno della base station, ha il compito di stabilire un piano di ispezione *a-priori* per le unità aeree e un piano di trattamento *a-priori* per le unità mobili terrestri. Il sistema di gestione inoltre supervisiona la missione in tempo reale ed è in grado di riprogrammare l'operazione nel caso uno o più robot dovessero fallire. I moduli di localizzazione dei robot (accuratezza della posizione di circa ± 2 cm) e i moduli di comunicazione (tra i robot, gli operatori e la base station) permettono di monitorare e controllare la flotta in tempo reale. La valutazione dell'intero sistema è stata progettata e realizzata per operare in tre differenti scenari: mais (cultura seminata a file larghe), grano (cultura seminata a file strette) e oliveto (coltura arborea perenne). La scelta degli scenari è stata effettuata tenendo conto della loro importanza e diffusione a livello europeo e planetario; si tratta infatti di tre "major crops" (**Fig. 2.4**).



Fig. 2.2 Macchina operatrice automatica per il controllo meccanico e termico delle infestanti.

2.3. Il gestore di missione (mission manager)

Il gestore di missione è un sistema dedicato alla definizione e al controllo della missione e opera all'interno del sistema computerizzato della base station. I principali stati operativi identificati dal gestore di missione sono l'elaborazione della missione per l'ispezione di campo (realizzata attraverso l'utilizzo delle unità mobili aeree), l'elaborazione della missione per il trattamento (realizzata attraverso l'utilizzo delle unità mobili terrestri) e il controllo della missione di campo e dei trattamenti. Il gestore è diviso in due moduli: il pianificatore e il supervisore di missione (mission planner e mission supervisor). Il pianificatore è responsabile dell'elaborazione della missione mentre il supervisore controlla l'operazione.

Le principali attività del pianificatore consistono nel collezionare dati relativi al tipo di missione e alle specifiche di campo (tipo di coltura, dimensione del campo, posizione geografica, etc.), nel decidere il numero delle unità aeree necessarie per l'ispezione, nel selezionare il numero di unità terrestri che eseguiranno il trattamento,



Fig. 2.3 Irroratrice automatica per la distribuzione a rateo variabile dei prodotti fitosanitari.

nel selezionare il tipo e il numero di sistemi sensoriali e attuatori a bordo delle unità terrestri e nel fornire un piano d'azione per ogni unità mobile. Il pianificatore opera prima che la missione abbia inizio e invia il piano elaborato a un'interfaccia grafica, così che un operatore possa decidere di accettarlo dopo la presa visione di una simulazione. Se il piano viene accettato gli ordini vengono inviati a un controllore di alto livello dell'unità aerea o a un sistema decisionale di alto livello.

Il supervisore lavora durante l'esecuzione della missione ed è responsabile del monitoraggio dello stato dell'intero sistema. Effettua una supervisione della missione in tempo reale ed aiuta gli operatori ad individuare eventuali problemi. Nel caso in cui un qualsiasi tipo di emergenza dovesse verificarsi è in grado di definire un nuovo piano. Il supervisore identifica malfunzionamenti nell'esecuzione sia della missione d'ispezione che di quella di trattamento. Al fine di ripristinare l'idonea operazione di sistema la notifica dei guasti deve essere inviata a un operatore o ad altri moduli del sistema in grado di risolvere il problema.

2.4. Unità mobili

Le tre unità mobili terrestri sono state realizzate a partire da un trattore compatto prodotto e commercializzato dalla CNH, il Boomer 3050 CVT. Questi trattori sono stati modificati meccanicamente, elettricamente e idraulicamente e sono stati programmati con un software dedicato. Uno di essi è equipaggiato con il sistema SuperSteerTM che riduce il raggio di sterzata da 3,24 m (trattori comuni) a 2,87 m. Le unità mobili terrestri possono seguire una traiettoria basandosi sui comandi ricevuti da un controllore che comanda anche la presa di potenza, l'attacco a tre punti e le prese elettriche e idrauliche.

Ulteriori modifiche idrauliche e meccaniche sono state apportate ai trattori al fine di installare nuovi sistemi. Il sedile, i pedali del freno e dell'acceleratore sono stati rimossi in modo da avere maggior spazio all'interno della cabina per l'installazione delle parti elettroniche. La cabina del trattore originale è stata tagliata e il tetto è stato abbassato. Quest'ultimo può essere facilmente rimosso per permettere l'accesso alla parte elettronica al suo interno. La modifica alla cabina ha richiesto la realizzazione di nuove porte e nuove finestre. Tre supporti sono stati montati sulla parte frontale dell'unità mobile per permettere l'attacco della scatola contenente il sistema a energia alternativa (costituito da celle a idrogeno). La massa dell'"energy



Fig. 2.4 I differenti scenari in cui è stato valutato il funzionamento del sistema robotico di cooperazione: frumento (a sinistra), mais (al centro) e oliveto (a destra).

box” è pari a circa 190 kg. Una barra orizzontale è stata fissata sul supporto frontale della cabina e su questa sono stati installati un’antenna GNSS, un ricevitore GNSS, un router di comunicazione, una videocamera e un’antenna di sicurezza (**Fig. 2.5**).

Due alternatori (12 V 200 e 24 V 120) sono stati montati in modo da fornire un’alimentazione elettrica sufficiente per la distribuzione di energia a tutti i dispositivi installati sia sull’unità mobile terrestre, quali ad esempio i sensori, che ai sistemi di attuazione (attuatori, CLP, sensori, etc.). A tal fine è stato sviluppato un sistema centralizzato di distribuzione dell’energia. Tale sistema è composto da due scatole di distribuzione dell’energia, una posta all’interno dell’unità terrestre per l’alimentazione dei dispositivi e l’altra posta sul retro dell’UMT e dotata di connettori per i sistemi di attuazione. La cabina contiene uno schermo “touch screen”, un sistema decisionale di alto livello e un controllore.

Un sistema di controllo remoto, con campo di circa 2 m, è utilizzato per effettuare spostamenti manuali dell’unità mobile terrestre (**Fig. 2.6**). Tre pulsanti di emergenza per l’arresto del robot sono stati montati sull’UMT: uno sulla parte frontale, uno sulla parte destra e uno sulla sinistra. Ciascun pulsante ha due relè ed è connesso con il sistema di controllo che attiva l’arresto e lo spegnimento del motore quando uno dei pulsanti viene premuto.

La flotta aerea è rappresentata da due prototipi di rotori esagonali (droni AR200) (**Fig. 2.7**). Le unità aeree mobili sono state integrate con un sistema di telerilevamen-



Fig. 2.5 Unità mobile terrestre.

to e sono così in grado di acquisire immagini dai terreni agricoli che servono per la creazione di dettagliate mappe delle infestanti. I rotori esagonali possono portare sensori aventi massa pari a poco più di 1,5 kg, possono raggiungere ampie distanze e hanno una elevata capacità di volo (circa 40 minuti).

Una caratteristica peculiare dei droni è quella rappresentata dall'innovativo sistema di ripiegamento che permette di risparmiare spazio e ne rende confortevole il trasporto fino al campo. Inoltre, l'utilizzo di sei rotori riduce il rischio di incidenti nel caso in cui un motore dovesse arrestarsi. Le unità mobili aeree possono essere comandate programmando la traiettoria che deve essere seguita, ovvero stabilendo i punti in cui i droni devono acquisire le immagini. Le unità forniscono dati telemetrici durante il volo, incluse le informazioni richieste dal supervisore di missione, come la stima della posizione e il livello della batteria.

2.5. Base station e interfaccia grafica

La base station rappresenta il luogo fisico di interazione tra la flotta di robot e gli operatori. Essa è localizzata nelle prossimità del campo dove viene svolta la missione e ha la visuale sul campo stesso. La base station è dotata di molti computer e software dedicati soprattutto alla pianificazione e al controllo delle missioni delle unità



Fig. 2.6 Sistema di controllo per l'effettuazione di spostamenti manuali dell'unità mobile terrestre.

terrestri e aeree. Un'antenna e un ricevitore GNSS sono installati sulla parte esterna della cabina (**Fig. 2.8**).

La base station utilizza un'interfaccia grafica per il funzionamento del sistema, per il monitoraggio, per la registrazione delle informazioni e per l'ottimizzazione delle operazioni. L'interfaccia grafica si basa sul simulatore di robot Webots 7, è connessa in tempo reale con la flotta e mostra in 3D lo stato corrente dell'operazione in corso (cioè la posizione, l'orientamento, la velocità e lo stato di ogni robot). Questo permette a un operatore di inviare le istruzioni alla flotta e di effettuare, attraverso un sistema di simulazione, dei test veloci prima che nuove operazioni o procedure di emergenza siano trasmesse ai robot.

2.6. Sistemi di percezione

Lo sviluppo dei sistemi di percezione è stata una delle attività più impegnative del progetto RHEA e ha riguardato la realizzazione di apparecchiature di telerilevamento aereo e prossimale. Il ruolo del sistema di percezione di telerilevamento aereo è quello di attuare un'ispezione aerea preliminare. A tal fine alcuni dispositivi per l'acquisizione delle immagini sono stati implementati sulle unità mobili aeree ed è stato sviluppato un programma efficiente per l'elaborazione delle immagini stesse. Due fotocamere (Sigma DP2 Merrill) sono state installate sul drone (**Fig. 2.9**). La prima fotocamera è di tipologia VIS mentre la seconda è stata modificata come NIR per ottenere immagini multispettrali.

Le condizioni nominali di utilizzo sono alle altezze di volo di 60 e di 120 m. A queste altezze le risoluzioni spaziali sono pari a 1 cm pixel⁻¹ e a 2 cm pixel⁻¹ rispettivamente. Le immagini vengono raccolte nella carta SD della fotocamera. La missione di ispezione con le unità aeree fornisce l'acquisizione delle immagini che succes-



Fig. 2.7 Unità aerea mobile (AR200).

sivamente sono mosaicizzate ed elaborate al fine del rilevamento delle infestanti. La mosaicizzazione consiste nella raccolta delle immagini sovrapposte di una scena per costruire un'immagine ortorettificata e georeferenziata. Il processo di mosaicizzazione richiede che le immagini acquisite siano ad alta risoluzione (alcuni centimetri) e coprano un ampio spazio (alcune decine di metri in ogni dimensione). Soltanto un sensore a elevata risoluzione (più di 10 milioni di pixel) può combinare questi due requisiti. Le immagini mosaicizzate devono essere georeferenziate, il che signi-



Fig. 2.8 Cabina della base station con router di comunicazione e antenna GNSS installate sul tetto.

fica che a ogni pixel dell'immagine sono associate le proprie coordinate geografiche. Attraverso questo processo è possibile conoscere l'esatta posizione dei "patches" di infestanti e successivamente di intervenire con le unità mobili terrestri.

Poiché coltura e infestanti sono specie differenti dovrebbero teoricamente mostrare delle lievi differenze nello spettro di riflettanza. Tuttavia, la limitata risoluzione spettrale delle immagini fornite dall'acquisizione hardware (quattro bande spettrali R, G, B e NIR) non è sufficiente per stimare le suddette differenze, specialmente alle condizioni variabili di luce presenti negli ambienti esterni. Per questo motivo le informazioni spettrali sono utilizzate soprattutto per separare la vegetazione nel suo insieme (coltura più infestanti) dal terreno. La coltura è discriminata dalle infestanti sulla base della sua organizzazione spaziale, le file della coltura sono infatti riconosciute come file parallele all'interno del campo e le infestanti sono quella parte di vegetazione non inclusa in queste linee. Questo processo viene chiamato segmentazione. Le mappe così ottenute permettono di indentificare le zone infestate da quelle "libere". Le percentuali di infestazione sono categorizzate in tre differenti livelli: basso (percentuale di copertura < 5%), moderato (5% - 20%) e alto (> 20%).

Il sistema di percezione di rilevamento terrestre persegue due obiettivi: consentire una guida ottimale e sicura e individuare gli elementi biologici che devono essere trattati. Gli elementi fisici che costituiscono il sistema di riconoscimento delle infestanti e il sistema di guida, ovvero le videocamere, sono installate a bordo delle unità mobili terrestri (**Fig. 2.10**). La guida autonoma delle unità terrestri è resa possibile grazie alla combinazione della visione computerizzata e di un sistema GNSS. Il GNSS è utilizzato per fornire informazioni di posizione alle unità al fine di allinearsi alle file della coltura a bordo campo. Una volta allineate, la guida all'interno del campo è possibile grazie alle informazioni che derivano dal sistema di visione computerizzata.

La sicurezza della guida è assicurata dal riconoscimento degli ostacoli. È stato infatti realizzato un algoritmo capace di distinguere le persone e altri ostacoli. Sia le persone che gli ostacoli vengono proiettati in uno spazio 3D e questo permette di calcolare la loro distanza rispetto alle unità mobili così da decidere se il veicolo debba



Fig. 2.9 Fotocamera Sigma DP2 Merrill e installazione sul drone.

essere fermato o meno. Il riconoscimento è effettuato con uno scanner laser (LIDAR), anche sulla base dei dati forniti dalla videocamera. Lo scanner laser per la sicurezza è un dispositivo optoelettronico che utilizza la riflessione diffusa della luce emessa dalle persone e dagli oggetti che si trovano in prossimità della macchina. Quando una presenza estranea all'interno di un'area ben definita viene individuata, lo scanner invia un segnale di stop all'unità mobile terrestre. Il LIDAR è installato sulla parte frontale dell'unità mobile (**Fig. 2.11**).

Un sistema di riconoscimento delle infestanti complementare a quello fornito dalle unità mobili aeree è stato sviluppato utilizzando la visione computerizzata al fine di individuare le piante spontanee presenti nelle colture a file larghe. Tale sistema è posizionato a bordo dell'unità mobile terrestre. Lo scopo è quello di analizzare una regione di interesse sul terreno di fronte all'unità mobile e di garantire il riconoscimento delle file della coltura e della percentuale di copertura delle infestanti. Il sistema è costituito da una telecamera (KODAK KAI 04050M/C), da alcuni accessori (lenti e un filtro UV-IR) e da un'unità di misurazione inerziale.

Quando l'UMT si muove lungo le file della coltura, le immagini sono processate in tempo reale e viene determinata la percentuale di copertura delle malerbe presenti. Questo avviene in due fasi: il riconoscimento di quattro file della coltura e l'identificazione delle infestanti. Un'area lungo le file viene considerata come coltura ed esclusa dal computo dei pixel verdi. I pixel rimanenti sono attribuiti alle infestanti. La percentuale di copertura è suddivisa in tre differenti livelli: basso, medio e alto.



Fig. 2.10 Videocamera per la guida e il rilevamento degli ostacoli e delle infestanti posizionata sull'unità mobile terrestre.

2.7. Sistema decisionale di alto livello (High Level Decision Making System - HLDMS) e sistema di basso livello di attuazione (Low Level Actuation System - LLAS)

Un sistema decisionale (hardware e software) di alto livello è stato sviluppato con la finalità di decidere quale processo applicare, dove applicarlo, la dose ottimale di prodotto da distribuire (erbicida, GPL, insetticida) e il tempo di applicazione. Queste quattro funzioni di base permettono al sistema decisionale di alto livello di interagire con il gestore della missione, con il sistema di percezione e con quelli di localizzazione e di attuazione. Il sistema decisionale di alto livello riceve come input i piani generati dal gestore di missione, i comandi derivati da un dispositivo portatile, i dati provenienti dal sistema di percezione e lo stato dell'unità mobile terrestre. L'HLDMS produce come output una serie di traiettorie per l'unità terrestre, comandi



Fig. 2.11 Configurazione del LIDAR per il rilevamento degli ostacoli.

per il sistema di attuazione e rapporti per il gestore di missione.

I sistemi di attuazione sono rappresentati da tre macchine operatrici dedicate rispettivamente alla distribuzione di erbicidi nei cereali autunno-vernini, al controllo fisico delle infestanti su mais e al trattamento con insetticidi di piante di olivo in impianti super-intensivi. Un controllore logico programmabile (CLP) è presente su ogni macchina operatrice ed è composto da un modulo CPU connesso con moduli di input e output. I sensori sono connessi con gli input, mentre gli attuatori sono connessi con gli output. Il sistema decisionale di alto livello è responsabile di inviare le informazioni al CLP.

La macchina operatrice per la distribuzione degli erbicidi su cereali autunno-vernini è costituita da un'irroratrice a iniezione diretta centrale, equipaggiata con un serbatoio per l'acqua e un contenitore separato per l'erbicida che deve essere irrorato in base alle prescrizioni che arrivano dal sistema decisionale di alto livello (**Fig. 2.12**). Il programma del sistema decisionale di alto livello utilizza la posizione RTK-GNSS e le informazioni contenute in una mappa delle dosi di applicazione per determinare l'idonea dose da utilizzare. Il controllore del sistema di iniezione fornisce una tensione variabile al motoriduttore in modo da azionare la pompa dedicata. Questa tensione determina la pressione di esercizio appropriata della pompa, permettendo di ottenere la portata di miscela attiva desiderata. Un trasduttore integrato nel sistema misura la portata della pompa di iniezione. Il controllore utilizza questo dato per stabilire se sono necessari dei cambiamenti. La portata viene determinata utilizzando un misuratore di flusso.



Fig. 2.12 Macchina operatrice per l'applicazione degli erbicidi su cereali autunno-vernini accoppiata all'unità mobile terrestre.

La macchina operatrice è costituita da 8 elettrovalvole montate sulla barra dell'irroratrice a una distanza di 0,5 m. L'irroratrice è suddivisa in 12 sezioni, ognuna contenente un'elettrovalvola che permette a ogni sezione di essere controllata indipendentemente, tramite indicatori a LED.

I sistemi di attuazione per il controllo fisico delle infestanti su mais e per il trattamento dell'oliveto con insetticidi sono dettagliatamente descritti nei successivi capitoli di questo volume (vedi capitoli 3 e 4).

2.8. Sistemi di comunicazione e localizzazione

Lo scopo del sistema di comunicazione della flotta è quello di garantire un'interconnessione wireless stabile e robusta tra tutte le componenti della flotta robotica del progetto RHEA. Le connessioni logiche sono presenti tra le unità mobili terrestri e la base station. Le connessioni sono resistenti alle interferenze e agli effetti di dissolvenza. Inoltre, soddisfano requisiti di temporizzazione breve per il controllo e il monitoraggio in tempo reale. La base station è localizzata in prossimità a dove operano i robot e comunica con la flotta attraverso un trasmettitore radio o wi-fi.

Per localizzare le componenti in campo sono utilizzate quattro diverse configurazioni: la base station, le unità mobili terrestri, le unità aeree e gli operatori. Un ricevitore Trimble BX982 GNSS installato sulla base station supporta i segnali L1/L2/L5



Fig. 2.13 Dispositivo portatile per operatori di campo.

del GPS e i segnali L1/L2 del GLONASS ed è in grado di seguire i segnali di GALILEO a scopo valutativo e sperimentale. Il ricevitore offre un'accuratezza a livello del centimetro poiché si basa sulla tecnologia RTK. La funzione principale di questo ricevitore GNSS è quella di fornire e di trasmettere il segnale di correzione a ogni UMT in modo da determinarne accuratamente la posizione. Due ricevitori RTK sono installati sulle unità mobili (BX982-1 e BX982-2) e hanno un funzionamento simile a quello montato sulla base station.

Gli operatori di campo possono interagire con la flotta svolgendo diversi ruoli (supervisione, intervento remoto, manutenzione, etc.) in base all'attività svolta dalla flotta. Poiché è necessario conoscere la posizione dell'operatore è stato realizzato un dispositivo portatile dotato di un ricevitore DGPS che ne permette la localizzazione (**Fig. 2.13**). Tale informazione viene inviata alla base station e all'unità mobile terrestre in modo da evitare incidenti. Un ricevitore DGPS è montato anche a bordo delle unità mobili aeree.

3. La macchina automatica per effettuare il controllo fisico sito-specifico della flora spontanea su colture a file spaziate

3.1. Considerazioni preliminari

La distribuzione non uniforme della flora spontanea nei campi coltivati, giustifica la realizzazione del controllo sito specifico delle infestanti, consentendo di risparmiare le quantità di erbicidi distribuiti durante i trattamenti con indubbi vantaggi sia in termini economici che di salvaguardia ambientale.

Le plantule delle avventizie nei campi coltivati presentano una distribuzione eterogenea nello spazio e nel tempo. Spesso le infestanti sono aggregate in “chiazze” di dimensioni variabili o in vere e proprie strisce che seguono la direzione delle lavorazioni del terreno. Per questo motivo, in molti casi, i trattamenti di gestione della flora spontanea eseguiti su tutta la superficie del campo coltivato, sono caratterizzati da inefficienze dovute o ad un controllo insoddisfacente delle infestanti o ad uno spreco di erbicidi che vengono applicati anche dove non sarebbe necessario. Uno degli obiettivi principali proposti dall'agricoltura di precisione è minimizzare l'uso di erbicidi. Nell'ambito delle nuove tecnologie per la gestione delle infestanti, la distribuzione sito-specifica e a rateo variabile dei diserbanti rappresenta una delle principali e più promettenti attività di ricerca. Infatti, la distribuzione sito-specifica dei fitofarmaci potrebbe consentire di ridurre la quantità di agrochimici distribuiti riducendo i costi di produzione e mitigando l'impatto ambientale dell'attività agricola.

Nell'ultimo decennio l'incremento dei costi dei fitofarmaci ed i crescenti livelli di inquinamento dei suoli dovuto ai residui di erbicidi, hanno fatto emergere dal settore produttivo primario pressanti richieste indirizzate al mondo della ricerca per trovare valide alternative all'uso di diserbanti chimici di sintesi. Inoltre l'Unione Europea si è indirizzata verso politiche agricole che sono volte ad agevolare il diffondersi dell'agricoltura biologica. Infatti, nel mercato agricolo si evidenzia una crescente richiesta da parte dei consumatori di prodotti provenienti da agricoltura

biologica. Per cui l'obiettivo non è solo quello di salvaguardare l'ambiente ma anche quello di aumentare la disponibilità di prodotti biologici nel mercato.

I sistemi automatizzati per il controllo meccanico e termico delle infestanti potrebbero contribuire a ridurre l'attuale dipendenza dall'uso degli erbicidi dell'agricoltura, eliminare il ricorso a scerbature manuali, incrementare la quantità e la qualità delle rese e conseguentemente gli introiti delle aziende agricole.

In questo contesto ha proficuamente operato un progetto di ricerca internazionale e multidisciplinare denominato RHEA (Robot fleet for Highly Effective Agriculture and Forestry management), finanziato dalla Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro. L'obiettivo di tale progetto è stato quello di progettare realizzare e testare una flotta eterogenea di robot autonomi in grado di operare in diverse tipologie di agroecosistemi effettuando trattamenti connessi alla protezione delle colture con applicazioni precise e mirate.

Nell'ambito delle attività di ricerca previste nel progetto RHEA, presso l'Università di Pisa è stata progettata e realizzata una macchina operatrice automatica in grado di eseguire trattamenti di controllo fisico sito-specifico delle piante infestanti su mais, che è pianta caratterizzata da una tolleranza "morfologica" ai trattamenti termici. Tale operatrice è stata ideata per poter essere accoppiata ad una unità mobile terrestre completamente autonoma, in modo da poter eseguire contemporaneamente un controllo meccanico delle avventizie non selettivo tra le file della coltura e trattamenti di pirodiserbo a fiamma libera sito-specifici a rateo variabile sulla fila.

3.2. Progettazione e descrizione della macchina

3.2.1. Struttura della macchina

La struttura principale della macchina è stata realizzata integrando una sarchiatrice con un'attrezzatura per il pirodiserbo a fiamma libera. La struttura della sarchiatrice è costituita da un telaio principale in acciaio, largo 3,46 m, su cui sono montati 5 parallelogrammi articolati, che supportano gli utensili per la rimozione meccanica delle infestanti (**Fig. 3.1**).

I bruciatori dell'apparato per il pirodiserbo sono alimentati da gas di petrolio liquefatto (GPL). Il sistema di alimentazione è composto da un telaio rigido di acciaio largo 0,76 m e lungo 1,46 m, collegato al telaio principale e provvisto di 4 tramogge cilindriche atte ad ospitare 4 bombole di GPL. Le coppie di bruciatori deputati ad effettuare il controllo termico delle infestanti sulla fila sono disposte sui parallelogrammi articolati (**Fig. 3.2**).

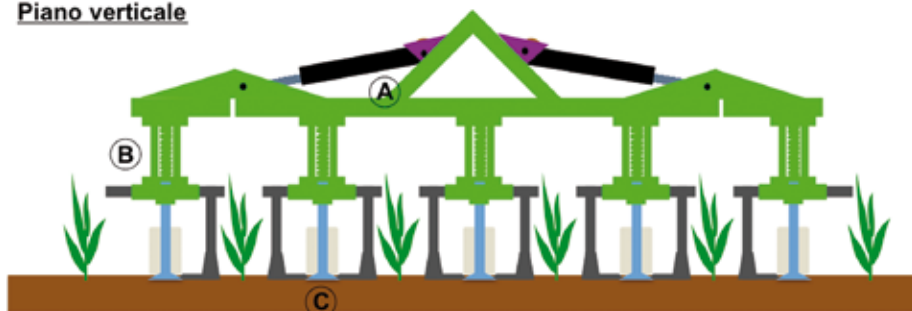
La macchina operatrice regolata per poter operare su file di mais distanti 0,75 m tra loro, risulta essere caratterizzata da una larghezza di lavoro di 3 m, consentendo di trattare complessivamente con un singolo passaggio 4 file della coltura. Ciascuno dei tre parallelogrammi centrali è provvisto di una coppia di bruciatori e di utensili

sarchianti rigidi, un elemento a zampa d'oca centrale e due elementi laterali conformati ad "L", in modo da poter lavorare uno spazio interfila pari a 0,5 m. Ciascuna coppia di bruciatori genera una fiamma libera in grado di controllare le infestanti su una striscia di terreno larga 0,25 m posta a cavallo della fila della coltura (**Fig. 3.2**). I due parallelogrammi articolati laterali sono dotati di un solo bruciatore. Tutti i parallelogrammi articolati sono dotati di ruote di appoggio pneumatiche e molle di richiamo, in modo da seguire il profilo del terreno mantenendo costante sia la profondità di lavoro degli elementi sarchianti sia la distanza dei bruciatori dalla superficie del suolo (**Fig 3.3**). L'unità autonoma terrestre a cui si accoppia l'operatrice automatica è provvista di dispositivi per il rilevamento delle infestanti e per l'identificazione delle file della coltura basati su sistemi di visione artificiale.

3.2.2. Sistema per il controllo meccanico delle infestanti

Gli elementi rigidi per il controllo meccanico delle infestanti sono montati sui parallelogrammi articolati. Le due unità sarchianti della macchina sono dotate di un elemento rigido centrale a zampa d'oca e un solo elemento rigido conformato ad "L", invece, nelle unità centrali presentano assieme all'elemento rigido a zampa d'oca due utensili rigidi conformati ad "L". Gli utensili per il controllo meccanico delle infestanti esplicano la loro

Piano verticale



Piano orizzontale

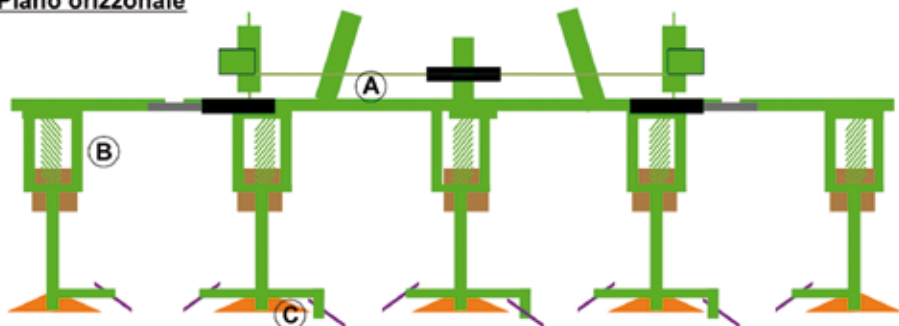


Fig. 3.1 Schema della sarchiatrice utilizzata come base per la macchina automatica per il controllo fisico delle infestanti su mais. A) telaio principale; B) parallelogramma articolato; C) elementi sarchianti rigidi.

azione rinettante lavorando il terreno nell'interfila ad una profondità variabile tra i 3 cm ed i 5 cm. Gli utensili a zampa d'oca sono caratterizzati da una larghezza di 24 cm (**Fig. 3.4**), mentre gli utensili conformati ad "L" sono larghi circa 16 cm (**Fig. 3.5**).

3.2.3. Il sistema per il controllo termico delle infestanti

Il sistema del pirodiserbo implementato sulla macchina operatrice realizzata nell'ambito del progetto RHEA, è composto da un sistema di alimentazione del GPL, otto bruciatori posizionati in modo da effettuare il trattamento su entrambi i lati della fila della coltura e da un sistema di accensione dei bruciatori. Il sistema per il controllo termico sito-specifico delle avventizie è completamente automatico e gestito da un controllore a logica programmabile (programmable logic controller, PLC) provvisto di moduli di entrata ed uscita del segnale, che dipende a sua volta, dalle informazioni elaborate da un sistema per l'identificazione e la stima della copertura delle infestanti collocato sull'unità mobile terrestre completamente autonoma. I serbatoi di GPL sono 4 normali bombole per uso domestico e devono essere collocate all'interno di specifici scambiatori termici montati su un apposito telaio fissato nella porzione mediana del telaio principale della macchina (**Fig. 3.2**). Gli scambiatori termici sono stati realizzati con 4 tramogge cilindriche atte a contenere acqua. Nel-

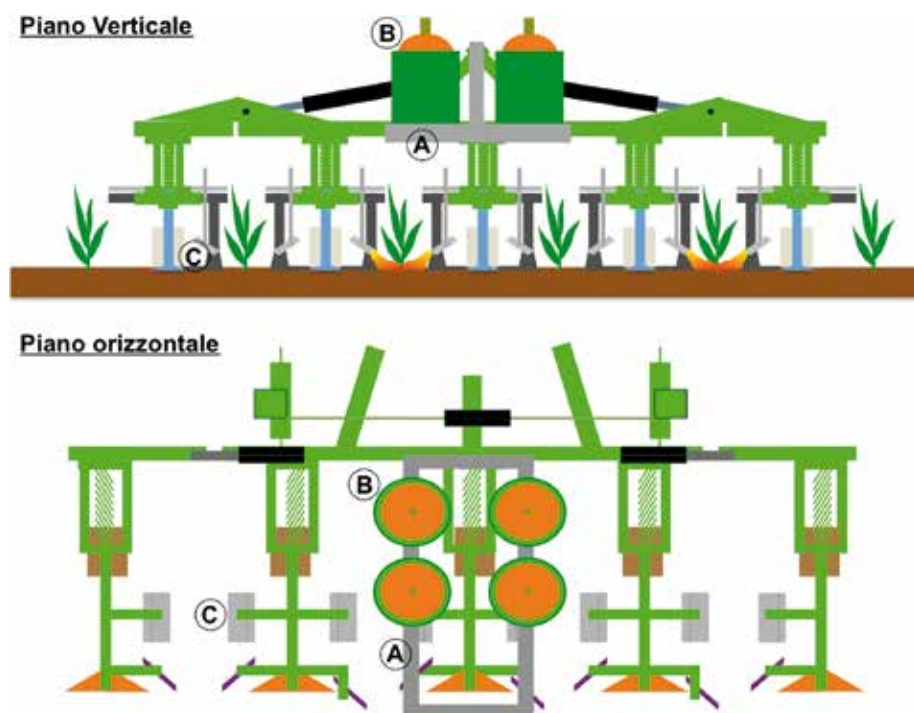


Fig. 3.2 Schema semplificato della struttura della macchina per il controllo fisico sito-specifico delle infestanti su mais: A) telaio per il supporto delle tramogge e delle bombole; B) tramogge contenenti le bombole; C) bruciatori per il controllo termico delle infestanti sulla fila.

la parte basale interna delle tramogge è presente un condotto, all'interno del quale vengono fatti passare i gas di scarico caldi del motore endotermico dell'unità mobile terrestre, mediante un apposito tubo flessibile collegato alla parte terminale della marmitta (**Fig. 3.6**). I gas di scarico durante il passaggio all'interno del condotto cedono calore all'acqua presente all'interno delle tramogge consentendo, in questo modo, di riscaldare le bombole di GPL. Questo sistema permette di eseguire trattamenti a pressioni di esercizio del gas comprese tra i valori di 0,2 MPa e di 0,5 MPa, evitando il raffreddamento delle bombole, consentendo di esaurire completamente il GPL in esse contenuto. Infatti, se la temperatura delle bombole scende al di sotto della temperatura di evaporazione del GPL a pressione atmosferica, il gas cessa di fluire ed i bruciatori dell'operatrice si spengono.

Il flusso del GPL dai serbatoi ai bruciatori è controllato da elettrovalvole, che sono gestite tramite appositi relè dai segnali che provengono dai moduli di uscita del PLC. Il controllore logico programmabile, che rende possibile l'automazione dei dispositivi per il controllo termico delle infestanti montati sull'operatrice, è dotato di moduli per l'entrata e l'uscita dei segnali. I sensori di pressione e le termocoppie sono collegati ai moduli di entrata, invece, i moduli di uscita sono collegati ai relè che attivano le elettrovalvole ed i trasformatori.

Sulla macchina operatrice sono alloggiati 4 bombole di GPL da 15 kg, ogni serbatoio alimenta una coppia di bruciatori, ciò ha reso possibile la realizzazione di 4

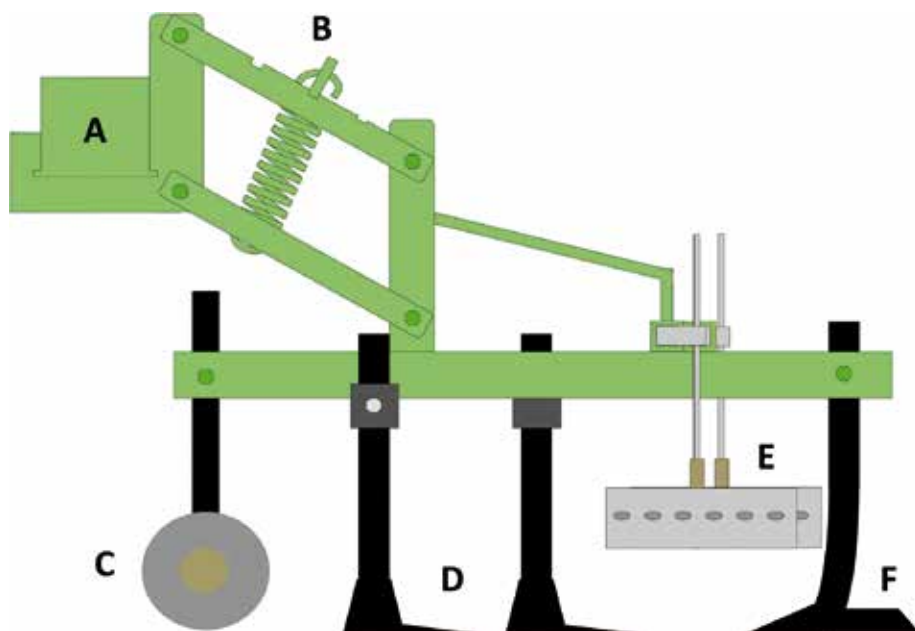


Fig. 3.3 Schema del parallelogramma articolato con i dispositivi per il controllo meccanico e termico delle infestanti: A) telaio principale; B) molla di ritenzione; C) ruote di appoggio pneumatiche; D) elementi rigidi conformati ad "L"; E) coppia di bruciatori; F) elemento rigido a zampa d'oca.

unità per il controllo termico totalmente indipendenti montate sulla stessa operatrice. Ogni unità per il pirodiserbo sito-specifico sulla fila della coltura è dotata di un proprio circuito di alimentazione del GPL (**Fig. 3.7**), che subito dopo la bombola presenta un regolatore di pressione manuale provvisto di manometro. Questo dispositivo ha la funzione di stabilizzare i valori della pressione ed è regolato sul valore di 0,5 MPa. Lungo il condotto del sistema di alimentazione del gas, montato a valle del regolatore di pressione principale, è collocato un sensore di pressione (Applisen® PC29), che ha la funzione di monitorare i valori della pressione del GPL inviando un segnale analogico al PLC (**Fig. 3.7**) In questo modo quando il gas all'interno della bombola sta per esaurirsi e la pressione decresce al di sotto del valore di 0,4 MPa, il PLC invia un segnale di allarme al sistema generale di controllo e gestione della missione e contemporaneamente chiude l'elettrovalvola principale posta subito dopo il sensore di pressione. Tutte le elettrovalvole montate sull'operatrice sono del tipo "normalmente chiuse" (Madas® EV& DN 15) e consentono la fuoriuscita del gas quando sono attivate da una corrente continua con voltaggio di 24 V. Il sistema di alimentazione del gas dopo l'elettrovalvola principale si suddivide in due diversi rami, ciascuno provvisto di regolatori di pressione manuali con manometro, impostati su due diversi valori di pressione e di due elettrovalvole secondarie (**Fig. 3.7**).

Questa scelta tecnica è stata adottata poiché la macchina operatrice in questo modo può effettuare trattamenti di pirodiserbo con due differenti pressioni di eser-

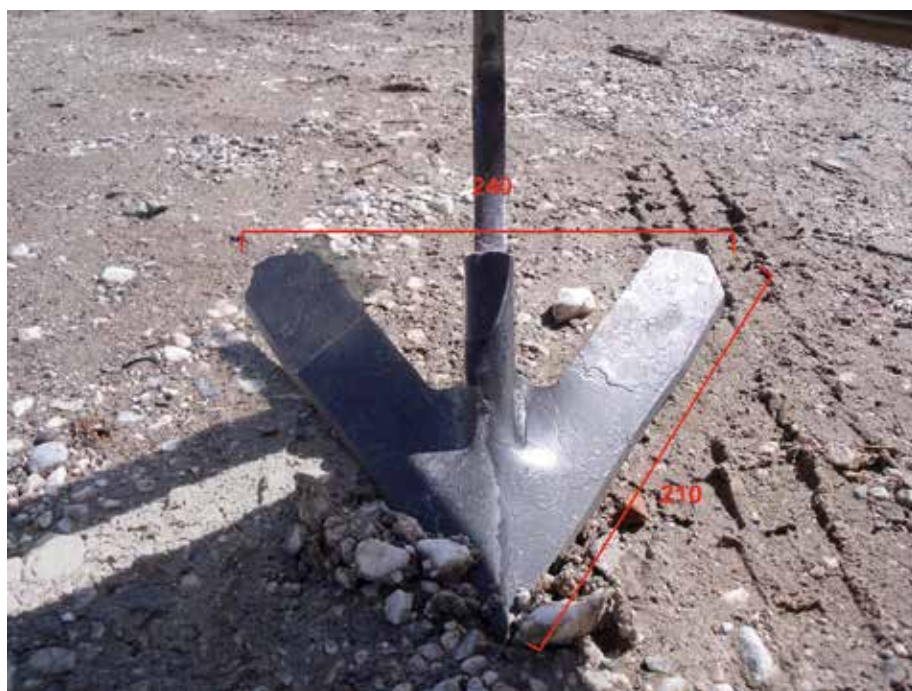


Fig. 3.4 Elemento rigido a zampa d'oca, le misure riportate sono espresse in mm.

La macchina automatica per effettuare il controllo fisico sito-specifico

zio del GPL, che mantenendo costante la velocità di lavoro, ci fornisce la possibilità di variare la dose di GPL per unità di superficie (intensità del trattamento termico) in base ai diversi valori di copertura percentuale misurati in tempo reale dal sistema di rilevamento delle piante infestanti. Infatti il PLC, dopo aver aperto l'elettrovalvola principale, attiva l'elettrovalvola secondaria specifica in base ai valori di copertura delle avventizie identificati dal sistema di detezione delle infestanti. In questo modo



Fig. 3.5 Elemento rigido conformato ad "L", le misure riportate sono espresse in mm.

il trattamento di pirodiserbo viene effettuato non solo in maniera sito-specifica sulle chiazze di piante infestanti, ma anche con l'intensità di trattamento variabile (trattamento a rateo variabile) in base ai diversi livelli di infestazione della flora spontanea che vengono rilevati in prossimità della fila della coltura.

Sui condotti del GPL che alimentano i bruciatori sono montati dei miscelatori esterni in ottone, che hanno la funzione di miscelare il gas con l'aria primaria. La struttura in ottone del miscelatore esterno presenta sulle pareti laterali tre aperture circolari del diametro di 7 mm, invece, all'interno è montato coassialmente un ugello di ottone con un foro di 1,1 mm di diametro. Il richiamo dell'aria primaria attraverso i fori circolari laterali è dovuto alla diminuzione di pressione causata dal flusso del gas ad elevata velocità che esce dall'ugello (effetto Venturi). I bruciatori prismatici sono stati realizzati in



Fig. 3.6 Scambiatore termico: a) visione interna della tramoggia con il supporto forato per le bombole, b) tubo flessibile che collega l'impianto di scarico del motore endotermico dell'unità mobile terrestre con le tramogge dello scambiatore termico, c) fase di riempimento delle tramogge che ospitano le bombole di GPL, d) attacco del condotto interno presente alla base della tramoggia cilindrica, e) cammino di scarico dello scambiatore termico montato sull'operatrice.

acciaio inossidabile e presentano una copertura esterna ed una rampa interna larga 25 cm e realizzata in profilato quadro di larghezza pari a 3 cm. La rampa interna presenta fori circolari del diametro di 2,5 mm distanziati regolarmente a 3,5 cm tra loro. Dai fori presenti sulla rampa fuoriesce la miscela di gas e aria primaria pronta ad essere innescata dal sistema di accensione. Per migliorare l'efficienza della combustione e agevolare il flusso dell'aria secondaria, sulla copertura esterna dei bruciatori sono state ricavate delle aperture circolari con un diametro di 9 mm. Sulla bocca della copertura del bruciatore sono state realizzate delle lamelle con la funzione di irrigidire la struttura riducendo così l'effetto delle deformazioni del metallo dovute alle alte temperature.

Ogni bruciatore è dotato di una termocoppia di tipo k collegata al modulo dei segnali in entrata del PLC che ha la funzione di monitorare la presenza della fiamma nel bruciatore. Infatti, se si verificano spegnimenti accidentali della fiamma il PLC automaticamente attiva il sistema di accensione, se questo processo fallisce reiteratamente per un periodo di tempo superiore ai 10 s, il PLC chiude l'elettrovalvola principale inviando un segnale di malfunzionamento al sistema di gestione principale presente nell'unità autonoma terrestre. I cavi della termocoppia sono rivestiti con un tessuto in fibra di vetro in modo da resistere alle alte temperature.

Ogni bruciatore dell'operatrice è dotato di un sistema di accensione automatico. Questo è costituito da un trasformatore (Cofi® TRL 24-30C) in grado di convertire la

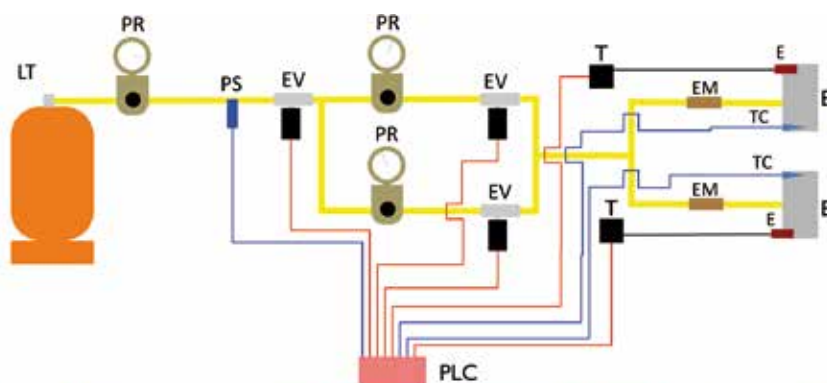


Fig. 3.7 Schema e immagini dei circuiti di alimentazione del gas dei 4 diversi moduli per il controllo sito-specifico delle infestanti: LT) serbatoio del GPL, PR) regolatore di pressione con manometro, PS) sensore di pressione, EV) elettrovalvola, T) trasformatore, EM) miscelatore esterno, TC) termocoppia, E) elettrodo, B) bruciatore, PLC) controllore a logica programmabile.

corrente continua a 24 V in una corrente alternata a 12 kV, ed un elettrodo bipolare con un corpo isolante in ceramica. Il trasformatore è cablato con l'elettrodo mediante speciali cavi per alta tensione con rivestimento isolante in gomma siliconica, in grado di poter sopportare le alte temperature in prossimità del bruciatore. Il trasformatore è caratterizzato da una potenza di 80 W, che consente di ottenere la formazione di un arco voltaico tra i due poli dell'elettrodo (**Fig. 3.8**).

Il sistema di accensione della miscela aria e GPL è molto rapido ed efficace, infatti dall'attivazione dei relè collegati al trasformatore e all'elettrovalvola secondaria fino all'ottenimento di una fiamma completa e stabile su tutto il profilo del bruciatore, intercorre un intervallo di tempo pari a 0,39 s. Inoltre questo sistema è in grado di accendere il bruciatore anche a valori di pressioni del GPL relativamente elevate da 0,2 a 0,5 MPa, che corrispondono ai valori utilizzati durante i trattamenti di pirodiserbo. In questo modo è stato possibile evitare l'uso di una fiamma pilota sempre accesa, che in un'operatrice automatica portata da un'unità autonoma avrebbe potuto comportare dei rischi di innesco di focolai di incendio, dovuti all'eventuale presenza di materiale vegetale secco sul bordo e sulle capezzagne dei campi.

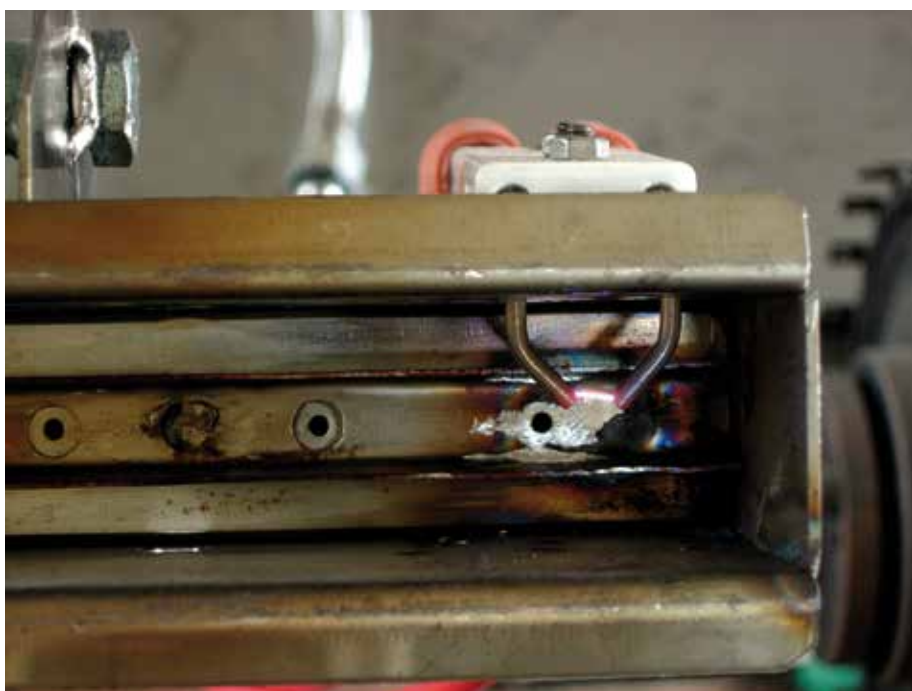


Fig. 3.8 Formazione dell'arco voltaico tra i due poli dell'elettrodo del sistema di accensione dei bruciatori della macchina automatica per il controllo termico sito-specifico delle infestanti.

3.2.4 Il sistema idraulico

L'operatrice automatica per il controllo fisico delle infestanti è dotata di un sistema di ripiegamento che consente di ridurre l'ingombro della macchina durante le fasi di trasporto. Il telaio principale è suddiviso in una sezione centrale e due sezioni laterali incernierate e pieghevoli. L'apparato di ripiegamento è azionato da due pistoni oleodinamici azionati dall'impianto idraulico dell'unità autonoma terrestre. La larghezza dell'operatrice ripiegata è di 2,48 m. Il sistema è provvisto di due coppie di sensori induttivi collegati al PLC, in modo da rilevare quando la macchina è in configurazione chiusa (fase di trasporto) e quando è in configurazione aperta (fase di lavoro).

La macchina operatrice è anche provvista di un sistema di guida che consente di eseguire piccoli spostamenti laterali rispetto alla direzione di avanzamento, in modo da poter seguire le file della coltura senza danneggiarla (**Fig. 3.9**).

Il sistema si compone di una coppia di ruote metalliche direzionali ed un impianto sterzante azionato da un pistone a doppio stelo collegato all'impianto idraulico dell'unità mobile terrestre.

Il dislocamento laterale dell'operatrice rispetto al centro dell'unità semovente è misurato in continuo da un sistema composto da un potenziometro ed un encoder. Un giunto telescopico dotato di snodo collega l'operatrice all'unità mobile terrestre; sull'o-



Fig. 3.9 Sistema di guida dell'operatrice automatica per il controllo fisico delle infestanti su mais.

peratrice il giunto è collegato ad una slitta che scorre su un binario. Il potenziometro e l'encoder rilevano e codificano gli spostamenti relativi della slitta inviando le informazioni al PLC ed al sistema di controllo generale. Queste informazioni sono elaborate insieme a quelle che provengono dal sistema per il rilevamento delle file della coltura, ed utilizzate per l'azionamento del pistone idraulico a doppio stelo di guida.

3.3 Integrazione ed applicazione

La macchina per il controllo fisico sito-specifico delle infestanti su mais realizzata dall'Università di Pisa all'interno delle attività previste nel progetto RHEA è stata testata ed ottimizzata, sincronizzando ed integrando il funzionamento di tutti i dispositivi deputati all'attuazione con quelli relativi al rilevamento delle infestanti e delle file della coltura (**Fig. 3.10**).

Numerose prove in campo sono state effettuate in collaborazione con i colleghi dello CSIC-CAR di Madrid. Il sistema di rilevamento delle infestanti riesce a misurare la copertura vegetale del suolo suddividendo la superficie in celle larghe 0,5 m e lunghe 1 m. Considerando tutti gli inevitabili ritardi connessi ai processi di elaborazione ed attuazione, con una velocità di avanzamento di 3 km h⁻¹ la precisione massima raggiun-



Fig. 3.10 L'operatrice automatica per il controllo fisico su mais accoppiata all'unità autonoma terrestre.

La macchina automatica per effettuare il controllo fisico sito-specifico

gibile per i trattamenti sito-specifici di pirodiserbo, in termini di distanza tra due celle che necessitano interventi termici a diversa intensità, è di circa 0,5 m. Questo significa che quando l'operatrice incontra una cella in cui è presente un livello di copertura delle infestanti tale da dover essere trattata, il bruciatore deve cominciare ad accendersi circa 0,5 m prima e spegnersi 0,5 m dopo i confini della cella stessa (**Fig. 3.11**).

3.4. Considerazioni conclusive

L'operatrice per il controllo delle infestanti, oltre alla caratteristica di essere totalmente automatica e collegabile ad una unità motrice autonoma, consente di effettuare trattamenti mirati e specifici solo dove questi si rendano necessari, per cui consente di limitare i consumi di GPL rispetto alle comuni macchine per il pirodiserbo che effettuano trattamenti in campo in modo continuo ad una pressione di esercizio costante.

La riduzione dei consumi di GPL conseguibile con questa operatrice può oscillare tra i valori del 50% e dell'80%, questa variabilità è dovuta alle possibili diverse distribuzioni spaziali delle infestanti nel campo. Questo fenomeno può essere giustificato prendendo in considerazione la precisione del trattamento termico. Infatti a parità



Fig. 3.11 Operatrice automatica per il controllo delle infestanti su mais, in fase di lavoro durante le prove di integrazione dei diversi sistemi.

di copertura delle infestanti, i livelli di consumi più bassi sono legati a distribuzioni delle infestanti fortemente aggregate in poche chiazze di grandi dimensioni, al contrario i valori di consumo più alti si registrano quando le avventizie presentano una distribuzione spaziale fortemente dispersa, caratterizzata da un numero elevato di chiazze di piccole dimensioni.

Sebbene la macchina operatrice sia stata realizzata per operare su mais, può essere adattata e regolata per poter effettuare trattamenti di controllo non chimico delle infestanti anche su altre colture, che risultano tolleranti al pirodiserbo come ad esempio aglio, cipolla e porro.

4. Smart technologies – tecnologie avanzate della airblast RHEA sprayer nella irrorazione antiparassitaria

4.1. Considerazioni preliminari

Gli interventi di lotta antiparassitaria sono divenuti fasi essenziali del processo produttivo delle aziende agricole per gli importanti riflessi che hanno ai fini dell'ottenimento del prodotto finito. Le cause sono riconducibili sia ai rapidissimi cambiamenti climatici in atto, che stanno modificando le tipologie dei patogeni/parassiti e le loro dinamiche di sviluppo, sia agli imminenti adempimenti legislativi imposti dal D.lgs 150/2012 recepimento nazionale della direttiva 2009/128/Ce, sull' uso sostenibile dei pesticidi. Un quadro assai complesso e in evoluzione che implica innovativi approcci gestionali basati sulla adozione di modelli previsionali, sulla creazione di reti di monitoraggio aziendali-comprensoriali, per la tempestiva ed efficace gestione delle operazioni di difesa antiparassitaria e sull'impiego di macchine efficienti nella distribuzione.

L'uso sostenibile dei pesticidi (prodotti fitosanitari) e la necessità di un rinnovato sistema integrato di conoscenza e di gestione del settore agricolo, in corso di evoluzione, attraverso i nuovi approcci della agricoltura di precisione si è concretizzato con il 7° Programma Quadro della Unione Europea nel progetto RHEA. L'obiettivo posto è la realizzazione di un sistema integrato di: a) soluzioni per il monitoraggio delle colture da parte di sensori prossimali GMU (unità di terra mobili) e remoti UAV (Unmanned Aerial Vehicle), b) sistemi di gestione assistita informatizzata e controllo delle attività, c) una flotta di robot operativi in campo. Il sistema è composto da sei moduli integrati: Mission Manager (MM), Perception System (PS), Communication and location System (CS), Actuation System (AC) suddiviso a due livelli di priorità High Level and Low Level Decision, Mobile Units (MUs) una stazione di base ed una interfaccia grafica Graphic User Interfaces (GUI). Tutti i moduli, ognuno caratterizzato da un elevato contenuto tecnologico hardware e software, interagiscono fra loro offrendo una completa automazione e ottimizzazione degli interventi operativi.

Il capitolo in esame si riferisce al terzo scenario considerato nel progetto RHEA relativo alla applicazione di prodotti chimici alle colture legnose. Gli altri riguardano l'impiego di sistemi di tipo chimico, fisico-meccanico e termico per una efficace gestione delle infestanti nelle colture di pieno campo.

Nel contesto delle operazioni di difesa antiparassitaria, le innovazioni tecnologiche assimilabili all'agricoltura di precisione (AP), sono molteplici e spaziano in termini di operazioni gestibili, livello tecnologico, conseguentemente, investimenti necessari per attuarle. Ad oggi molto lavoro è stato svolto sull'ottimizzazione dei sistemi di irrorazione e in particolare dal 1980, per adattare le tecniche di irrorazione alle caratteristiche colturali. Infatti, una corretta esecuzione dei trattamenti fitosanitari, non può prescindere da adeguare i volumi e le portate di aria in funzione delle caratteristiche del bersaglio e della fase fenologica della coltura. I progressi ottenuti in riferimento ai sensori, agli attuatori ed ai controllori elettronici hanno facilitato l'introduzione dell'elettronica sulle macchine irroratrici per la protezione delle colture arboree. Ciò ha reso disponibili sul mercato, a prezzi contenuti, soluzioni inapplicabili solo fino a dieci anni fa. L'elettronica e l'informatica applicate alla meccanica agricola (definite anche come "meccatronica"), sono potenziali strumenti di aiuto alla gestione della difesa antiparassitaria, con indubbi vantaggi economici, ambientali, di risparmio di manodopera e migliore efficienza dei prodotti fitosanitari. Tuttavia, rispetto ai macchinari puramente meccanici, il ricorso a tali tecnologie si traduce solitamente in maggiori investimenti iniziali e per la gestione delle implementazioni, poiché divengono imprescindibili figure professionali specializzate. Ripercorrendo l'evoluzione delle tecnologie di agricoltura di precisione, in questo specifico contesto, il primo passo è stato raggiunto con l'interruzione della portata del liquido quando la vegetazione non viene rilevata. Ulteriori sviluppi sono stati ottenuti con il controllo sulle differenti bande verticali della parete. Il passo successivo è stato quello di rendere la portata proporzionale alla larghezza della chioma, mediante l'ausilio di sensori a ultrasuoni, oppure, del laser LIDAR (Light Detection And Ranging). Altre importanti ricerche sono state dedicate alla definizione dei parametri di irrorazione, al fine di ottimizzare l'efficienza del trattamento sulla base delle condizioni meteorologiche. In tal senso molti ricercatori hanno indagato sulla inclinazione ed il posizionamento dei diffusori per adattare al meglio il getto d'aria sulla vegetazione bersaglio. Gli studi più recenti prendono in considerazione l'applicazione 3D georeferenziata mediante mappe di prescrizione, per realizzare una applicazione a rateo variabile anche su colture arboree. Tali sistemi consentono di ottenere direttamente la tracciabilità della dose applicata per pianta.

4.2. Le fasi di sviluppo: materiali e metodi

La configurazione iniziale della unità robot di terra RHEA prendeva in considerazione veicoli molto piccoli con 200-400 kg di massa e meno di 15 kW di potenza, operanti ad una velocità di avanzamento di 1,5 m/s e caratterizzati da un solo braccio operativo per la irrorazione.

In particolare, per il trattamento della parete vegetale questo è concretizzabile solamente nel caso di irrorazione per il controllo di insetti, ma non è appropriato per altre malattie fungine, ecc. poiché in tali contesti diviene essenziale una completa copertura della vegetazione. In questi casi, sorgono almeno due problemi: uno è il dosaggio che, anche in un moderno impianto arboreo intensivo, con una media di 5000 m² di volume della chioma per ettaro, richiede non meno di 100-200 l/ha. Un secondo è la necessità di intervenire mediante l'aeroconvezione per accompagnare il getto irrorato all'interno della chioma e l'uso inadeguato di un solo diffusore, alla velocità prescritta, può determinare una inaccettabile disparità di applicazione sinusoidale.

Sulla base di queste considerazioni il comitato del progetto RHEA ha riconosciuto la necessità di realizzazione di una unità di terra mobile più adatta (GMU), che presenta le seguenti caratteristiche: trazione integrale 4x4, la trasmissione a variazione continua CVT, 37,3 kW di potenza complessiva di cui il 10% disponibile come energia elettrica e massa complessiva di 1600 kg. Inoltre il mezzo è dotato di attacco a tre punti di sollevamento e p.d.p. standard a 52 rad/s. Ciò rende possibile adottare una irroratrice tradizionale, ma caratterizzata da un innovativo sistema di gestione dell'irrorazione.

Una ulteriore fase essenziale del progetto è stata la definizione della coltura sperimentale per la dimostrazione finale. Il comitato scientifico ha stabilito come coltivazione l'olivo allevato con sesto di impianto intensivo: questa scelta è dovuta al fatto che l'oliveto è assimilabile ai moderni frutteti ed alle colture arboree da biomassa, come indicato nella proposta progettuale RHEA. Il sesto d'impianto è di 4,0 m inter-fila e 1,5 m sulla fila caratterizzato da una parete fogliare piatta e regolare con un'altezza massima raggiunta in pieno sviluppo di 3,5 m (**Fig. 4.1**).

Allo scopo di ottimizzare la irrorazione in funzione delle caratteristiche del bersaglio sono stati così studiate diverse soluzioni in termini di dispositivi di irrorazione e per il getto vettore: il modulo di irrorazione rotativo Proptec, con polverizzazione centrifuga, il modulo ventilatore Sardi a sei ugelli idraulici su ciascun modulo di attuazione di tipo idraulico, il ventilatore tangenziale. Tuttavia le soluzioni analizzate presentavano limiti di accoppiamento dovuti alle elevate richieste di potenza e alla limitata portata di aria prodotta. Pertanto, tenendo conto dei principi di irrorazione e delle tecnologie prevedibili e disponibili, è stata presa in considerazione una irroratrice mista basata sul sistema "Oktopus" della ditta Nobili SpA di Molinella (Bo) (**Fig. 4.2**).

Tale scelta è motivata dal fatto che la macchina ha delle soluzioni tecniche nei dispositivi di distribuzione del tipo ad aeroconvezione e getto mirato della miscela antiparassitaria che consentono un adattamento al bersaglio da parte dell'operatore. Inoltre, i principi progettuali con cui è stata realizzata l'irroratrice permettono di regolare in maniera separata ed indipendente il volume di miscela irrorata, il grado di polverizzazione, il tipo di spruzzo, la quantità, la velocità, l'orientamento, la forma e la turbolenza del getto di aria che deve inserire le goccioline di miscela antiparassitaria nella vegetazione.

La nobile Oktopus è una irroratrice ad aeroconvezione, a polverizzazione per pressione e a getto mirato. I diffusori sono multipli, 4 a sinistra e 4 a destra nella versione identificata per il progetto, e ad ognuno è associato un gruppo porta-ugello (**Fig. 4.3**), sui quali si possono allestire i tipi di polverizzatori più appropriati. I moduli di irrorazione (diffusore + ugello) sono costituiti da una bocchetta sagomata capace di allargare il getto di aria a ventaglio aumentandone nel contempo la velocità, e da un polverizzatore "fuori flusso" che indirizza lo spruzzo verso il getto di aria con inclinazione tale da ottimizzare la miscelazione aria gocce.

Le due funzioni di polverizzazione e di trasporto sono indipendenti e regolabili. Per la polverizzazione vengono adottate staffe portaugelli con antigoccia che possono montare sia piastrine ceramiche che testine integrate; la scelta dell'ugello determina il tipo di spruzzo e la portata. Il getto di aria è generato dall'impianto pneumatico costituito da una girante di tipo centrifugo regolabile agendo su un cambio a due velocità e naturalmente sulla p.t.o. La girante spinge l'aria in una camera di espansione (**Fig. 4.3**) da cui partono 8 tubi adduttori che portano l'aria ai "moduli irroranti". I moduli di irrorazione separati consentono di ottimizzare l'irrorazione su tutti i tipi di impianto e forme di allevamento, con la variazione dell'orientamento dei getti è possibile modulare il flusso così da evitare l'effetto suolo: se il getto è vicino al suolo la depressione creata dalla velocità di uscita del getto non trova una

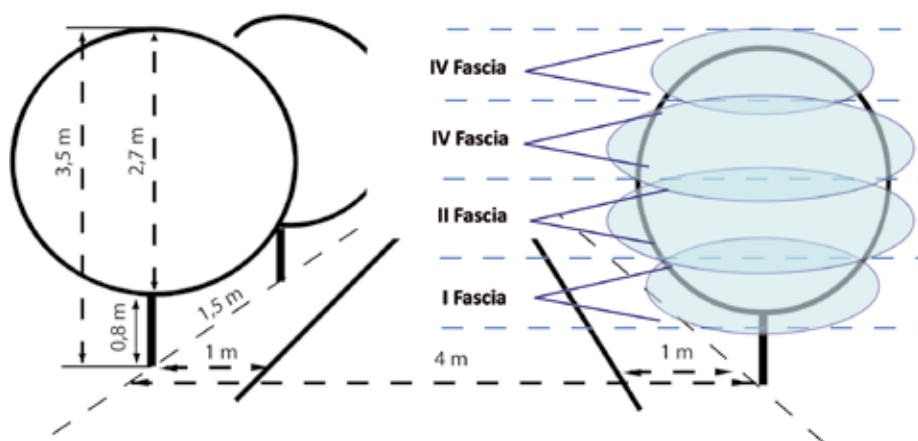


Fig. 4.1 Definizione delle caratteristiche dell'oliveto per la dimostrazione finale.

corrispondente immissione di aria e devia verso il basso con conseguenti perdite di antiparassitario a terra. Creando una spinta verso l'alto nella parte più bassa si riesce a compensare questo fenomeno ed è ciò che viene fatto con il “modulo” inferiore. Parimenti il “modulo” superiore viene rivolto verso il basso per schiacciare il flusso sulla coltura. La ampia versatilità di disposizione dei moduli di irrorazione consente di utilizzare la macchina su diverse colture, tipologie di impianto e forme di allevamento particolarmente complesse. È inoltre possibile concentrare il getto antiparassitario nelle zone di maggiore intensità o in quelle fasce sulle quali si vuole concentrare il trattamento (**Fig. 4.4**).

Tuttavia, questa configurazione, presenta il limite della impostazione manuale da parte dell'operatore al variare della tipologia di coltivazione e della forma di allevamento.

In olivicoltura, ma come del resto in molte altre colture arboree intensive, sono frequenti la presenza di fallanze, le irregolarità di sviluppo e degli spessori delle chiome tra le piante all'interno dello stesso appezzamento. Tali condizioni, durante le operazioni di difesa antiparassitaria, determinano maggiori impatti e costi dovuti agli sprechi di prodotto generati, che si disperdono nell'ambiente. Le perdite di miscela antiparassitaria si determinano principalmente nelle zone comprese tra le piante sulla fila e in modo variabile in funzione dello sviluppo della chioma, con percentuali più alte nelle parti apicali e basali (**Fig. 4.5**).

Il perseguimento degli obiettivi individuali assegnati alla nostra unità di ricerca ovvero la riduzione delle perdite fuori bersaglio ha indirizzato le ricerche e la pro-



Fig. 4.2 Soluzione individuata per lo sviluppo di una irroratrice a rateo variabile: sistema “Oktopus” Nobili SpA di Molinella (Bo).

gettazione verso l'individuazione di soluzioni per l'automazione della gestione del trattamento in funzione delle caratteristiche dell'olivo e dell'oliveto.

In funzione di tali scopi e partendo dalla configurazione base della irroratrice nobili oktopus sono state adottate le seguenti modifiche:

- Implementazione di un sistema di rilevamento della chioma;
- Automazione dell'inclinazione dei moduli di irrorazione superiori e inferiori;
- Automazione e differenziazione dei volumi di miscela antiparassitaria distribuita in quattro differenti fasce
- Automazione del controllo del flusso dell'aria vettore in ciascuna fascia
- Regolazione del flusso di aria in ingresso alla girante in modo autonomo e proporzionale al numero di moduli di irrorazione aperti

Le caratteristiche della chioma bersaglio sono ottenute da un sistema di rilevamento costituito da otto sensori a ultrasuoni (4 per lato) che rilevano lo spessore della chioma in quattro differenti fasce verticali (**Fig. 4.6**). Questi sono collocati in modo equidistante (0,5 m) su due supporti in acciaio montati ai lati dell'atomizzatore. Ad ogni modulo irrorante è associato un sensore che gestisce la fase di irrorazione secondo specifiche regole impostate nel LLAS (controllore logico programmabile

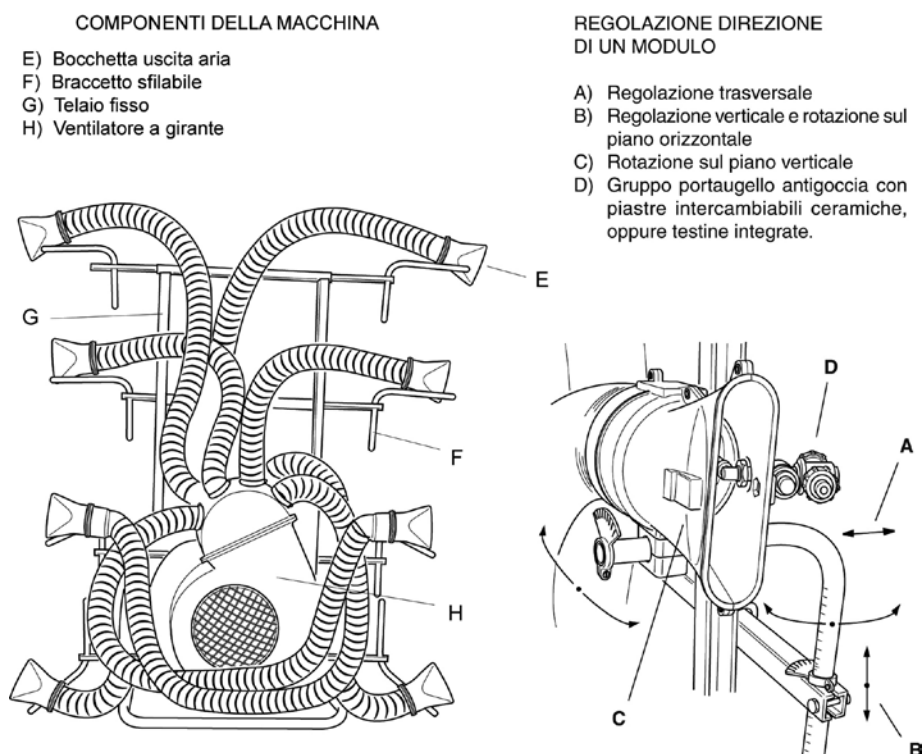


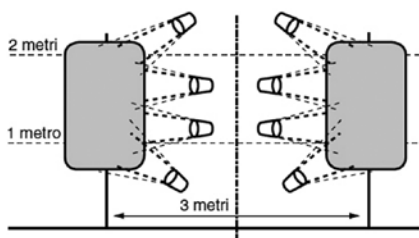
Fig. 4.3 Visone strutturale dell'atomizzatore oktopus e della architettura dei moduli irroranti.

PLC). I sensori impiegati presentano le seguenti caratteristiche:

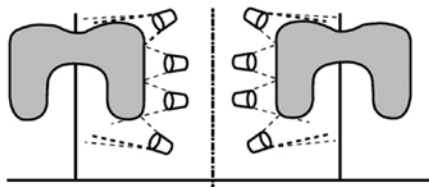
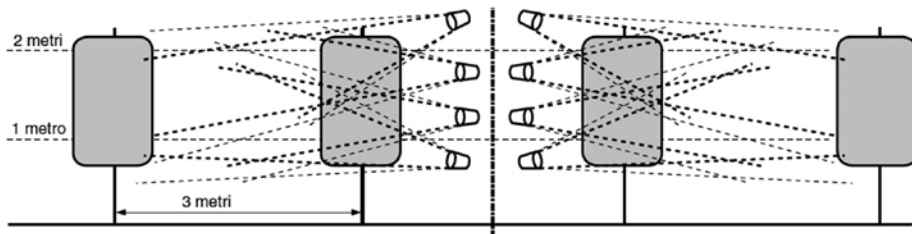
- Range operativo da 300 mm a 2000 mm;
- Range di temperature di funzionamento: -20° c a 70° c.
- Uscita analogica: 4 - 20 ma
- Case in termoplastica in poliestere rinforzato, iec ip67.
- Dimensioni approssimative: 40 mm diametro, 45 mm lunghezza.

Il principio di funzionamento dei sensori ad ultrasuoni si basa sull'emissione di un impulso o una serie di impulsi di ultrasuoni, che attraversano l'aria alla velocità del suono. Una porzione di questa energia è riflessa dalla chioma dell'oliveto e ritor-

Irrorazione con passaggio in tutti i filari



Irrorazione con passaggio a filari alterni



È possibile orientare i getti in modo da scalzare i primi strati di foglie, che altrimenti si ammasserebbero costituendo una barriera alla diffusione della miscela antiparassitaria.

Fig. 4.4 Possibili configurazioni e metodologie di lavorazione dell'atomizzatore oktopus in relazione alle caratteristiche della superficie da trattare.

na verso il sensore. Quest'ultimo misura il tempo totale impiegato dagli impulsi per raggiungere il bersaglio e ritornare alla fonte. La distanza dall'oggetto è calcolata in base alla seguente formula [1]:

$$D = \frac{c \cdot t}{2}$$

D = distanza tra sensore e bersaglio

C = velocità del suono nell'aria ms^{-1}

T = tempo di volo dell'impulso ad ultrasuoni

I sensori ad ultrasuoni hanno il vantaggio di essere facilmente impiegabili e basso costo, tuttavia, a causa dell'angolo di divergenza delle onde sonore, presentano un errore di misurazione che si incrementa all'aumentare della distanza misurata. La tecnologia ad ultrasuoni, infatti, nasce originariamente per misurare le distanze in ambienti industriali, dove gli oggetti sono rigidi, e le superfici di rimbalzo sono perpendicolari alla direzione dell'onda ad ultrasuoni

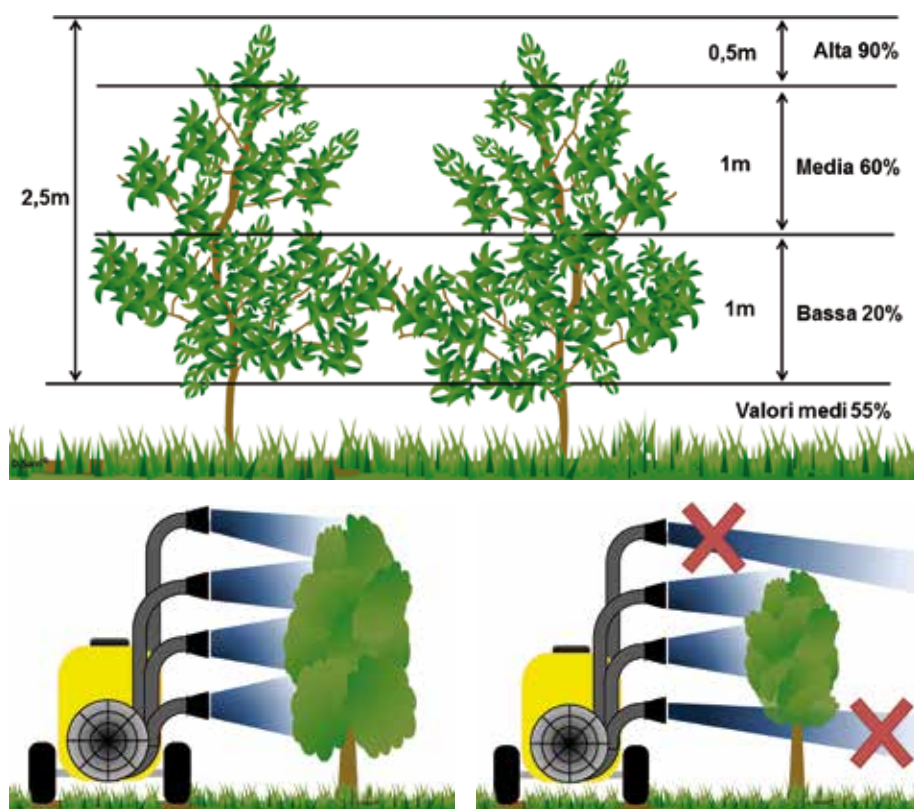


Fig. 4.5 Perdite di prodotto correlate alla distribuzione irregolare di sviluppo della chioma fonte reigsl e felber (basel ciba) 1991.

condizioni ideali per il loro funzionamento. Comunque il notevole sviluppo che hanno avuto negli ultimi anni, con la definizione di strumenti di compensazione quali algoritmi di elaborazione del segnale, ne fanno degli strumenti applicabili in agricoltura con ridotti margini di errore. Studi recenti hanno stimato per gli agrumi una differenza di errore medio del 22% con un livello di confidenza del 95% tra i volumi misurati con sistemi ad ultrasuoni confrontati a sistemi manuali. Per sopperire ai limiti funzionali della tecnologia di misurazione ad ultrasuoni si è ricorso alla azienda banner poiché produce sensori ad ultrasuoni dotati di algoritmi specifici in grado di compensare in continuo gli errori dovuti alle variabili ambientali.

Il ricorso ai sensori ad ultrasuoni è giustificato dal ridotto investimento economico e dal buon livello di affidabilità/versatilità di utilizzo rispetto a sistemi del tipo laser scan che necessitano di competenze specifiche e risultano più costosi, ma in grado di garantire una maggiore precisione grazie a modalità di rilevamento basata su una scansione dell'intero profilo della superficie su milioni di punti, anziché sulla misurazione di un singolo punto.



Fig. 4.6 Sistema di percezione con sensori ad ultrasuoni.

Come riportato precedentemente l'ottimizzazione delle operazioni di irrorazione deve ammettere il controllo di tutte le variabili in gioco: portata di aria, portata della miscela, dimensioni delle gocce.

Per la gestione a rateo variabile del vettore aria sono stati realizzati tre dispositivi collocati in corrispondenza di punti strategici della macchina irrorante ovvero all'ingresso della girante e dei tubi adduttori in prossimità della calotta e nella porzione terminale dei moduli irroranti. Il controllo è realizzato attraverso due tipologie di soluzioni: attuatori di posizionamento e valvole a farfalla:

- Una valvola a farfalla principale (**Fig. 4.7**) gestita da un motore passo-passo allestita nel collettore di aspirazione controlla la portata dell'aria generale in ingresso. Il posizionamento di tale valvola, regolabile tra 0° completamente chiusa e 90° aperta, è proporzionale al numero dei moduli di irrorazione aperti/chiusi in funzione delle regole riportate in tabella 3;
- Otto valvole a farfalla (**Fig. 4.8**) gestite da motori passo-passo allestite su ciascun tubo del collettore allo scopo di controllare la portata di aria in ogni modulo di irrorazione. questi dispositivi sono stati programmati per operare in condizione aperto e/o chiuso;
- Inclinazione variabile dei quattro moduli terminali di polverizzazione (**Fig. 4.9**) (superiore e inferiore) gestita da motori passo-passo al fine di migliorare la deposizione nelle aree sensibili della chioma e ridurre i fenomeni di deriva;

Per l'attuazione dei dispositivi sono stati realizzati accoppiamenti di parti meccaniche del tipo a pignone, corona, catena che garantiscono facili e tempestivi interventi di modifica azionati da motori passo passo. Il ricorso a questa soluzione è giustificato dal fatto che questa tecnologia è sostanzialmente semplice e permette un'ampia possibilità di regolazioni.

La gestione a rateo variabile della miscela antiparassitaria viene realizzata mediante doppi ugelli su ciascun modulo di polverizzazione. Il sistema è gestito attraverso due elettrovalvole che funzionano da interruttore poste in prossimità degli ugelli (**Fig. 4.10**).

La fase operativa prevede che in caso di rilevamento di un piccolo volume della chioma (elevata distanza tra irroratrice e profilo della chioma), sia attivato solamente



Fig. 4.7 Dispositivi di controllo della portata di aria in ingresso alla irroratrice.

l'ugello a minore portata ovvero il giallo che ha il 30% del volume totale erogabile. Invece, con la copertura completa (minima distanza tra irroratrice e profilo della chioma), entrambe le elettrovalvole si aprono simultaneamente ottenendo così la portata totale.

Il monitoraggio del corretto funzionamento (erogazione della miscela) del robot RHEA Airblast Sprayer è eseguito tramite un sensore di pressione. Quest'ultimo, quando il valore di pressione non è nel giusto range di lavoro, genera un segnale di allarme che viene inviato al LLAS ed a sua volta al MM (Mission manager) del sistema RHEA che può intervenire. Infine, un sensore di livello posto nel serbatoio, comunica in continuo con il LLAS per gestire il rientro dell'unità alla base station per effettuare i rifornimenti necessari.

Il dispositivo AC Actuation Controller è responsabile del controllo a basso livello dei sistemi della irroratrice, cioè gli attuatori (step motors, elettrovalvole, circuiti di comando sensori di monitoraggio etc.). Tale sistema è un PLC industriale composto da un modulo cpu accoppiato con elementi di ingresso e uscita. I PLC, oltre alle funzioni strettamente logiche (and,or,not etc.), permettono di eseguire conteggi, temporizzazioni, comparazioni, calcoli numerici, ed altre operazioni di manipolazioni di dati in formato bit, byte, word (come ad esempio operazioni di shift, test su bit, ed altre). Sostanzialmente il PLC è un sistema digitale elettronico che utilizza una memoria programmabile, in differenti linguaggi di programmazione per la memorizzazione di informazioni o istruzioni, atte a realizzare specifiche funzioni, allo scopo di controllare macchine e processi. Il controllo della macchina avviene attraverso una fase di acquisizione degli input, ed in funzione delle istruzioni programmate nella memoria, il sistema determina se apportare o meno modifiche allo stato attuale delle uscite. L'acquisizione dello stato attuale del processo avviene per mezzo di dispositivi che funzionano da proximal sensing del sistema ("datori" di segnali) quali ad esempio sensori ad ultrasuoni ma anche pulsanti, finecorsa, fotocellule, interruttori, contatti ausiliari di relè, telerruttori, relè termici, ecc.

Quindi sostanzialmente il ruolo del PLC è la acquisizione delle informazioni e dei dati provenienti dal sistema controllato (nel nostro caso la chioma dell'oliveto) la elaborazione degli stessi in base ad un programma specifico (costituito da una serie di istruzioni del complesso macchina al verificarsi di eventi o situazioni ben definite) e l'emissione, verso il sistema controllato, del risultato di tale elaborazione che costituisce l'istruzione istantanea da eseguire da parte degli organi preposti all'esecuzione del processo (**Fig. 4.11**).



Fig. 4.8 Valvole a farfalle poste nella calotte collettrice per la gestione della portata di aria nei moduli irroranti.

Per uniformare l'implementazione delle tre unità di terra il consorzio ha stabilito che il controller AC impiegato è il medesimo per le tre configurazioni delle unità terrestri ed inoltre, che l'utente responsabile della progettazione della singola unità deve essere in grado di editare e modificare il programma del controllo a basso livello. Inoltre, la architettura del LLAS è strutturata nel seguente modo: il GMUC (unità di controllo a terra) è collocato nella unità di terra mentre il sistema AC è incorporato nelle singole implementazioni. Lo AC è connesso al GMUC mediante connessione ethernet. Alcuni relè possono essere collocati tra l'AC e gli attuatori per adattare le tensioni di alimentazione e/o le potenze necessarie. La logica di processo prevede che il sistema decisionale di alto livello HLDMS "high level decision making system" invii comandi al GMUC che a sua volta invia le informazioni necessarie al AC quindi agli attuatori finali (**Fig. 4.12**).

Il sistema HLDMS (High level actuation system, sistema di attuazione di alto livello) è gestito a monte dal MM (Mission manager) del sistema RHEA. In sintesi l'irroratrice presenta le seguenti caratteristiche principali:

- Altezza massima trattabile 3,5 m
- Massa totale dell'atomizzatore a vuoto 250 kg
- Serbatoio: 400 l
- Pompa idraulica (miscela antiparassitaria): max 100 l min⁻¹ - 25 bar, max 5 kW potenza assorbita dalla p.d.p.
- Potenza massima assorbita dalla girante 15 kw
- 8 sensori ad ultrasuoni per il rilievo prossimale
- 8 elettrovalvole per apertura-chiusura degli ugelli
- 4 attuatori elettrici per il posizionamento dei moduli irroranti superiori e inferiori



Fig. 4.9 Sistemi di attuazione per i moduli irroranti superiori ed inferiori.

- 9 attuatori elettrici per il controllo del flusso dell'aria al ventilatore e alle tubazioni dei moduli irroranti

La progettazione dei dispositivi di attuazione è stata preliminarmente basata sulla formulazione di regole specifiche riferite ad un oliveto con densità d'impianto di 1666 piante/10000 m², volumi delle chiome medi per pianta di 3 m³, rapporto m² foglie/m³ volume chioma di 0,3, LAI di 0,55 e una superficie da trattare di 17.000 m²/ha. I principi che regolano l'irrorazione sono basati sulla suddivisione della chioma in 4 differenti fasce produttive come riportato in figura 1 e definendo delle specifiche attuative (**Fig. 4.13**) in concomitanza di 4 particolari scenari. Regole che vanno ad agire sia sulla portata dell'aria che sui volumi di miscela antiparassitaria distribuita.

Nel primo scenario si presuppone che il sistema di percezione rilevi l'intera presenza della chioma: in questa condizione i moduli irroranti superiori ed inferiori sono posizionati con inclinazione 0° rispetto ai braccetti di supporto e la portata dell'aria è massima.

Nel secondo scenario si ipotizza la presenza di chioma nelle due fasce centrali per cui i moduli irroranti superiori e inferiori devono essere inclinati di ±15° verso l'asse latitudinale della chioma con portata massima di aria.

Nel terzo scenario lo sviluppo della chioma è minimo e concentrato in corrispondenza dell'asse latitudinale. In queste condizioni la macchina chiude l'erogazione di miscela antiparassitaria ed aria dai moduli irroranti superiori e inferiori e lascia inalterati i due moduli centrali.

Infine nell'ultimo scenario in assenza di vegetazione la macchina chiude sia gli ugelli che il getto vettore.

Data l'elevata versatilità di configurazioni impostabili della irroratrice RHEA sono stati condotti studi allo scopo di definire le ottimali regolazioni in termini di volumi di aria e miscele erogabili.

La caratterizzazione delle portate di aria in ingresso ed in uscita della macchina irroratrice è stata determinata attraverso uno studio che ammetta la possibilità di una gestione separata del getto aria in ogni modulo della macchina. A tale scopo, pertanto, sono state condotte delle prove di laboratorio finalizzate alla caratterizza-



Fig. 4.10 Doppi ugelli su ciascun modulo irrorante per gestire l'irrorazione con differenti portate.

zione delle portate di aria in ingresso ed in uscita. In fase di progettazione sono state ipotizzate delle posizioni della valvola a farfalla posta sul collettore principale, con il seguente schema (**Tab. 4.1**):

Per la valutazione della portata in ciascun condotto è stato allestito un sistema di visualizzazione dati attraverso la predisposizione di pitot contenenti come liquido di contrasto una soluzione alcolica (**Fig. 4.14**). Per rilevare le misurazioni è stata collocata posteriormente ai pitot una scala di lettura che permetta una rapida estrapolazione dei dati.

La portata in uscita Q_{out} è stata determinata mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo elettronico, applicando il principio della conservazione dell'energia tra i due peli liberi del liquido nel pitot, secondo la seguente formula:

$$V = \sqrt{\frac{2g\rho_l \cdot \Delta h}{\rho}}$$

La velocità dell'aria in ingresso è stata misurata attraverso la predisposizione sul collettore di un condotto a sezione rettangolare, di altezza 2,70 m, larghezza 0,5 m e

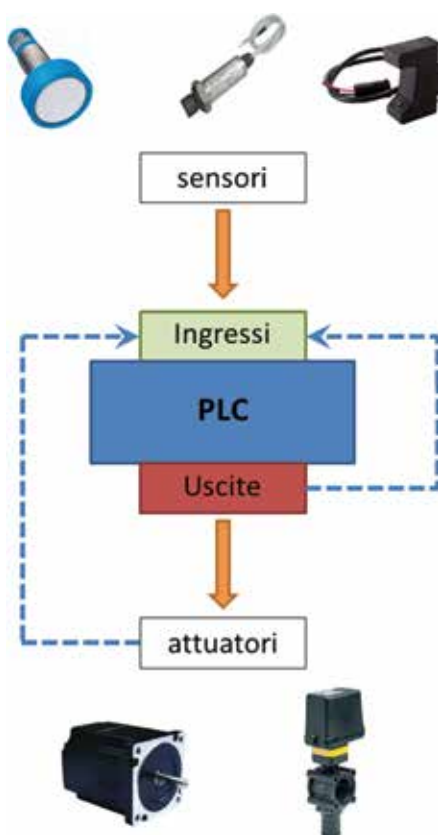


Fig. 4.11 Principio di funzionamento di un plc.

profondità 0,2 m (**Fig. 4.15**). Tale struttura ha la funzione di rendere il flusso di aria in ingresso di tipo laminare. La misurazione è stata effettuata mediante un anemometro a filo caldo (**Fig. 4.16**), posizionando il sensore in otto punti di campionamento alla metà del condotto, individuati dividendo la sezione in aree omogenee.

La portata in ingresso Q_{in} è stata calcolata moltiplicando il valore della velocità media rilevata negli otto punti di campionamento, per l'area della sezione del condotto.

Inoltre, si è proceduto alla valutazione della variazione di potenza assorbita dal motore, in funzione della apertura/chiusura della valvola in ingresso. A tal fine è stato allestito un sistema di monitoraggio (**Fig. 4.17**):

- torsionmetro sulla P.d.p.;
- Data logger con frequenza di campionamento di 100 Hz;
- Pc per acquisizione e memorizzazione dei dati.

Tali rilievi sono stati eseguiti in contemporanea alla misurazione della velocità dell'aria in ingresso precedentemente descritta.

Infine la macchina è stata testata in due differenti scenari colturali: oliveto ad alta intensità e frutteto (pereto). In particolare, il primo test è stato condotto in un oliveto in fase di allevamento caratterizzato da piante omogenee in termini di sviluppo vegetativo e da un limitato numero di fallanze. Il secondo test è stato effettuato in un pereto in pieno sviluppo allevato a palmetta.

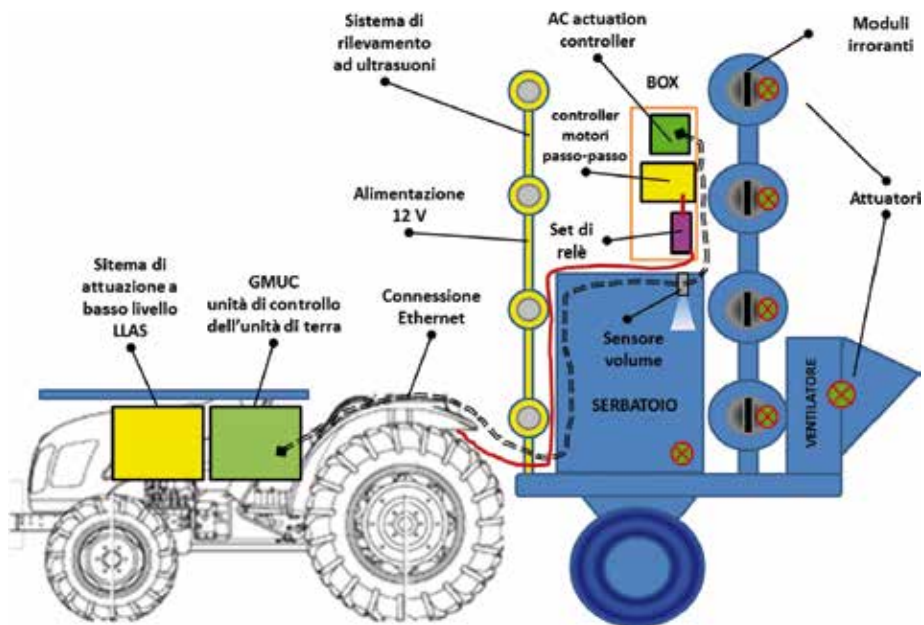


Fig. 4.12 Architettura del LLAS per la spray unit.

4.3 Risultati

Da un punto di vista generale le soluzioni sviluppate dall'unità di ricerca hanno consentito di raggiungere gli obiettivi prefissati dal progetto ovvero la ottimizzazione della distribuzione dei prodotti antiparassitari. La irroratrice RHEA presenta una elevata versatilità di utilizzi e ampi margini di sviluppo poiché i sistemi di attuazione ed i settaggi operativi sono completamente configurabili in funzione dello scenario operativo. Infatti, risulta possibile accoppiare la irroratrice ad un comune trattore e mediante un PC settare gli attuatori e le relative istruzioni di azionamento in funzione delle caratteristiche del bersaglio.

Per quanto concerne la caratterizzazione delle portate d'aria nei differenti moduli di irrorazione, i risultati sono riportati in tabella 4.2, in prima e seconda marcia, per ciascun modulo nelle cinque posizioni della valvola (**Tab. 4.1**).

I dati elaborati sono stati riportati nel grafico riassuntivo in figura 4.18, che pone in relazione i seguenti parametri: portata dell'aria in ingresso, potenza assorbita dalla motrice e coppia, in prima e seconda marcia. Dal confronto dei risultati ottenuti si evince che la potenza assorbita, relativamente alla seconda marcia, raggiunge valori di circa 30 kW. Tali richieste di potenze sono incompatibili con le specifiche della motrice impiegata nel progetto RHEA, per cui risulta necessario operare in prima marcia. Tuttavia è da rilevare che con entrambe le velocità operative, passando dalla condizione di completa apertura della valvola in ingresso (90°-1) alla chiusura, si ottiene una riduzione della potenza assorbita di circa il 50%.

I dati relativi alle misurazioni sono stati utilizzati per regolare il corretto posizionamento della valvola principale. La taratura consente di ottenere una proporzionalità tra posizione associata alla valvola e volume effettivo. Dalla configurazione iniziale ipotizzata, riportata in tabella 1, i parametri sono stati corretti sulla base dei valori di portata in uscita effettivamente rilevati nelle precedenti prove. Di seguito sono riportati i dati ottenuti (**Tab. 4.3**):

Una parte essenziale della macchina irroratrice è il sistema di percezione. Come

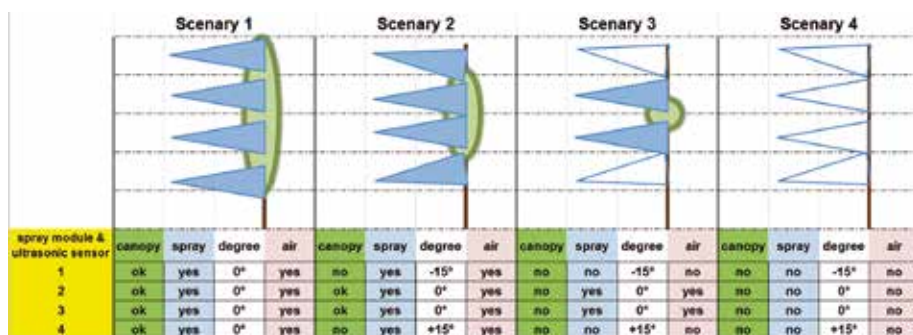
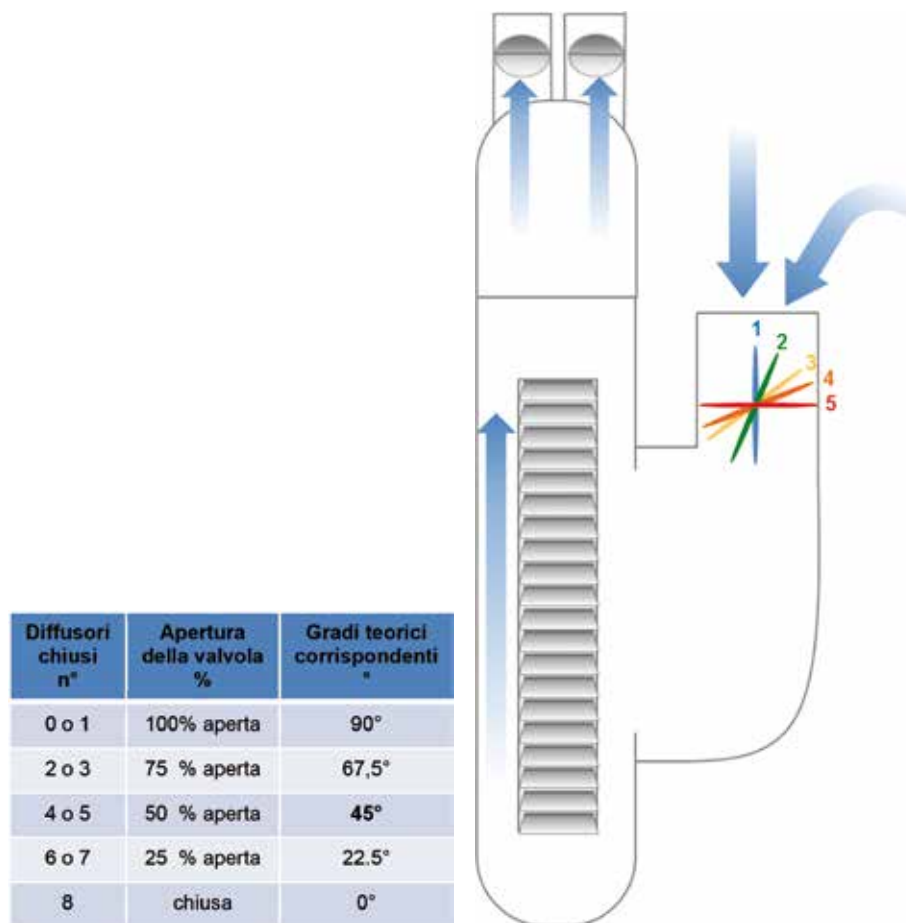


Fig. 4.13 Regole per la definizione della direzione dei moduli irroranti.

descritto precedentemente, tale sistema basato su sensori ad ultrasuoni rileva gli input provenienti dalla chioma bersaglio e trasferisce le informazioni al AC. Allo scopo di verificarne l'attendibilità sono stati condotti inizialmente dei controlli visivi in fase operativa e successivamente mediante analisi video (**Fig. 4.19**), per valutare la corrispondenza temporale tra il rilevamento del target e l'avvio/arresto dell'irrorazione, all'inizio, durante e alla fine di ogni filare. A tal fine, sono stati realizzati clip video posizionando delle videocamere in punti specifici caratterizzati da variazioni di volume del bersaglio.

Dalla analisi del materiale prodotto si evidenzia una corretta e tempestiva risposta della irroratrice al variare delle caratteristiche della spalliera: la macchina inizia a spruzzare correttamente, circa 100 mm prima dell'effettivo inizio della chioma, nelle fasi di transizione da pianta a pianta o da fallanza a pianta successiva, la macchina rileva la presenza/assenza della vegetazione "bersaglio" e, conseguentemente, attiva



Tab. 4.1 Posizionamenti della valvola a farfalla posta sul collettore.

e disattiva i parametri operativi in tempo reale. Infine, al termine del filare il vettore aria e la irrorazione di miscela vengono arrestati tempestivamente.

Il RHEA robot è stato, infine, testato nella dimostrazione finale prevista dal progetto e successivamente in un frutteto in Emilia Romagna. I risultati preliminari ottenuti sono di seguito riassunti:

risparmio di prodotto fitosanitario pari al 48%,

qualità di copertura ottenuta sulle foglie uguale a quella rilevabile con un trattamento convenzionale.

Il risparmio di prodotto pari al 48% ottenuto nell'oliveto sperimentale di Madrid, caratterizzato da elevata omogeneità delle piante, presuppone negli impianti convenzionali livelli raggiungibili ancor più elevati. Inoltre, dobbiamo considerare i benefici indiretti che si raggiungono attraverso questo sistema di irrorazione sperimentato, ovvero: una riduzione del 50% di prodotto chimico disperso, abbattimento degli impatti delle operazioni di difesa sull'ambiente, riduzione dei costi per l'acquisto di pesticidi, impianti più facilmente controllabili con maggiore tempestività d'intervento.



Fig. 4.14 Sistema di analisi della portata realizzato mediante Pitot inseriti nelle tubazioni e visualizzatore della portata di aria in uscita.

4.4 Considerazioni conclusive

La diffusione della gestione robotizzata ed a rateo variabile delle operazioni colturali sta lentamente espandendosi in agricoltura. Tre sono i fattori che rendono interessante tale prospettiva: il progressivo abbassamento dei costi delle nuove tecnologie; la sempre maggiore evoluzione del livello di know-how degli operatori verso queste nuove tecnologie; la rilevante riduzione dei prodotti fitosanitari impiegati. Il sistema di irrorazione, RHEA robot, per il trattamento di precisione delle colture arboree, rappresenta un unico innovativo sistema integrato che comprende tutti i suggerimenti derivati da ricerche avanzate. L'intero modulo robot irrorante presenta controlli di tipo remoto e prossimale; i primi per gestire il trattore, i secondi per controllare l'irroratrice. Tale scelta ha un duplice scopo ovvero di avere un modulo di irrorazione innovativo che può essere utilizzato e testato sia come operatrice di un sistema robotizzato oppure come macchina autonoma accoppiabile a trattori ordinari.



Fig. 4.15 Campionamento in otto punti della sezione del condotto per la determinazione della velocità dell'aria in entrata.



Fig. 4.16 Anemometro a filo caldo impiegato per la misurazione della velocità del flusso di aria.

La configurazione realizzata prevede 8 diverse bande verticali di trattamento indipendenti, con controlli separati di dose applicata, direzione e velocità del flusso d'aria. Consiste in 30 dispositivi di controllo (8 valvole a farfalla sui convogliatori d'aria, 1 valvola a farfalla principale del collettore di aspirazione del ventilatore, 4 attuatori per il controllo superiore e inferiore dell'inclinazione dei diffusori; 16 valvole a solenoide, 1 valvola di pressione), 8 controller e un PLC, 12 sensori (1 per la velocità di avanzamento; 1 per la pressione di esercizio), 8 sensori ad ultrasuoni, 1 per il livello del serbatoio, 1 per la pressione). Il risultato di tale complessità architettonica si traduce in una elevata versatilità di configurazione che rende la irroratrice RHEA impiegabile in molteplici scenari agricoli.

In un'ottica di sviluppo e in vista di ciò che sta emergendo dalla ricerca, gli 8 sensori ad ultrasuoni potrebbero essere sostituiti da un LIDAR a bordo o da un controllo remoto inviato direttamente dal HLDMS (High Level Decision Making System) che utilizzando il LIDAR sul drone può fornire una mappa 3D in grado di comandare le diverse operazioni dell'irroratrice nelle diverse bande verticali.



Fig. 4.17 Sistema di monitoraggio allestito per la misurazione della correlazione potenza-apertura valvola in ingresso.

100% - 2	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Q out	Q in
m3/h	1041	1057	1060	880	606	1134	1174	1031	7984	8044
75% - 2	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	979	992	986	850	561	1038	1081	966	7453	7474
50% - 2	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	628	561	678	579	362	653	725	653	4840	5011
25% - 2	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	229	281	314	269	162	256	314	303	2128	1774
0% - 2	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	0	140	181	162	162	57	57	162	922	556
100% - 1	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	760	751	777	638	444	818	842	747	5778	5706
75% - 1	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	725	734	725	617	413	769	802	716	5500	5350
50% - 1	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	513	519	538	458	303	538	590	525	3983	3592
25% - 1	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	115	198	229	198	140	162	198	181	1423	1374
0% - 1	sx 1	sx 2	dx 3	dx 2	sx 3	sx 4	dx 4	dx 1	Totale	Q in
m3/h	0	140	162	140	81	81	162	162	929	466

Tab. 4.2 In alto valori di portata con irratrice in seconda marcia, in basso in prima marcia. SX1 bocchetta sinistra in basso, SX4 bocchetta sinistra in alto, DX1 bocchetta destra in basso, DX4 bocchetta destra in alto.

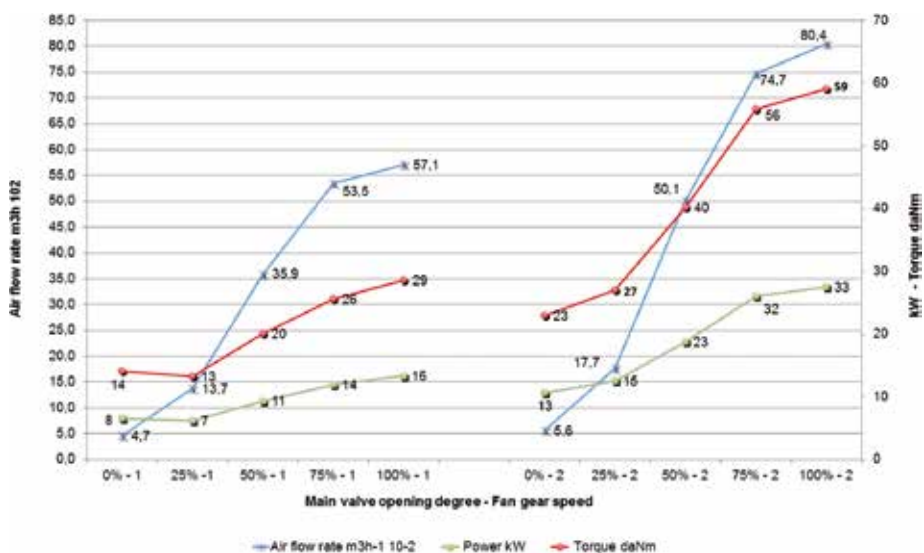


Fig. 4.18 Relazione tra portata dell'aria in ingresso con la potenza assorbita alla p.d.p, in prima e seconda marcia.

Diffusori chiusi n°	Apertura della valvola %	Gradi teorici corrispondenti °	Gradi effettivi dopo calibrazione
0 o 1	100% aperta	90°	90°
2 o 3	75 % aperta	67,5°	45°
4 o 5	50 % aperta	45°	39.5°
6 o 7	25 % aperta	22.5°	25°
8	chiusa	0°	0°

Tab. 4.3 Parametri di inclinazione corretti sulla base dei valori di portata in uscita.



Fig. 4.19 Valutazione del Sistema di rilevamento ad ultrasuoni e verifica della corretta attuazione delle regole operative di irrorazione: (a) l'irroratrice rileva la presenza della pianta sul lato sinistro, compara i segnali in ingresso provenienti dai sensori ad ultrasuoni con le istruzioni programmate nel PLC. In questo caso il volume della chioma è relativamente contenuto quindi i diffusori superiori ed inferiori vengono inclinati, la portata d'aria ridotta e solamente gli ugelli a minore portata vengono attivati. (b) In presenza di fallanze lungo il filare la macchina arresta l'irrorazione.

Bibliografia

- Aber J.S., Marzolf I. and Ries J.B. (2010). *Small-format aerial photography*, 266. Boston: Elsevier.
- Adamchuck V.I. and Jasa P. (2002). On-the-go Vehicle-Based Soil Sensors. University of Nebraska-Lincoln Extension EC02-178. Available at : http://cropwatch.unl.edu/c/document_library/get_file?folderId=506359&name=DLFE-12659.pdf.
- AgLeader Technology (2013). Available at: <http://www.agleader.com/products/directcommand/optrx/>. Accessed 11 April 2013.
- Andrade-Sanchez P., Upadhyaya S.K., Pluffe C. and Poutre B. (2008). Potential use of the UC Davis soil compaction profile sensor (UCD-SCPS) for site-specific tillage applications. In American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting, 2661-2667. Providence, US.
- Andújar D., Escolà A., Dorado J. and Fernández-Quintanilla C. (2011a). Weed discrimination using ultrasonic sensors. *Weed Res.* 51: 543-547.
- Åstrand B. and Baerveldt A.J. (2005). A vision based row-following system for agricultural field machinery. *Mechatronics* 15, 251-269.
- Awange J.L. (2012). Chapter 2: Modernization of GNSS. In *Environmental Monitoring Using GNSS. Global Navigation Satellite System*, 15-21. Berlin: Springer.
- Bakker T., van Asselt K., Bontsema J., Müller J. and van Straten G. (2010). Systematic design of an autonomous platform for robotic weeding. *J. Terramechanics* 47, 63-73.
- Bareth G. and Doluschitz R. (2010). Spatial data handling and management. In: *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*, 205-222. Springer.
- Beeri O. and Peled A. (2009). Geographical model for precise agriculture monitoring with real-time remote sensing. *ISPRS J. Photogramm.* 64: 47-54.
- Brown A.W.A. and Pal R. (1971). Insecticide resistance in arthropods. *World Health Organization Monograph Series* 38. Geneva. Second edition from 1958.
- Cai C. and Gao Y. (2013). GLONASS-based precise point positioning and performance analysis. *Adv. Space Res.* 51: 514-524.

- Chen Y. (2010). Development of an Intelligent Sprayer to Optimize Pesticide Applications in Nurseries and Orchards. Dissertation for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of The Ohio State University.
- Dammer K.H. and Wartenberg G. (2007). Sensor-based weed detection and application of variable herbicide rates in real time. *Crop Prot.* 26: 270-277.
- De Benedetto D., Castrignano A., Diacono M., Rinaldi M., Ruggieri S. and Tamborri-
no R. (2013). Field partition by proximal and remote sensing data fusion. *Biosyst.*
Eng. 114: 372-383.
- Dev Track Solution (2013). Available at: <http://devtrackindia.com/gps.html>.
- Doruchowski G. and Holownicki R. (2000). Environmentally friendly spray techniques for tree crops. *Crop Protection* 19, 617-622.
- Doruchowski G., Swiechowski W., Godin A. and Holownicki R. (2011). Automatically controlled sprayer to implement spray drift reducing application strategies in orchards. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research.* 19, 2011: 175-182.
- Ehlers M. (2007). Chapter 2: Integration taxonomy and uncertainty. In *Integration of GIS and remote sensing*, 17-38. Padstow, Cornwall, Great Britain: TJ International
- Escolà A., Planas S., Rosell J.R., Pomar J., Camp F., Solanellas F., Gracia F., Llorens J. and Gil E. (2011). Performance of an ultrasonic ranging sensor in apple tree canopies. *Sensors* 11: 2459-2477.
- Escolà F., Solanalles F., Planas S. and Rossell J.R. (2002). Electronic control system for proportional spray application to the canopy volume in tree crops. *Proceedings of EurAgEng Conference.* Paper 02-AE-010. Budapest, Hungary.
- Escolà A., Camp F., Solanalles F., Llorens J., Planas S., Rosell J.R., Gràcia F., Gil E. and Val L. (2007). Variable dose rate sprayer prototype for dose adjustment in tree crops according to canopy characteristics measured with ultrasonic and laser LIDAR sensors. *Proceedings ECPA-6th European Conference on Precision Agriculture* pp 563-571.
- Frasconi C., Romeo J., Martelloni L., Fontanelli M., Raffaelli M., Pajares G., Pirchio M. and Peruzzi A. (2014). Calibration and synchronization between WDS and flaming system within the RHEA Project. Accepted to be published in RHEA Conference Proceedings.
- Gerhards R. and Christensen S. (2003). Real-time weed detection, decision making and patch spraying in maize, sugar beet, winter wheat and winter barley. *Weed Res.* 43, 1-8.
- Gibbons Media and Research LLC. (2013). Available at: <http://www.insidegnss.com/node/1811>.
- Gil E., Escolà F., Rosell J.R., Planas S. and Val.L. (2006). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. *Crop Protection* 26, 1287-1297.

- Gomes J.F.S. and Leta F.R. (2012). Applications of computer vision techniques in the agriculture and food industry: a review. *Eur. Food Res. Technol.* 235 (6): 989-1000.
- Gonzalez-de-Santos P., Vieri M., Ribeiro A., Raffaelli M., Emmi L., Fontanelli M., Rimediotti M., Frasconi C., Sarri D. and Peruzzi A. (2011). The RHEA project: a fleet of autonomous robots for precision chemical and non chemical weed management in arable crops and on-canopy spraying in tree crops. *Proceeding Convegno di Medio Termine dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Belgirate, 22-24 settembre 2011.*
- Grewal M.S., Andrews A.P. and Bartone C.G. (2013). Chapter 1: Introduction. In *Global Navigation Satellite System, Inertial Navigation, and Integration*, 1-32. New Jersey, US: John Wiley & Sons, Inc.
- Griepentrog H.W., Nørremark M., Nielsen H. and Blackmore B.S. (2005). Seed mapping of sugar beet. *Precis. Agric.* (6): 157-165.
- Griepentrog H.W., Ruckelshausen A., Jørgensen R.N. and Lund I. (2010). Chapter 20: Autonomous systems for plant protection. In *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*, 323-334. Springer.
- Grinderud K., Rasmussen H., Nilsen S., Lillethun A., Holten A. and Sanderud Ø. (2009). Chapter 1: Application. In *GIS. The geographic language of our age*, 10-31. Trondheim, Norway: Tapir Academic Press.
- Grisso R., Alley M. and Groover. G. (2009a). Precision Farming Tools: GPS Navigation. In *Virginia Cooperative Extension, publication 442-501. Arlington, US.*
- Grisso R., Alley M. and Heatwole C. (2009b). Precision Farming Tools: Global Positioning System (GPS). In *Virginia Cooperative Extension, publication 442-503. Arlington, US.*
- Grisso R., Alley M., McClellan P., Brann D. and Donohue S. (2009c). Precision Farming: a Comprehensive Approach. In *Virginia Cooperative Extension, publication 442-400. Arlington, US.*
- Grisso R., Alley M., Thomason W., Holshouser D. and Roberson G.T. (2011). Precision Farming Tools: Variable-Rate Application. In *Virginia Cooperative Extension, publication 442-505. Arlington, US.*
- Gutjahr C. and Gerhards R. (2010). Chapter 14: Decision Rules for site-specific weed management. In *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*, pp. 223-239. Springer.
- Hardin P.J. and Jensen R.R. (2011). Small-scale unmanned aerial vehicles in environmental remote sensing: Challenges and opportunities. *GISci. Remote Sens.* 48(1): 99-111.
- Harper N. (2010). Chapter 1: Introduction. In *Server-Side GPS and Assisted-GPS in Java*, 1-15. Norwood, MA: Artech House.

- Harvey B. (2007). Chapter 4: Military Programs. In *The Rebirth of the Russian Space Program: 50 Years After Sputnik*, New Frontiers, 105-138. Germany: Springer.
- Hočevar M., Sirok B., Jeicic V., Godesa M., Lesnik M. and Stainko D. (2010). Design testing of an automated system for targeted spraying in orchards. *Journ. Of Plant Diseases and protection* 117(2) 71-79.
- Hofmann-Wellenof B., Lichtenegger H. and Wasle E. (2008). Chapter 1: Introduction. In *GNSS Global Navigation Satellite System. GPS, GLONASS, GALILEO & more*, 1-11. Wien, Austria: SpringerWienNewYork.
- Holownicki R., Doruchowski G., Godyn A. and Swiechowski W. (2000). Effects of air jet adjustment on spray losses in orchards. *Aspects of Applied Biology* 57 Pesticide Application, 293-300.
- Inman D., Khosla R., Reich R. and Westfall D.G. (2008). Normalized difference vegetation index and soil color-based management zones in irrigated maize. *Agron. J.* 100: 60-66.
- Jeon H.Y., Zhu H., Derksen R., Ozkan E. and Krause C. (2011). Evaluation of ultrasonic sensor for variable-rate spray application. *Computers and electronics in Agriculture* 75, 213-221.
- Ji B., Zhu W., Liu B., Ma C. and Li X. (2009). Review of recent machine-vision technologies in agriculture. In *Proceedings of the second international symposium on knowledge acquisition and modeling*, 330-334. Wuhan, China.
- Kim H., Sudduth K.A. and Hummel J.W. (2009). Soil macronutrient sensing for precision agriculture. *J. Environ. Monit.* 11: 1810-1824.
- Koch H. and Weisser P. (2000). Sensor equipped orchard spraying efficacy, saving and drift reduction. *Aspects of Applied Biology* 57, 357-362.
- Kuman S. (2005). *Basics of remote sensing and GIS*. Laxmi Publications.
- Laliberte A.S. and Rango A. (2011). Image processing and classification procedures for analysis of subdecimeter imagery acquired with an unmanned aircraft over arid rangelands. *GISci. Remote Sens.* 48: 4-23.
- Llorens J., Gil E., Llop J. and Escolà F. (2010). Variable rate dosing in precision viticulture. Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Protection* 29 (3), 239-248.
- Llorens J., Gil E., Llop J. and Meritzell Q. (2011). Georeferenced LIDAR 3D vine plantation map generation. *Sensors* 11, 6237-6256.
- Mebatsion H.K., Paliwal J. and Jayas D.S. (2013). Automatic classification of non-touching cereal grains in digital images using limited morphological and color features. *Comput. Electron. Agr.* 90: 99-105.

Bibliografia

- Mesev V. and Walrath A. (2007). Chapter 1: GIS and remote sensing integration: in search of definition. In *Integration of GIS and remote sensing*, 1-13. Padstow, Cornwall, Great Britain: TJ International
- Mohammadzamani D., Minaei S., Alimandari R et al. (2009). Variable rate herbicide application using the global positioning system for generating a digital management map. *Int. J. Agric. Biol.* 11: 178-182.
- Moorthy I., Miller J., Hu B., Chen J. and Li Q. (2008). Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data. *Can. J. Rem. Sens.*, 34, 320-332.
- Moorthy I., Miller J.R., Berni J.A.J, Zaro-tejada P., Hu B. and Chen J. (2011). Field characterization in Olive (*Olea Europaea L.*): tree crown architecture using terrestrial laser scanner data. *Agric.Forest Meteorol.* 151, 204-214.
- Norac. (2013). Available at: <http://www.norac.ca/products>.
- Palacin J., Palleia T., Tresanchez M., Sanz R., Llorenz J., Ribes-Dasi M. Masip J., Arnò J., Escolà A. and Rossel J.R. (2007). Real time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 56, 1377-1383.
- Peets S., Mouazen A.M., Blackburn K., Kuang B. and Wiebensohn J. (2012). Methods and procedures for automatic collection and management of data acquired from on-the-go sensors with application to on-the-go soil sensors. *Comput. Electron. Agr.* 81: 104-112.
- Pegher G., Balsari P., Cerruto E. and Vieri M. (2002). The relationship between vertical spray pattern from air assisted sprayers and foliar deposit in vine canopies. *Aspects of Applied Biology* 66, International Advances in Pesticide Application.
- Pérez-Ruiz M. and Upadhyaya S.K. (2012). Chapter 1: GNSS in Precision Agricultural Operations In *New approaches of indoor and outdoor localization systems*, 3-26. Intech.
- Pérez-Ruiz M., Aguera J., Gil J.A., Slaughter D.C. (2011). Optimisation of agrochemical application in olive groves based on positioning sensors. *Precision Agriculture* 12, 564-575.
- Raisgl U. and Felber H. (1991). Comparison of different mist blower and volume rates for orchard spraying. *B C P C Mono n. 4 6 Air Assisted Spraying in Crop Protection*.
- Rao G.S. (2010). *Global Navigation Satellite System: with essential of satellite communications*. New Delhi: McGraw Hill Education Pvt Ltd.
- Reshetnev Company (2012). *Glomass Worldwide. Information Satellite System* 14: 5-29.
- RHEA Project (2014). <http://www.rhea-project.eu/>.
- Rizos C. (2010). Chapter 15: GPS, GNSS and the future. In *Manual of Geospatial Science and Technology*. Second Edition, 260-279. US: CRC Press Taylor & Francis Group.

- Robertson M. J., Llewellyn R. S., Mandel R., Lawes R., Bramley R. G. V., Swift L., et al. (2012). Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: status, issues and prospects. *Precision Agric.* 13(2): 181-199.
- Samborski S.M., Tremblay N. and Fallon E. (2009). Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agron. J.* 101(4): 800-816.
- Sanz-Cortiella R., Llorenz-Calveras J., Escolà A., Arnò-Satorra J., Ribes-Dasi M., Masp-Vilaalta J., Camp F., Gràcia-Aguilla F., Solanalles-Batlle F., Planas-DeMarti S., Pallejà-Cabré T., Palcin-Roca J., Gregorio-Lopez E., Del-Moral-Martinez I. and Rosell-Polo J.R. (2011). Innovative LIDAR 3D dynamic measurement system to estimate fruit-tree leaf area. *Sensors.* 11, 5769-5791.
- Sarkate R.S., Kalyankar N.V. and Khanale P.B. (2013). Application of computer vision and color image segmentation for yield prediction precision. In *International Conference on Information Systems and Computer Networks*, 9-13. Mathura, India.
- Scheller F. and Schubert F. (1992). Chapter 2: Physicochemical, biochemical and technological fundamentals of biosensors. In *Biosensors*, 7-82. Amsterdam, Netherlands. Elsevier Science Publishers B.V.
- Schmidt K. and Koch H. (1995). Adjustment of airblast sprayer and distribution of pesticide deposits in orchard. *Nachrichtenblatt des Deutesches Pflanzenschutzdienstes* 47, 161-167.
- Schott J.R. (2007). Chapter 1: Introduction. In *Remote sensing. The image chain approach*, 1-21. New York: Oxford University Press.
- Slaughter D.C., Giles D.K. and Downey D. (2008). Autonomous robotic weed control: a review. *Comput. Electron. Agr.* 61: 63-78.
- Sökefeld M. (2010). Chapter 21: Variable Rate Technology for herbicide application. In *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*, 335-347. Springer.
- Solanalles F., Escolà A., Planas S., Rossell Jr., Camp F. and Gràcia F. (2006). An electronic control system for pesticide application proportional to the canopy width of tree crops. *Biosystem Engineering* 95(4). 473-481.
- Sonka M., Hlavac V. and Boyle R. (2008). In *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Cengage Learning.
- Srinivasan A. (2006). Chapter 2: The role of technology in the emergence and current status of precision agriculture. In *Handbook of precision agriculture. Principle and application*, 19-45. Binghamton: Haworth Press.
- Swain K.C., Jayasuriya H.P.W. and Salokhe V.M. (2007). Suitability of low-altitude remote sensing images for estimating nitrogen treatment variations in rice cropping for precision agriculture adoption. *J. Appl. Remote Sens.* 1(1): 013547.

- Tey Y.S. and Brindal M. (2012). Factors influencing the adoption of precision agriculture technologies: a review for policy implications. *Precision Agric.* 13(6): 713-730.
- Tillett N.D., Hague T., Grundy A.C. and Dedousis A.P. (2008). Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Precision Agric.* 99: 171-178.
- Tillett N.D. and Hague T. (2006). Increasing work rate in vision guided precision banded operations. *Biosyst. Eng.* 94(4): 487-494.
- Tolman B.W., Kerckhoff A., Rainwater D., Munton D. and Banks J. (2010). Absolute precise kinematic positioning with GPS and GLONASS. In *Proc. ION GNSS 2010*, 2565-2576. Portland, Oregon.
- Tombo S.D., Salayani M., Whitney J.D., Wheaton T.A. and Miller W.M. (2002). Investigation of laser and ultrasonic ranging sensors for measurement of citrus canopy volume. *Applied Engineering in Agriculture* 18 (3), 367-372.
- Torez (2009). Uncertainty and investment in precision agriculture – is it worth the money? *Agric Syst* 100: 80-87.
- Vieri M. and Spugnoli P. (1990). An automatic dosing system for sprayers. *Atti AgEng International Conference*. Berlino, 24-27 ottobre 1990. Poster e paper n°4/12.
- Vieri M. and Cioni A. (1993). A software for periodical control of sprayers. *Proceedings C.I.G.R. "Models, Computer Program And Expert Systems For Agricultural Mechanization"*. Firenze, 1-2 ottobre 1993.
- Vieri M. and Spugnoli P. (1996). Containing evaporation losses in pesticide application: mistblower set-up related to threshold meteorological conditions in Mediterranean Areas. *Proceedings International Conference on Agricultural Engineering - AgEng 96 Madrid* 23-26 sept.1996 pg.299.
- Vieri M. and Spugnoli P. (1997). An high pressure injection system for precision application of pesticide. *BIOS Scientific Publishers Limited*, Oxford 1997.
- Vieri M., Venturi A. and Michelucci S. (1998). A Software Procedure to Control Spray and Airblast Set-up of Orchard and Pest Control Sprayers. *International Conference "AgEng'98"* Oslo 24-27 agosto 1998.
- Vieri M., Guidi S. and Tiribilli B. (1998). Spray distribution Control in Orchard Sprayers: Tests on New Apparatus Equipped with a Laser Detector. *International Conference "AgEng'98"* Oslo 24-27 agosto 1998.
- Vieri M. and Spugnoli P. (1998). Operational Risk Assessment of sprayers by hazard using multicriterion analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 71, 405-414.
- Vieri M. and Giorgetti R. (2002). Results of the comparative efficiency distribution trial on two sprayers (conventional GEO-diffuser and OKTOPUS-spraying modules) using different settings. *Adv.Hort.Sci*, XV, 2001, 1-9.

- Vieri M. (2003). Spray airjet characterisation by impulse measurement. 7th Workshop on "Spray application techniques in fruit growing". Cuneo 25-27 June 2003. 149-156
- Vieri M. and Sarri D. (2010). Criteria for introducing mechanical operation of oil olives: results of a five year project in Central Italy. *Advances in Horticultural Sciences*. 2010. 24(1): 78-90
- Vilde A., Lapins D., Dinaburga G., Cesnieks S. and Valainis O. (2012). Investigations in precise agriculture: results, problems, perspective development. *Engineering for Rural Development* 11: 74-80.
- Viscarra Rossel R.A., Adamchuk V.A., Sudduth K.A., McKenzie N.J. and Lobsey C. (2011). Proximal Soil Sensing. An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. *Adv. Agron.* 113: 237-282.
- Voss K, Franke J., Mewes T., Menz G. and Kühbauch W. (2010). Chapter 7: Remote sensing for precision crop protection – A matter of scale. In *Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity*, 101-118. Springer.
- Walklate P., Richardson G., Cross J. and Murray R. (2000). Relation between orchard tree crop structure and performance characteristics of an ari axial fan sprayer. *Aspects of Applied Biology* 57, Pesticide Application, 285-292.
- Walklate P., Cross J., Richardson G., Murray R. and Baker D. (2002). Comparison of different spray volume deposition models using LIDAR measurements of apple orchards. *Biosystem Engineering* 82(3). 253-267.
- Wang L. and Li L. (2010). Chapter 10: Localization in Wireless Sensor Networks. In *RFID and sensor networks: architectures, protocols, security, and integration*, 276-293. New York, US: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Wang N., Zhang N., Wei J., Stoll Q. and Peterson D.E. (2007). A real-time, embedded, weed-detection system for use in wheat fields. *Biosyst. Eng.* 98: 276–285.
- Wei J. and Salyani M. (2004). Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 1. Prototype development. *Trans. ASAE*, 47, 2101-2107.
- Wei J. and Salyani M. (2005). Development of a laser scanner for measuring tree canopy characteristics: Phase 2. Foliage density measurement. *Trans. ASAE*, 48, 1595-1601.
- Weis M., Gutjahr C., Ayala V.R., Gerhards R., Ritter C. and Schölderle F. (2008). Precision farming for weed management: techniques. *Ges. Pflanzen.* 60(4): 171-181.
- Wu X., Xu W., Song Y. and Cai M. (2011). A detection of weed in wheat field on machine vision. *Procedia Engineering* 15, 1998-2003.
- Xiang H. and Tian L. (2011). Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosyst. Eng.* 108(2): 104-113.

Bibliografia

- Xue J., Zhang L. and Grift T.E. (2012). Variable field-of-view machine vision based row guidance of an agricultural robot. *Comput Electron Agr.* 84: 85-91.
- Zhang C. and Kovacs J.M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agric.* 13(6): 693-712.
- Zhang Y., Staab E.S., Slaughter D.C., Giles D.K. and Downey D. (2012). Automated weed control in organic row crops using hyperspectral species identification and thermal micro-dosing. *Crop. Prot.* 41: 96-105.
- Zheng G. and Moskal (2009). L.M. Retrieving leaf area index (LAI) using remote sensing: Theories, methods and sensors. *Sensors*, 9, 2719-2745.
- Zoonar GmbH (2013). Available at: [http://www.zoonar.com/photo/modern-navigation-satellite_3205184.html?lastcmd=search_library&idx=0&search\[results\]=100&search\[sort\]=&search\[order\]=&search\[searchstring\]=Graphics&imgidx=51](http://www.zoonar.com/photo/modern-navigation-satellite_3205184.html?lastcmd=search_library&idx=0&search[results]=100&search[sort]=&search[order]=&search[searchstring]=Graphics&imgidx=51).

**Proceedings of the first International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for agriculture
Applications of automated systems and robotics for crop protection in sustainable precision agriculture (RHEA-2011)**

A cura di: Andrea Peruzzi

In questo volume sono raccolti gli Atti della “first International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for agriculture” tenutasi a Pisa dal 19 al 21 settembre 2012. Lo stato dell’arte in tema di automazione, robotica, strategie ed attrezzature per l’agricoltura di precisione viene dettagliatamente riportato nelle descrizioni dei risultati ottenuti da diversi team scientifici nazionali ed internazionali, impegnati nella ricerca di sistemi in grado di massimizzare la protezione delle colture agrarie, minimizzando l’utilizzo di agrofarmaci grazie all’impiego di tecnologie altamente avanzate (GPS, GIS, sensori, macchine autonome, etc.).

Questi atti costituiscono inoltre parte integrante del progetto RHEA (“Robot Fleets for Highly Effective Agricultural and Forestry Management”), finanziato dall’Unione Europea nell’ambito del Settimo Programma Quadro (FP7-NMP N. 245986). Il progetto RHEA, mediante l’utilizzo di una flotta eterogenea di robot autonomi (aerei e terrestri), equipaggiati con sistemi di percezione e “end-effectors” molto avanzati, dedicati alla protezione colturale, mira ad una drastica riduzione della distribuzione degli agrofarmaci (circa il 75%) rispetto alle condizioni attuali, al miglioramento della qualità dei prodotti, alla tutela dell’ambiente, della salute e della sicurezza di operatori agricoli e consumatori, nonché alla riduzione dei costi di produzione.

Pisa University Press, 2012

Proceedings of the first International Conference on Robotics and associated High-technologies and Equipment for agriculture

Applications of automated systems and robotics for crop protection in sustainable precision agriculture

(RHEA-2011) Pisa, Italy - September 19-21, 2012



Edited by
Andrea Peruzzi



Finito di stampare nel mese di dicembre 2014
da Rotolito Lombarda - Seggiano di Pioltello (MI)
per conto di Pisa University Press

