

Agricoltura di Precisione

COLLANA EDAGRICOLE UNIVERSITÀ & FORMAZIONE

Agricoltura sostenibile [a cura di Michele Pisante]
Microbiologia enologica [a cura di Giovanna Suzzi e Rosanna Tofalo]
Igiene degli alimenti [a cura di Maria Schirone e Pierina Visciano]
L'acqua in agricoltura [a cura di Marcello Mastroianni]
Difesa sostenibile in agricoltura [a cura di Paola Battilani]
Agricoltura di precisione [a cura di Raffaele Casa]
Politica agraria e di sviluppo rurale [a cura di Angelo Frascarelli]
Biotecnologie Sostenibili [a cura di Massimo Galbiati, Alessandra Gentile, Stefano La Malfa, Chiara Tonelli]

DIRETTORE SCIENTIFICO

Michele Pisante

COMITATO SCIENTIFICO

Marco Acutis, Aniello Anastasio, Paolo Balsari, Paola Battilani, Marco Bindi, Raffaele Casa, Luisella Celi,
Riccardo D'Andria, Guido D'Urso, Stefania De Pascale, Rosa Draisci,
Angelo Frascarelli, Dario Frisio, Carlo Grignani, Maria Lodovica Gullino, Paolo Inglese,
Rosalba Lanciotti, Marcello Mastroianni, Fabio Molinari, Giuliano Mosca, Erasmo Neviani,
Michele Perniola, Maria Schirone, Fabio Stagnari, Giovanna Suzzi, Rosanna Tofalo, Chiara Tonelli,
Sandra Torriani, Giovanni Vannacci, Pierina Visciano

Agricoltura di Precisione

Metodi e tecnologie per migliorare
l'efficienza e la sostenibilità dei sistemi colturali

a cura di
Raffaele Casa



1ª edizione: novembre 2016



© Copyright 2016 by «Edagricole - Edizioni Agricole di New Business Media srl»
via Eritrea 21 - 20157 Milano
Redazione: Piazza G. Galilei, 6 - 40123 Bologna - e-mail: libri.edagricole@newbusinessmedia.it

Vendite: tel. 051/6575833; fax 051/6575999 - email: libri.edagricole@newbusinessmedia.it
<http://www.edagricole.it>

5510

Proprietà letteraria riservata - printed in Italy

La riproduzione con qualsiasi processo di duplicazione delle pubblicazioni tutelate dal diritto d'autore è vietata e penalmente perseguibile (art. II della legge 22 aprile 1941, n. 633). Quest'opera è protetta ai sensi della legge sul diritto d'autore e delle Convenzioni internazionali per la protezione del diritto d'autore (Convenzione di Berna, Convenzione di Ginevra). Nessuna parte di questa pubblicazione può quindi essere riprodotta, memorizzata o trasmessa con qualsiasi mezzo e in qualsiasi forma (fotomeccanica, fotocopia, elettronica, ecc.) senza l'autorizzazione scritta dell'editore. In ogni caso di riproduzione abusiva si procederà d'ufficio a norma di legge.

Realizzazione grafica: Emmegi prepress, via F. Confalonieri, 36 – 20124 Milano
Impianti e stampa: Rotolito Lombarda S.p.A. via Sondrio, 3 – 20096 Seggiano di Pioltello (MI)
Finito di stampare nel novembre 2016

ISBN 978-88-506-5510-6

Invito alla lettura

Che cos'è l'agricoltura di precisione, oggi? Quali vantaggi può portare l'applicazione della agricoltura di precisione alle aziende agricole ed al territorio?

Sono questi gli interrogativi cui gli autori danno risposta nel presente volume.

L'agricoltura di precisione è una delle strade che possono realmente portare ad un passo in avanti dell'agricoltura italiana, migliorando l'efficienza dei processi produttivi dal punto di vista tecnico, ambientale, e spesso economico.

Gli autori dimostrano che la contrapposizione tra un'agricoltura che riscopre e valorizza i prodotti ed i sapori tradizionali e quella che è aperta all'utilizzo di nuove tecnologie e che valorizza l'impressionante avanzamento nella gestione dei dati georiferiti è infondata. Anzi è vero il contrario. Le sfide che sul piano agronomico ed ingegneristico fronteggiano le aziende di punta possono essere vinte solo coniugando l'arte del produrre bene ed in modo sano, con quella dell'implementazione di quanto di più avanzato la tecnologia offre all'agricoltura.

A questo volume hanno contribuito i principali esperti sull'agricoltura di precisione presenti in Italia, attivi da anni nella ricerca e sperimentazione in campo, riuscendo a fornire un quadro aggiornato dei principi, metodi ed applicazioni dell'agricoltura di precisione applicata alle produzioni vegetali.

Nella prima parte del volume vengono illustrati gli aspetti alla base dell'agricoltura di precisione, dai sistemi informativi, ai metodi per misurare, comprendere ed analizzare la variabilità spaziale e temporale del suolo e delle colture. Sono trattati metodi e tecnologie che stanno acquistando crescente importanza in agricoltura quale il telerilevamento, la sensoristica, i droni e la robotica, nonché i sistemi di posizionamento e navigazione satellitare e di mappatura delle produzioni colturali. Vengono anche analizzati gli aspetti economici e di modellistica agronomica.

La seconda parte del volume prende in esame le tecniche agronomiche in cui l'agricoltura di precisione può fornire un importante contributo al miglioramento dell'efficienza di gestione dei fattori della produzione: dalle lavorazioni e semina alla fertilizzazione, l'irrigazione e la difesa fitosanitaria delle colture. Chiudono il volume due capitoli in cui vengono illustrati esempi di applicazioni rispettivamente ai sistemi colturali arborei (compresa la viticoltura) ed erbacei.

Il volume è di livello universitario, ma al tempo stesso divulgativo ed accessibile ai tecnici interessati ad aggiornarsi ed approfondire la conoscenza delle nuove forme di moderna agricoltura aperta alle tecnologie più innovative. Si propone dunque come utile strumento per la didattica e la formazione, in una materia che avrà senza dubbio crescente importanza

Invito alla lettura

nella preparazione di tecnici e professionisti in grado di sfruttare al meglio e gestire l'innovazione nei processi produttivi agricoli. È un volume che va a riempire un vuoto, in un momento di grande attenzione per le tematiche dell'agricoltura di precisione. Basti citare il processo avviato dal MiPAAF con la redazione di linee guida ed indirizzi politici di coordinamento, o le opportunità d'introduzione dell'agricoltura di precisione nelle aziende agricole offerte dal PSR.

Va aggiunto poi che il settore dell'agricoltura di precisione è forse quello che oggi maggiormente si presta ad un approccio innovativo e multidisciplinare, ed al confronto sinergico tra le competenze tecnologiche, ingegneristiche ed agronomiche.

L'agricoltura di precisione offre nuove possibilità di costruzione di filiere tecnologiche al servizio della realizzazione delle auspiccate filiere di produzione – qualità – commercializzazione. Il sapere e l'interesse di chi è più esperto nella coltivazione si può integrare più facilmente con quello degli esperti della commercializzazione, se l'agricoltore ha a disposizione tecnologie più sicure che lo guidino nelle scelte tecniche che possono essere automatizzabili. La filiera tecnologica, quale quella che può instaurarsi tra imprenditore agricolo e contoterzista può essere un valido aiuto in tal senso. Per questo lo sviluppo dell'agricoltura di precisione potrebbe aumentare lo spazio per l'agricoltore di dedicarsi alla valorizzazione anche commerciale dei prodotti.

Un merito particolare va al curatore ed agli Autori del volume che, con la propria professionalità, hanno saputo cogliere questa sfida su una materia oggi di grande attualità. Auguriamo infine al lettore di cogliere gli stessi stimoli e motivi di interesse che abbiamo ritrovato nella piacevole lettura di questo volume.

Danilo Monarca

Presidente

Associazione Italiana di Ingegneria Agraria

Carlo Grignani

Presidente

Società Italiana di Agronomia

Gli autori

Gianfranco Airoidi

Dipartimento di Scienze Agrarie Forestali e Alimentari (DISAFA), Università degli Studi di Torino

Paolo Balsari

Dipartimento di Scienze Agrarie Forestali e Alimentari (DISAFA), Università degli Studi di Torino

Bruno Basso

Michigan State University, East Lansing, Michigan (USA)

Mirco Boschetti

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Milano

Gabriele Buttafuoco

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo (ISAFOM), Rende (CS)

Aldo Calcante

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio, Agroenergia (DISAA), Università degli Studi di Milano

Davide Cammarano

James Hutton Institute, Dundee, Gran Bretagna

Raffaele Casa

Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali, Università degli Studi della Tuscia

Fabio Castaldi

Georges Lemaître Centre for Earth and Climate Research, Université Catholique de Louvain (UCL), Louvain-la-Neuve, Belgio

Annamaria Castrignanò

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA), Unità di Ricerca per i Sistemi Colturali degli Ambienti Caldo-aridi, Bari

Alberto Crema

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Milano

Anna Dalla Marta

Dipartimento di Scienze Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA), Università degli Studi di Firenze

Gli autori

Massimiliano De Antoni Migliorati

Queensland University of Technology, Institute for Future Environments, Brisbane, Australia

Daniela De Benedetto

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA),
Unità di Ricerca per i Sistemi Colturali degli Ambienti Caldo-aridi, Bari

Salvatore Filippo Di Gennaro

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biometeorologia (IBIMET), Firenze

Angelo Frascarelli

Dipartimento di Scienze Agrarie Alimentari Ambientali (DSA3), Università degli Studi di Perugia

Massimo Lazzari

Dipartimento di Scienze Veterinarie per la Salute, la Produzione Animale e la Sicurezza Alimentare (VESPA),
Università degli Studi di Milano

Riccardo Lisci

Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF),
Università degli Studi di Firenze

Pasquale Losciale

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA),
Unità di Ricerca per i Sistemi Colturali degli Ambienti Caldo-aridi, Bari

Marco Mancini

Dipartimento di Scienze Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA),
Università degli Studi di Firenze

Luigi Manfrini

Dipartimento di Scienze Agrarie (DipSA), Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Francesco Marinello

Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova

Alessandro Matese

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biometeorologia (IBIMET), Firenze

Fabrizio Mazzetto

Facoltà di Scienze e Tecnologie, Libera Università di Bolzano

Francesco Morari

Dipartimento Agronomia Animali Alimenti Risorse Naturali e Ambiente (DAFNAE),
Università degli Studi di Padova

Daniele Nardi

Dipartimento di Ingegneria Informatica Automatica e Gestionale "A. Ruberti",
Università La Sapienza, Roma

Francesco Nutini

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente (IREA), Milano

Roberto Oberti

Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali - Produzione, Territorio, Agroenergia (DISAA),
Università degli Studi di Milano

Simone Orlandini

Dipartimento di Scienze Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente (DISPAA),
Università degli Studi di Firenze

Simone Pascucci

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologia per l'Analisi Ambientale (IMAA), Potenza

Andrea Pezzuolo

Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova

Stefano Pignatti

Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Metodologia per l'Analisi Ambientale (IMAA), Potenza

Michele Pisante

Facoltà di Bioscienza e tecnologie agro-alimentari e ambientali, Università degli Studi di Teramo

Ciro Potena

Dipartimento di Ingegneria Informatica Automatica e Gestionale "A. Ruberti", Università La Sapienza, Roma

Simone Priori

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA),
Centro di ricerca per l'Agrobiologia e la Pedologia, Firenze

Michael Riedl

Fraunhofer Innovation Engineering Center, Bolzano

Marco Rimediotti

Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF),
Università degli Studi di Firenze

Pasqualina Sacco

Fraunhofer Innovation Engineering Center, Bolzano

Daniele Sarri

Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF),
Università degli Studi di Firenze

Luigi Sartori

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova

Anna Maria Stellacci

Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'Analisi dell'Economia Agraria (CREA),
Unità di Ricerca per i Sistemi Colturali degli Ambienti Caldo-aridi, Bari

Paolo Tarolli

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-forestali (TESAF), Università degli Studi di Padova

Marco Vieri

Dipartimento di Gestione dei Sistemi Agrari, Alimentari e Forestali (GESAAF),
Università degli Studi di Firenze

Massimo Vincini

Centro di Ricerca Analisi GeoSpaziale e Telerilevamento (CRIST),
Università Cattolica del Sacro Cuore, Piacenza

Indice generale

Invito alla lettura	Pag.	V
Gli autori	"	VII
1. Introduzione (Raffaele Casa, Michele Pisante)	"	1
1.1 Definizione ed evoluzione storica dell'Agricoltura di Precisione.....	"	1
1.2 Diffusione dell'Agricoltura di Precisione nel mondo	"	4
1.3 Diffusione dell'Agricoltura di Precisione in Italia	"	5
1.4 Contenuto del presente volume	"	7
Bibliografia	"	7
2 Sistemi informativi aziendali ed agricoltura di precisione (Fabrizio Mazzetto, Michael Riedl, Pasqualina Sacco)	"	9
2.1 Imprese agricole e qualità gestionale	"	9
2.2 Dati, informazioni e decisioni	"	10
2.2.1 Terminologia e definizioni	"	10
2.2.2 I ruoli dell'informazione nell'impresa.....	"	11
2.2.3 Informazione, ambiti decisionali e attività di controllo.....	"	12
2.2.4 Confronti tecnologici con altri settori.....	"	16
2.2.5 L'influenza dei contesti applicativi	"	18
2.3 Informazione e sistemi informativi aziendali (SIA)	"	19
2.3.1 Finalità e funzioni generali.....	"	19
2.3.2 Sistemi operazionali.....	"	20
2.3.3 Sistemi informazionali.....	"	20
2.3.4 I sistemi informativi nelle imprese industriali e agroambientali.....	"	21
2.4 Componenti tecnologici di un sistema informativo	"	23
2.4.1 Classificazione dei componenti tecnologici di un SIA	"	23
2.4.2 Tecnologie meccatroniche	"	24
2.4.2.1 Generalità	"	24
2.4.2.2 Sistemi di identificazione	"	26
2.4.2.3 Sensori e attuatori.....	"	26
2.4.3 Tecnologie di posizionamento.....	"	27
2.4.4 Tecnologie per la comunicazione e il trasferimento dati.....	"	27
2.4.5 Tecnologie informatiche hardware e software.....	"	28
2.5 Proposta di un modello concettuale per i SIA-agr	"	28
2.5.1 Il ciclo di vita dato-informazione	"	28
2.5.2 Modello concettuale per l'informatizzazione aziendale	"	31
2.5.2.1 Schema logico generale	"	31
2.5.2.2 Raccolta dati e monitoraggio	"	31
2.5.2.3 Elaborazione dei dati	"	32
		XI

Indice generale

2.5.2.4. Analisi e valutazione	Pag.	32
2.5.2.5 Utilizzo dei dati	"	33
2.5.3 Applicazioni e relativa complessità tecnologica	"	33
2.5.4 <i>Cloud computing</i> e centri servizi	"	36
2.6 Il ruolo chiave del monitoraggio operativo	"	36
2.6.1 Finalità e definizioni	"	36
2.6.2 Tecnologie e applicazioni	"	38
2.7 Osservazioni conclusive	"	39
Bibliografia	"	40
3. La gestione della variabilità spaziale e temporale nell'agricoltura di precisione.		
Introduzione alla geostatistica (Annamaria Castrignanò, Gabriele Buttafuoco).....	"	43
3.1 La gestione della variabilità nell'agricoltura di precisione.....	"	43
3.2 La natura dei dati spaziali	"	44
3.3 La teoria delle variabili regionalizzate o geostatistica	"	44
3.3.1 L'ipotesi di stazionarietà	"	45
3.3.2 Il variogramma sperimentale	"	45
3.3.3 Modellizzazione del variogramma	"	46
3.3.4 Modelli anisotropici	"	47
3.4 L'interpolazione mediante il <i>kriging</i>	"	48
3.4.1 <i>Kriging</i> a blocchi	"	51
3.4.2 Cross validation	"	52
3.5 Cenni sulla variabilità spazio-temporale.....	"	52
3.6 Introduzione alla geostatistica multivariata ed all'integrazione dei dati (<i>data fusion</i>)	"	55
3.6.1 <i>Cokriging</i>	"	56
3.6.2 <i>Data fusion</i>	"	57
3.6.3 Il problema generale del cambio di supporto	"	58
3.7 Determinazione delle zone omogenee da sottoporre a gestione differenziata mediante la geostatistica	"	59
3.8 Esempio di applicazione della geostatistica in AP	"	61
3.9 Software e risorse bibliografiche per la geostatistica.....	"	65
Bibliografia	"	65
4. Il telerilevamento in agricoltura di precisione (Raffaele Casa, Stefano Pignatti, Simone Pascucci, Fabio Castaldi, Massimo Vincini)	"	69
4.1 Introduzione	"	69
4.2 Principi fisici e tecnologici del telerilevamento	"	69
4.2.1 La radiazione elettromagnetica	"	69
4.2.2 Il telerilevamento nel dominio ottico	"	71
4.2.2.1 L'osservazione della fluorescenza	"	74
4.2.2.2 Il lidar	"	76
4.2.3 Il telerilevamento nell'infrarosso termico.....	"	76
4.2.4 Il telerilevamento nel dominio delle microonde	"	78
4.3 Piattaforme satellitari attualmente esistenti adatte all'agricoltura di precisione.....	"	80
4.4 Applicazione del telerilevamento al monitoraggio delle colture agrarie	"	83
4.4.1 Monitoraggio della vegetazione nel dominio ottico	"	83
4.4.1.1 Indici di vegetazione	"	85
4.4.1.2 Stima di variabili biofisiche con modelli fisicamente basati	"	91
4.4.2 Monitoraggio della vegetazione tramite la fluorescenza.....	"	91
4.4.3 Monitoraggio della vegetazione nell'infrarosso termico	"	92
4.4.4 Monitoraggio della vegetazione nel dominio delle microonde	"	94
4.5 Applicazione del telerilevamento al monitoraggio del suolo agrario	"	95
4.5.1 Dominio ottico (multispettrale ed iperspettrale) ed infrarosso	"	95
4.5.2 Dominio microonde	"	98
4.6 Catena di elaborazione dei dati satellitari ottici, incertezza, errori e qualità del dato	"	98

4.6.1	Calibrazione radiometrica	Pag. 99
4.6.2	Correzione atmosferica	" 101
4.6.3	Correzione geometrica	" 102
4.6.4	Riduzione del rumore	" 103
Bibliografia	.....	" 105
5.	Piattaforme a controllo remoto e robotiche per il monitoraggio e la gestione delle colture (Alessandro Matese, Salvatore Filippo Di Gennaro, Daniele Nardi, Ciro Potena)	" 109
5.1	Innovazione in agricoltura di precisione: lo sviluppo di droni e robotica	" 109
5.2	Sistemi aerei a pilotaggio remoto (SAPR)	" 111
5.2.1	Tipologie dei sistemi	" 111
5.2.2	Sensori	" 112
5.2.2.1	Visibile	" 113
5.2.2.2	Multispettrale e iperspettrale	" 114
5.2.2.3	Termico	" 115
5.2.2.4	Lidar	" 116
5.2.3	Sequenza delle operazioni di rilievo da SAPR	" 118
5.2.3.1	Pianificazione del volo	" 118
5.2.3.2	Esecuzione del volo ed acquisizione dei dati	" 119
5.2.3.3	Calibrazione radiometrica, correzione atmosferica e geometrica	" 120
5.2.3.4	Mosaicatura e georeferenziazione	" 121
5.2.3.5	Elaborazione immagini	" 121
5.2.4	Normativa sull'uso dei SAPR in agricoltura	" 122
5.3	Sistemi a controllo remoto e robotici terrestri	" 123
5.3.1	Caratteristiche dei sistemi robotizzati	" 123
5.3.2	Analisi <i>on-board</i> dei dati provenienti dai sensori	" 124
5.3.3	Uno sguardo al futuro	" 124
Bibliografia	.....	" 126
6.	Sensori e metodi per rilievi prossimali delle proprietà del suolo e della coltura (Simone Priori, Daniela De Benedetto, Anna Maria Stellacci, Pasquale Losciale, Luigi Manfrini).....	" 129
6.1	Introduzione	" 129
6.2	Cartografare la variabilità dei suoli ad alto dettaglio	" 129
6.2.1	Le esigenze di una cartografia pedologica di alto dettaglio	" 129
6.2.2	Sensori prossimali geofisici.....	" 130
6.2.2.1	Sensori ad induzione elettromagnetica	" 131
6.2.2.2	Georesistivimetri mobili.....	" 133
6.2.2.3	Georadar.....	133
6.2.3	Sensori prossimali basati sulla spettroradiometria	" 137
6.2.3.1	Spettrometri di raggi-gamma	" 137
6.2.3.2	Spettrometri di riflettanza Vis-NIR	" 137
6.3	Monitorare la variabilità delle colture ad alto dettaglio	" 141
6.3.1	Caratteristiche della vegetazione monitorabili tramite sensori prossimali	" 141
6.3.2	Impiego di spettrometri Vis-NIR e fluorimetri per la caratterizzazione dello stato della vegetazione	" 143
6.3.3	Classificazione dei sensori radiometrici e loro applicazioni.....	" 143
6.3.4	Sensori per il monitoraggio dei frutti.....	" 147
6.4	Reti di monitoraggio	" 149
6.4.1	Introduzione.....	" 149
6.4.2	Struttura di una rete di monitoraggio.....	" 150
6.4.3	Sensori per il monitoraggio microclimatico e della pianta	" 151

Indice generale

6.4.4	Sensori dell'umidità del suolo	Pag. 152
Bibliografia	.....	" 153
7.	Sistemi di posizionamento globale e sistemi di guida delle macchine agricole (Aldo Calcante, Massimo Lazzari, Luigi Sartori)	" 157
7.1.	Introduzione	" 157
7.2.	I sistemi di posizionamento satellitare (GNSS) e il loro funzionamento	" 157
7.2.1	Le costellazioni	" 157
7.2.1.1	Glionass	" 157
7.2.1.2	Galileo	" 158
7.2.1.3	Compass	" 158
7.2.1.4	Navstar-GPS	" 158
7.2.2	Modalità di funzionamento del GNSS e trilaterazione	" 159
7.2.2.1	La trilaterazione	" 160
7.2.3	Cause di errore del segnale.....	" 160
7.2.4	Proprietà del segnale.....	" 161
7.2.5	Tipi di correzione non differenziale del segnale	" 162
7.2.6	Tipi di correzione differenziale	" 163
7.2.6.1	dGPS con correzione via ponte satellitare	" 164
7.2.6.2	RTK monobase e Network.....	" 164
7.2.7	Il GPS in agricoltura e criteri di scelta di un GNSS	" 164
7.3	I sistemi di guida applicati alle macchine agricole	" 166
7.3.1	Modalità di funzionamento e tipologie	" 166
7.3.1.1	Guida assistita.....	" 168
7.3.1.2	Guida semi-automatica.....	" 168
7.3.1.3	Guida automatica (V2V e autonoma).....	" 169
7.3.1.4	Sistemi di navigazione che non usano il GNSS	" 170
7.3.2	Correzione della posizione in pendenza.....	" 170
7.3.3	Correzione della posizione delle macchine operatrici rispetto al trattore.....	" 171
7.3.4	Configurazioni possibili e criteri di scelta	" 172
7.4	Meccanizzazione di precisione	" 172
7.4.1	Possibilità di automazione offerte dal protocollo ISOBUS	" 172
7.4.2	Controllo diretto delle operatrici basato su GNSS	" 174
7.4.2.1	Lavorazioni del terreno	" 176
7.4.2.2	Semina	" 176
7.4.2.3	Trattamenti.....	" 177
7.4.2.4	Fertilizzazione minerale ed organica	" 178
7.4.2.5	Trapianto	" 178
Bibliografia	.....	" 180
8.	I sistemi di mappatura delle produzioni (Massimo Lazzari, Aldo Calcante, Luigi Sartori, Roberto Oberti).....	" 181
8.1	Introduzione	" 181
8.2	La mappatura delle produzioni per i cereali.....	" 181
8.2.1	Funzionamento	" 182
8.2.2	I sensori nella mietitrebbiatrice.....	" 183
8.2.2.1	Sensori di flusso	" 183
8.2.2.2	Sensori di densità	" 185
8.2.2.3	Sensori di umidità	" 185
8.2.2.4	Sensori di misura delle prestazioni della barra	" 185
8.2.2.5	Sensori di qualità della granella	" 186
8.2.3	Procedura per una buona mappatura.....	" 187
8.2.3.1	Calibrazione dei sensori.....	" 187
8.2.3.2	Altre problematiche.....	" 188
8.2.3.3	Gestione dei dati	" 189

8.3	La mappatura delle produzioni per altre colture di pieno campo	Pag. 191
8.3.1	Colture foraggere	" 191
8.3.1.1	Sistemi di mappatura per imballatrici e rimorchi	" 191
8.3.1.2	Sistemi di mappatura per falciatrici e falciacondizionatrici.....	" 192
8.3.1.3	Sistemi di mappatura per trincia-caricatrici	" 192
8.3.2	Radici, tuberi e bacche	" 194
8.3.3	Uva.....	" 195
8.3.4	Colture arboree	" 196
8.4	La raccolta selettiva	" 197
8.5	Utilità delle mappe di produzione.....	" 198
	Bibliografia	" 198
9.	Modelli di simulazione in agricoltura di precisione (Bruno Basso, Massimiliano De Antoni Migliorati, Davide Cammarano)	" 201
9.1	Introduzione	" 201
9.2	Modelli di simulazione: tecniche di utilizzo e potenzialità	" 203
9.3	Applicazione dei modelli di simulazione nell'agricoltura di precisione e nel supporto alle decisioni.....	" 206
9.4	Considerazioni e prospettive future	" 211
	Bibliografia	" 212
10.	Valutazione economica dell'agricoltura di precisione (Angelo Frascarelli).....	" 213
10.1	Introduzione	" 213
10.2	Gli effetti sul capitale fisso.....	" 213
10.2.1	Il capitale macchine	" 213
10.2.2	Il costo d'uso delle macchine	" 215
10.3	Gli effetti sul capitale circolante	" 216
10.3.1	I capitali circolanti.....	" 217
10.3.2	I costi variabili	" 217
10.4	Gli effetti sul lavoro	" 218
10.4.1	Il costo del lavoro	" 218
10.4.2	La professionalità.....	" 218
10.5	Gli effetti sui ricavi.....	" 219
10.6	Il conto economico.....	" 219
10.7	Il profilo socioeconomico dell'imprenditore di precisione	" 220
10.8	Valutazioni per le singole tecnologie	" 221
10.9	Valutazioni in base alle colture interessate	" 223
10.10	La dimensione tecnico-economica per introdurre l'agricoltura di precisione	" 224
10.11	Le politiche per incentivare l'agricoltura di precisione.....	" 225
10.11.1	Gli indirizzi di politica agraria	" 225
10.11.2	Gli strumenti di politica agraria	" 225
	Bibliografia	" 227
11.	Lavorazioni variabili del terreno e semina a dose variabile (Luigi Sartori, Francesco Marinello, Andrea Pezzuolo, Paolo Tarolli)	" 229
11.1	Introduzione	" 229
11.2	Le lavorazioni del terreno nell'agricoltura di precisione	" 229
11.2.1	Lavorazioni del terreno e sistemi di guida.....	" 229
11.2.2.1	Il controllo del traffico.....	" 230
11.2.2.2	Lo strip tillage	" 231
11.2.2	Lavorazioni variabili del terreno basate su mappe	" 232
11.2.2.1	Lavorazioni a profondità variabile.....	" 232
11.2.2.2	Lavorazioni a intensità variabile.....	" 234
11.2.3	Lavorazioni variabili del terreno basate su sensori	" 235
11.2.3.1	Controllo della rugosità del terreno	" 235

Indice generale

11.2.3.2	Controllo del grado di interrimento dei residui.....	Pag. 236
11.3	La semina nell'agricoltura di precisione	" 236
11.3.1	La variazione delle dosi di seme.....	" 237
11.3.2	La semina a profondità variabile	" 239
11.3.2.1	Controllo della profondità attraverso il controllo della pressione	" 239
11.3.2.2	Controllo attraverso le ruote di profondità.....	" 240
11.3.3	Variazione del tipo di seme	" 240
11.3.4	Controllo attivo della uniformità di deposizione (controllo del selettore e delle pressioni dell'aria)	" 241
11.4	Informazione topografica di dettaglio in supporto ad interventi di agricoltura di precisione	" 242
11.4.1	Regimazione delle acque	" 243
11.4.2	Movimentazione delle terre: prospettive future	" 245
Bibliografia	.....	" 246
12	La fertilizzazione di precisione (Raffaele Casa, Francesco Morari)	" 249
12.1	Introduzione	" 249
12.2	La concimazione azotata	" 251
12.2.1	Mappe di prescrizione basate su dati acquisiti in precedenza	" 253
12.2.2	Monitoraggio della coltura nel corso della stagione: mappe di prescrizione ed approcci <i>on-the-go</i>	" 255
12.2.3	Algoritmi per la definizione delle dosi di concime da distribuire a tasso variabile	" 257
12.2.2.1	Algoritmi sviluppati per sistemi ottici prossimali	" 257
12.2.2.2	Algoritmi sviluppati per telerilevamento satellitare	" 264
12.3	La concimazione fosfatica	" 265
12.4	La concimazione potassica	" 267
12.5	Fertilizzazione organica	" 268
12.6	La correzione del pH	" 269
12.7	Attrezzature per la fertilizzazione a tasso variabile in agricoltura di precisione.....	" 270
Bibliografia	.....	" 272
13.	Irrigazione di precisione (Massimo Vincini e Francesco Morari)	" 275
13.1	Introduzione	" 275
13.2	Interpretazione della variabilità sito specifica e strategie di irrigazione di precisione	" 277
13.2.1	Mappatura della variabilità	" 277
13.2.2	Campionamenti "intelligenti" ed interpretazione della variabilità	" 280
13.2.3	Strategie di prescrizione irrigua a rateo variabile	" 282
13.3	Sistemi di irrigazione di precisione.....	" 288
13.3.1	Sistemi a rateo variabile (VRI) per aspersione.....	" 288
13.3.2	Microirrigazione e subirrigazione sito-specifica	" 294
13.3.3	Sistemi di controllo	" 295
13.4	Prospettive tecnologiche e sperimentali	" 298
Bibliografia	.....	" 299
14.	Trattamenti fitosanitari in agricoltura di precisione (Paolo Balsari, Gianfranco Airoidi, Raffaele Casa)	" 301
14.1	Introduzione	" 301
14.2	Criteri e sistemi per la regolazione e il controllo della dose distribuita	" 302
14.2.1	Sistemi a portata costante	" 303
14.2.2	Sistemi con distribuzione proporzionale all'avanzamento a controllo elettronico (DPAE)	" 305
14.2.3	Sistemi a portata variabile	" 305
14.2.3.1	Sistemi con porta ugelli doppi	" 305
14.2.3.2	Sistemi con porta ugelli quadrupli	" 307
14.2.3.3	Ugelli a portata variabile.....	" 307

14.2.3.4	Sistemi ugelli a pulsazione modulata	Pag. 307
14.2.3.5	Sistemi a iniezione diretta con concentrazione proporzionale all'avanzamento	" 307
14.2.3.6	Sistemi a iniezione diretta con concentrazione costante (CC)	" 309
14.3	La distribuzione mirata su colture erbacee	" 309
14.3.1	Gestione automatica della barra irroratrice	" 310
14.3.2	Distribuzione a dose variabile	" 310
14.3.3	Distribuzione mirata a chiazze (patch-spraying) con determinazione diretta della presenza dell'infestante	" 314
14.3.4	Distribuzione mirata basata sulle mappe	" 314
14.3.5	Criteri del processo decisionale per giungere all'elaborazione di carte tematiche per la distribuzione su colture erbacee dei diserbanti	" 318
14.4	La distribuzione mirata nelle colture arboree	" 319
14.4.1	Ottimizzazione dell'irrorazione	" 319
14.4.2	Correzione dell'assetto del sistema di distribuzione	" 323
14.4.3	La guida automatica nell'irrorazione dei frutteti e dei vigneti	" 323
14.5	La corretta gestione delle operazioni di riempimento, svuotamento e lavaggio della macchina irroratrice	" 323
	Bibliografia	" 327
15.	Applicazioni ai sistemi colturali erbacei ed ortivi di pieno campo (Simone Orlandini, Marco Mancini, Anna Dalla Marta, Alberto Crema, Francesco Nutini, Mirco Boschetti)	" 329
15.1	Introduzione	" 329
15.2	Applicazioni, diffusione e prospettive per le colture erbacee ed ortive di pieno campo	" 330
15.3	Applicazioni sul frumento duro in aree collinari dell'Italia Centrale: caso studio della Val d'Orcia	" 341
15.3.1	Criticità e tecnica agronomica	" 341
15.3.1.1	La coltivazione del frumento duro in Italia	" 341
15.3.1.2	Problematiche nella gestione aziendale	" 341
15.3.2	Principi, tecnologie e strategie impiegati per la fertilizzazione azotata sito-specifica	" 342
15.3.2.1	Le macchine operatrici e la rete RTK	" 343
15.3.2.2	Monitoraggio remoto della coltura	" 343
15.3.2.3	Le relazioni fra il vigore vegetativo del frumento in copertura e la resa finale	" 344
15.3.2.4	Le relazioni fra gli indici telerilevati e il vigore vegetativo del frumento	" 346
15.3.2.5	Mappe di prescrizione e fertilizzazione sito-specifica	" 347
15.3.3	Principi, tecnologie e strategie impiegati per la tracciabilità e la gestione delle informazioni derivanti dall'agricoltura di precisione	" 348
15.3.3.1	Mappatura delle rese	" 349
15.3.3.2	Il software gestionale e fascicolo informatico	" 349
15.4	Applicazioni in risicoltura	" 350
15.4.1	Criticità e tecnica agronomica	" 350
15.4.1.1	Importanza della risicoltura in Italia	" 350
15.4.1.2	Problematiche nella gestione della coltura del riso	" 351
15.4.2	Dalle problematiche agli interventi: il contributo dell'agricoltura di precisione	" 352
15.4.3	Il supporto satellitare per le fertilizzazioni azotate a rateo variabile	" 352
15.4.3.1	Analisi della variabilità intracampo	" 354
15.4.3.2	Distribuzione e analisi delle informazioni prodotte tramite geoportale dedicato	" 356
15.5	Considerazioni conclusive	" 364
	Bibliografia	" 374
16.	Applicazioni alla viticoltura ed altre colture arboree (Riccardo Lisci, Marco Rimediotti, Daniele Sarri, Marco Vieri, Pasquale Losciale, Luigi Manfrini)	" 377
16.1	Introduzione	" 377

Indice generale

16.2	Evoluzione della viticoltura di precisione nelle aziende	Pag. 379
16.3	Le operazioni di viticoltura di precisione.....	" 380
16.3.1	Progettazione e realizzazione dell'impianto	" 380
16.3.2	Operazioni di gestione del suolo	" 385
16.3.2.1	Lavorazioni ed inerbimenti differenziati.....	" 385
16.3.2.2	Concimazione a rateo variabile	" 387
16.3.2.3	Irrigazione differenziata	" 388
16.3.3	Gestione della chioma.....	" 388
16.3.3.1	Defoliatrici VRT	" 388
16.3.3.2	Irrorazione VRT	" 389
16.3.4	Raccolta differenziata delle uve	" 390
16.4	Il futuro dei robot collaborativi.....	" 393
16.5	Telemetria e sistemi gestionali di monitoraggio geo riferiti.....	" 396
16.6	Farms in the cloud.....	" 398
16.7	Altre colture arboree	" 399
16.7.1	Monitoraggio e cartografia dei frutteti	" 399
Bibliografia	.....	" 405

1 Introduzione

Raffaele Casa e Michele Pisante

1.1 Definizione ed evoluzione storica dell'Agricoltura di Precisione

Cosa si intende per Agricoltura di Precisione? Sono state proposte diverse definizioni negli ultimi decenni, ma una delle più conosciute è quella di un approccio alla gestione del processo produttivo agricolo che consenta di “fare la cosa giusta, al momento giusto, al punto giusto” (Gebbers e Adamchuk, 2010). Questa definizione riassume in maniera efficace i principi e gli obiettivi dell'Agricoltura di Precisione: tener conto della variabilità nel tempo e nello spazio dei fattori che influiscono sul processo produttivo agricolo, per migliorare l'efficienza degli input nella gestione dinamica del processo. Migliorare l'efficienza significa utilizzare meno risorse per ottenere lo stesso risultato, od ottenere un risultato migliore a parità di utilizzo di input (es. acqua, fertilizzanti, prodotti fitosanitari, ecc...). Quindi, vi è uno stretto legame tra i fondamentali fattori su cui si basa l'Agricoltura di Precisione e lo sforzo che viene fatto, sotto diversi aspetti, per aumentare la sostenibilità e ridurre l'impatto ambientale dell'agricoltura. A prima vista sembrerebbe dunque che l'obiettivo dell'Agricoltura di Precisione non si discosti dalle normali finalità di una buona gestione agronomica, ad esempio per quanto riguarda le produzioni vegetali. Tuttavia, le buone pratiche agricole comunemente proposte, non tengono adeguatamente in considerazione la dinamicità dei sistemi agricoli, all'origine di una forte variabilità temporale delle risposte ai fattori produttivi. Questa variabilità temporale fa sì che, ad esempio, lo stesso intervento agronomico (ad es. concimazione, trattamenti fitosanitari) sortisca degli effetti differenti nei diversi anni. Ancora più netta è la scarsa considerazione generalmente data, nella gestione convenzionale, alla variabilità nello spazio dei fattori che

influiscono sulle produzioni, in particolare alla variabilità presente all'interno degli appezzamenti coltivati. L'Agricoltura di Precisione si pone come obiettivo la comprensione di questa variabilità spaziale e temporale e la modulazione degli interventi, in funzione della variabilità, per ottimizzare i risultati del processo produttivo in termini economici e/o ambientali.

Per realizzare questo obiettivo, l'Agricoltura di Precisione si avvale di quanto di meglio la tecnologia possa offrire in termini di capacità di monitoraggio della variabilità e di attuazione di una gestione idonea a tener conto di questa variabilità, spesso chiamata **gestione sito-specifica**. Tuttavia, l'uso della tecnologia, in particolare sensoristica, elettronica e mecatronica non è necessariamente sinonimo di Agricoltura di Precisione, anche se spesso l'Agricoltura di Precisione non può prescindere dall'uso di queste tecnologie. Ad esempio l'utilizzo di strumenti di gestione del bilancio idrico del suolo, software e sensori di umidità o di potenziale idrico, non sono tipicamente applicazioni di Agricoltura di Precisione, se la gestione non è poi realmente sito-specifica, in quanto non tiene conto della variabilità spaziale del suolo. Non bisogna confondere l'Agricoltura di Precisione con l'informatizzazione o con l'introduzione di tecnologie elettroniche o di sensoristica nell'intera azienda agraria o nei singoli processi produttivi. L'Agricoltura di Precisione è l'applicazione di queste e di altre tecnologie per gestire la variabilità spaziale e temporale associata a tutti gli aspetti della produzione agraria, con lo scopo di migliorarne l'efficienza e diminuirne l'impatto ambientale.

Come evidenziato da Auernhammer e Demmel (2016), l'Agricoltura di Precisione può essere considerata una tra le diverse tipologie di gestione di precisione del territorio (*precision land management*), che include ad esempio anche la selvicoltura di precisione (*precision forestry*) (Fig. 1.1).

1. Introduzione

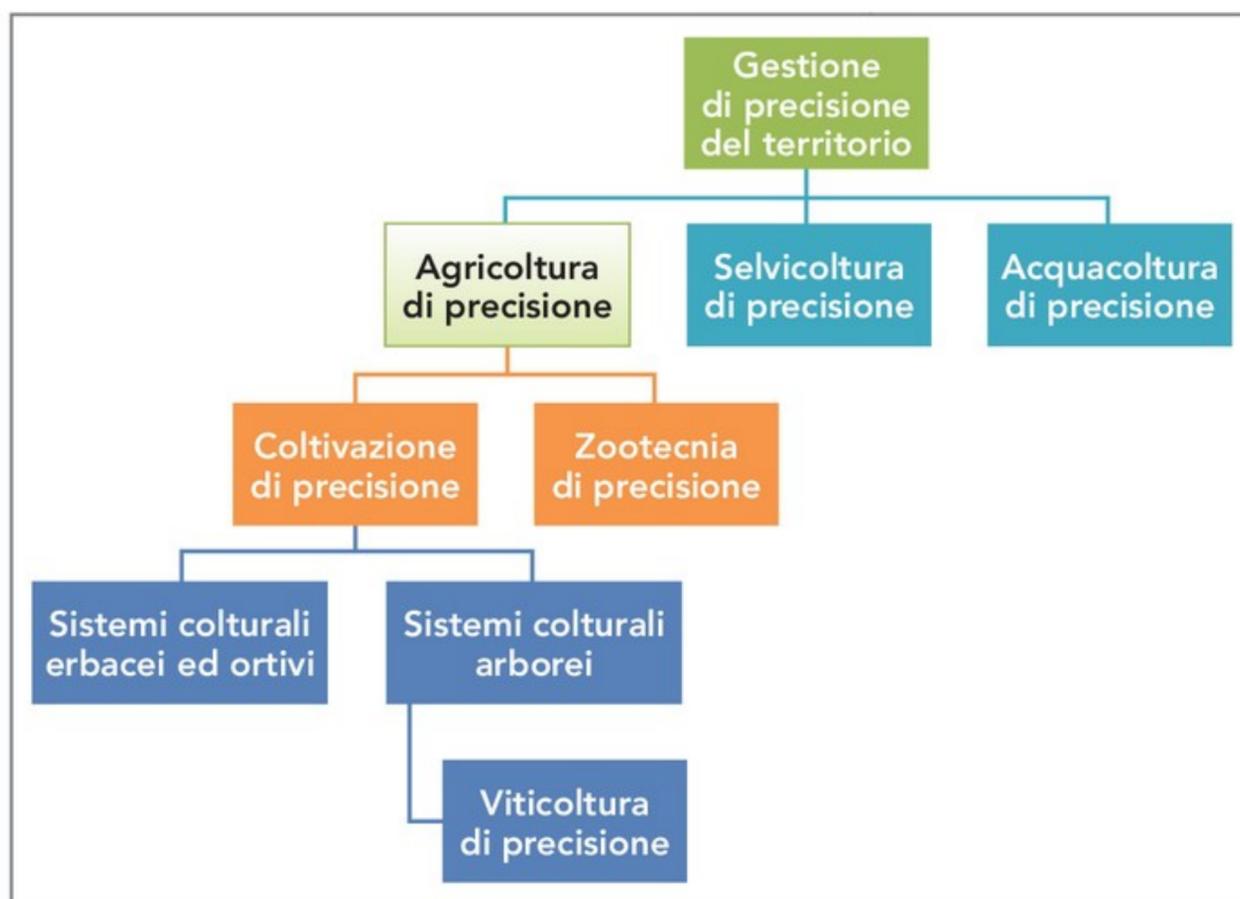


Figura 1.1 - Inquadramento delle diverse tipologie di gestione di precisione del territorio.

L'Agricoltura di Precisione si può suddividere nella gestione di precisione sia delle produzioni vegetali, in quella che potremmo definire **coltivazione di precisione** (*precision crop farming*), sia delle produzioni animali o **zootecnia di precisione** (*precision livestock farming*). Nell'ambito della zootecnia di precisione generalmente non si include la foraggicoltura di precisione (che può considerarsi parte del *precision crop farming*), ma piuttosto l'applicazione di tecnologie avanzate (es. informatica, elettronica, sensoristica) alla gestione degli animali in allevamento. I principi e le metodologie adottate dalla zootecnia di precisione sono abbastanza diversi da quelli della coltivazione di precisione e non sono trattate in questo volume, che si concentra invece sul *precision crop farming*. In questo testo si utilizzerà quindi il termine Agricoltura di Precisione come sinonimo di coltivazione di precisione, applicata sia ai sistemi colturali erbacei che a quelli arborei, tra i quali è particolarmente importante in Italia la **viticoltura di precisione**.

I concetti alla base dell'Agricoltura di Precisione, in particolare quelli che riguardano la conoscenza della variabilità spaziale dei fattori produttivi, nello specifico del suolo, appaiono fin dagli anni '20 del secolo scorso (Harris, 1920). I concetti di base della metodologia di sperimentazione agraria, riguardanti i disegni sperimentali su piccole parcelle, poi sviluppati da Fisher nella stazione sperimentale di Rothamstead (UK), sono infatti principalmente indirizzati a cercare di eliminare l'effetto della variabilità spaziale del suolo nella sperimentazione agronomica (Mercer e Hall, 1911).

In una pubblicazione del 1929 (Linsley e Bauer, 1929) vengono fornite le istruzioni per effettuare un campionamento del pH del suolo secondo una griglia regolare (contando i passi, non essendoci ancora il GPS!) ed ottenere una mappa di prescrizione con zone di applicazione di dosi diverse del correttivo (calcare), che veniva distribuito a mano (Fig. 1.2).

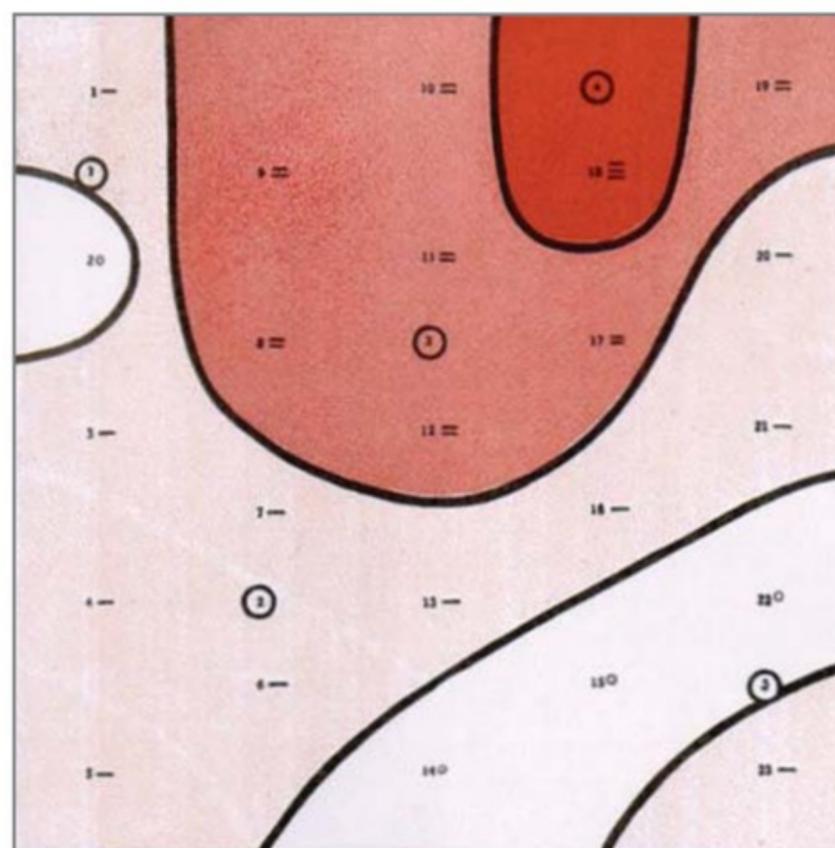


Figura 1.2 - Probabilmente il primo esempio di mappa di prescrizione, uno dei concetti principali dell'agricoltura di precisione, è quello proposto nel 1929 per la correzione del pH (Linsley e Bauer, 1929).

In questo caso il costo del correttivo ed il pesante lavoro necessario per la sua distribuzione, giustificavano l'interesse per lo sviluppo di questa procedura, alquanto complessa. Tuttavia, con lo sviluppo della meccanizzazione e con l'aumento delle superfici medie degli appezzamenti, la gestione uniforme, ad esempio della fertilizzazione, ebbe il sopravvento. La consapevolezza della variabilità nel tempo e nello spazio dei fattori della produzione, pur rimanendo ben presente agli agricoltori, fu quindi ignorata per semplificare e facilitare la gestione nell'agricoltura convenzionale.

Nel 1988 la AgChem Equipment Company del Minnesota (USA) introdusse sul mercato il primo spandiconcime a rateo variabile, tuttavia la ricerca agronomica non aveva ancora sviluppato le metodologie adeguate per il suo utilizzo, come veementemente sottolineato dal proprietario della AgChem al primo convegno internazionale di Agricoltura di Precisione (*International Conference of Precision Agriculture*), svoltosi nel 1992 proprio in Minnesota (Franzen e Mulla, 2016). Fu evidenziata quindi per la prima volta una problematica tipica dell'agricoltura ed in particolare, per quella di precisione, tuttora attuale: le tecnologie avanzano ad una velocità maggiore rispetto alla capacità di sfruttarle al meglio per la gestione agronomica.

Tuttavia, fin dagli anni '60, grazie al lavoro di Matheron, un ingegnere minerario, aveva avuto inizio lo sviluppo della geostatistica (vedi capitolo 2), nell'ambito della quale furono messe a punto tecniche di quantificazione (es. campionamento del suolo) ed analisi della variabilità spaziale, essenziali per l'Agricoltura di Precisione (Oliver, 2010).

Una delle rivoluzioni tecnologiche fondamentali per lo sviluppo dell'Agricoltura di Precisione fu quella dei sistemi di posizionamento satellitari (vedi capitolo 7), concepiti per scopi militari negli anni '80 e di cui fu autorizzato l'uso per scopi civili negli USA nel 1993. La messa in orbita dei 24 satelliti del *Global Positioning Service* (GPS) americano fu completata nel 1994. Le necessità di utilizzo del GPS in agricoltura spinsero allo sviluppo di sistemi di correzione dell'errore del segnale, volutamente introdotto dai militari per ragioni di sicurezza. Tra le applicazioni che il GPS rese possibile in agricoltura ci fu quello dello sviluppo, a partire dai primi anni '90, dei sistemi di mappatura installati sulle mietitrebbiatrici (vedi capitolo 8), che trovarono inizialmente una certa diffusione per poi destare minor interesse a causa della difficoltà di sfruttare in maniera utile, e con un ritorno economico, le informazioni contenute nelle mappe di resa.

A partire dagli anni '90 la delineazione, all'interno degli appezzamenti, di zone uniformi per caratte-

ristiche del suolo e ritenute adatte ad una gestione uniforme, fu introdotta nelle pianure centrali degli Stati Uniti dall'uso d'immagini acquisite da piattaforme aeree o satellitari. A tale scopo vennero anche impiegati a partire dagli anni '80 i primi sensori EM38 in grado di misurare le proprietà geo-elettriche del suolo (vedi capitolo 6), quale il primo detector di conduttività elettrica apparente commercializzato dalla Veris alla fine degli anni '90. Il servizio di mappatura della resistività elettrica apparente, fu offerto commercialmente in Francia a partire dal 2001 per l'impiego prevalente in viticoltura.

La considerazione della necessità di quantificare e gestire, oltre la variabilità spaziale del suolo, quella stagionale della coltura, portò allo studio, durante la metà gli anni '90 presso l'università dell'Oklahoma, di sensori ottici da installare sulle macchine agricole, in grado di fornire un indice di vegetazione (NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*) in maniera rapida ed economica. L'obiettivo era lo sviluppo di un sistema affidabile e selettivo in campo per gestire la concimazione azotata a rateo variabile, per differenziare le dosi all'interno di un appezzamento. Questa ricerca universitaria portò allo sviluppo del sistema GreenSeeker (Trimble) negli USA (Solie *et al.*, 2002), mentre in Europa ricerche simili, iniziate in Germania presso l'Università di Kiel e poi proseguite presso il centro di ricerche privato a Hanninghof della multinazionale dei fertilizzanti Hydro-Agri (in seguito Yara), portarono allo sviluppo di un sistema analogo, commercializzato nel 1999 col nome di N-sensor (Lammel *et al.*, 2001).

In alternativa al monitoraggio dello stato di nutrizione azotata svolto a terra con tali sensori, furono sviluppate in Francia tecniche basate sui dati satellitari, mediante un grande progetto di ricerca nazionale che coinvolgeva i centri dell'INRA (*Institut National de la Recherche Agronomique*), l'agenzia spaziale francese, società private e organizzazioni di produttori agricoli (Guerif et King, 2007). Queste ricerche furono all'origine del servizio commerciale Farmstar (Blondlot *et al.*, 2005) che forniva mappe di prescrizione per la concimazione azotata a partire da dati satellitari, disponibile in Francia a partire dal 2001 (vedi capitolo 4).

La possibilità di differenziare effettivamente l'applicazione degli input all'interno degli appezzamenti coltivati, determinò la messa a punto di un protocollo standardizzato di comunicazione tra le trattrici e le macchine operatrici dei diversi costruttori. Già a fine anni '90 fu messo a punto uno standard di comunicazione tra sistemi, nell'ambito del protocollo ISO 11783, denominato ISO-BUS (vedi capitolo 7). La fondazione internazionale AEF (*Agricultural Industry Electronic Foundation*), rappresentante del-

1. Introduzione

le principali aziende costruttrici di attrezzature e trattori agricoli e del settore dell'elettronica per l'agricoltura, sostiene e promuove lo sviluppo della tecnologia ISOBUS e l'adozione dello Standard ISO 11783, a livello mondiale. Tale organizzazione ha sviluppato l'*AEF Conformance Test Tool*, un protocollo di prova standard per la valutazione di conformità dei componenti ISOBUS. Dal 2014 AEF ha affidato ad ENAMA (Ente Nazionale per la Meccanizzazione Agricola) i controlli per verificare il rispetto dei requisiti tecnici ed organizzativi dei Laboratori di Prova che richiedono l'Accreditamento AEF sui dispositivi ISOBUS dei vari costruttori mondiali.

Nell'ultimo decennio vi è stato lo sviluppo delle tecnologie di monitoraggio, in particolar modo attraverso l'esplosione nella diffusione dei droni con sensori multispettrali, con costi relativamente bassi e l'introduzione di sensori iperspettrali appositamente miniaturizzati per essere trasportati su drone (vedi capitolo 5).

Le ultime innovazioni riguardanti l'Agricoltura di Precisione riguardano lo sviluppo di piattaforme di gestione delle grandi moli di dati tipicamente raccolti e prodotti in Agricoltura di Precisione, che hanno suscitato il grande interesse da parte di multinazionali quali Google, Microsoft, Monsanto e John Deere, che hanno investito ingenti risorse in questo ambito.

Nuove infrastrutture e servizi dedicati faranno largo uso di tecnologie di precisione con supporto digitale, interconnesse a piattaforme previsionali e decisionali (basate su osservazioni, analisi ed elaborazione interattiva), appositamente programmate per migliorare la gestione spaziale e temporale delle filiere, con particolare riguardo a quelle unicità esclusive dall'elevato grado di specializzazione e valore aggiunto (vedi capitolo 2). In questo nuovo ambito operativo, le tecnologie di precisione sono in grado di fornire accurate diagnosi e supporto gestionale ottimizzato, sia in termini di produzione agricola sia di redditività globale, includendo quella correlata alla prescrizione dei fattori di produzione (macchine, manodopera, fertilizzanti, prodotti chimici, sementi, acqua, energia, ecc.) dai prevedibili benefici economici, unitamente al rispetto delle più stringenti norme ambientali e climatiche.

1.2 Diffusione dell'Agricoltura di Precisione nel mondo

Attualmente l'Agricoltura di Precisione trova crescente diffusione, soprattutto nei Paesi in cui vi è un'agricoltura più avanzata. I dati sulla diffusione

sono frammentari, non rientrando nei canali di rilevazione sistematica delle statistiche ufficiali nei diversi Paesi. Le indagini effettuate mostrano alcune tendenze generali: il tasso di adozione delle tecnologie di Agricoltura di Precisione è stato finora meno rapido di quanto inizialmente previsto; l'adozione di sistemi di guida satellitari è più alta rispetto a quella di sistemi per applicazioni sito-specifiche (a rateo variabile); la percentuale di agricoltori che hanno adottato tecnologie di raccolta dati è più alta rispetto alla percentuale di agricoltori che usa realmente queste informazioni (OECD, 2016).

Il maggior tasso di adozione attualmente si registra negli Stati Uniti, dove molte delle tecnologie proprie di questo settore sono state sviluppate per prime. Il livello di diffusione negli USA può essere stimato dai dati raccolti da un'indagine effettuata periodicamente dall'Università di Purdue, tramite questionari compilati dai rivenditori di mezzi tecnici e di servizi per l'agricoltura (Erikson e Widmar, 2015). Si stima che circa l'80% degli agricoltori statunitensi utilizzi sistemi di guida delle trattrici con GPS, di cui il 50% con guida automatica (in aumento) e 30% manuale (con barra a led, vedi capitolo 7, in diminuzione). Gli agricoltori che utilizzano sistemi GPS per il controllo delle sezioni delle irroratrici si stima che siano il 33% e per la semina il 24%. La fertilizzazione a rateo variabile è adottata da circa il 30% degli agricoltori per uno o più elementi fertilizzanti e per il 40% per le calcitazioni correttive del pH, mentre il 13% per i trattamenti fitosanitari. Mentre, il 40% adotta sistemi di campionamento del suolo a griglia o per zone, una percentuale ancora abbastanza bassa, intorno al 4%, usa sistemi geoelettrici di mappatura del suolo, la stessa percentuale impiega sensori prossimali di rilevamento del contenuto di clorofilla. Circa il 40% delle mietitrebbiatrici sono equipaggiate con sistema di mappatura delle produzioni.

In Australia i cerealicoltori che usano tecniche di Agricoltura di Precisione è salito dal 5% del 2006 al 20% del 2012, con un elevato uso di *Controlled Traffic System* (vedi capitolo 11) che interessa il 25% delle aziende. Una elevata diffusione vi è anche in Sud America, in particolare in Argentina e Brasile.

In Europa il tasso di adozione è stato finora contenuto, principalmente concentrato in grandi aziende cerealicole del Centro-Nord Europa, con la maggior diffusione in Germania, Gran Bretagna, Francia e Paesi Scandinavi, con una crescente adozione nei Paesi dell'Est. In Germania, la percentuale di agricoltori che utilizza tecniche di Agricoltura di Precisione è salita dal 7% del 2001 a più del 10% nel 2007. In Gran Bretagna le tecnologie di guida satellitare erano adottate nel 2012 dal 22% degli agricolto-

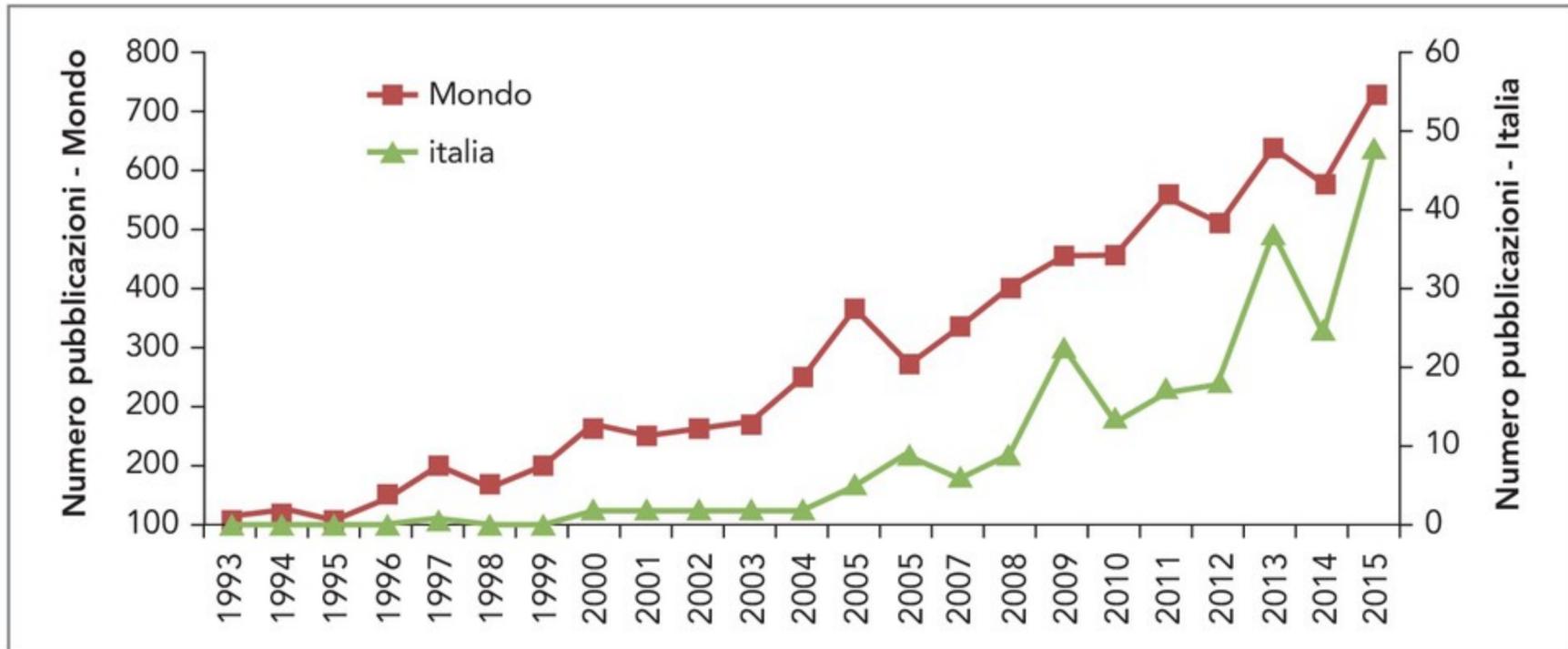


Figura 1.3 - Tendenza nel numero di pubblicazioni scientifiche annuali, nel mondo ed in Italia, sull'agricoltura di precisione estratte dal database bibliografico Scopus (Elsevier) mediante i termini di ricerca "precision agriculture" e "precision farming" per il periodo 1993-2015.

ri, la mappatura del suolo dal 20%, l'applicazione a rateo variabile dal 16% e la mappatura delle produzioni dall'11%.

Si stima che in Europa vi siano in uso circa un migliaio di sistemi prossimali per la gestione sito-specifica della concimazione azotata (dati del 2011) di cui il 54% in Germania ed il 24% in Gran Bretagna. I sistemi ISOBUS per la comunicazione tra trattori e macchine operatrici vengono attualmente installati sul 45% delle macchine vendute in Germania ed Olanda, mentre in Francia tale percentuale si attesta al 30%.

Finora l'adozione maggiore delle tecnologie di Agricoltura di Precisione è stata prevalente nei sistemi colturali erbacei (cerealicoltura), ma vi è una crescente diffusione in viticoltura.

Trattandosi di un settore ad elevata innovazione tecnologica, di prodotto e di processo, la ricerca svolge un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'Agricoltura di Precisione. Il numero di pubblicazioni scientifiche prodotte è in costante aumento a livello internazionale ed in Italia dagli anni '90 ad oggi (Fig. 1.3), con circa il 60% delle pubblicazioni riguardanti gli aspetti agronomici, il 27% aspetti ingegneristici, il 20% informatici e l'11% ambientali.

1.3 Diffusione dell'Agricoltura di Precisione in Italia

Per l'Italia non esistono statistiche ufficiali sul tasso di adozione delle tecnologie impiegate dall'Agricoltura di Precisione. Alcuni dati riportati di seguito sono stati presentati da Sartori (2015, comunica-

zione personale). La diffusione maggiore si ha per sistemi di guida satellitare con un trend in diminuzione per sistemi manuali (barra di guida) a favore dei sistemi automatici di cui ne vengono venduti su trattori nuovi circa 300 unità all'anno. Si stima che attualmente in Italia vi siano circa 1400 mietitrebbiatrici con un sistema di mappatura della produzione (anche se talvolta non pienamente utilizzato), in uso presso grandi aziende e contoterzisti e che annualmente ne vengano vendute circa 150 all'anno, pari al 40% delle macchine nuove. Sono state inoltre vendute finora (2016) circa 5 macchine per la mappatura della produzione del pomodoro da industria. Il 30% delle falciatrici semoventi ha sensori per monitorare la resa, l'umidità e qualità del prodotto trinciato. La diffusione del protocollo di comunicazione ISOBUS, un indicatore dell'adozione del controllo di precisione delle macchine operatrici, è molto minore rispetto ad altri Paesi Europei e si stima intorno al 10% dei trattori nuovi venduti ed al 3-5% per gli attrezzi. I monitor di guida e controllo delle sezioni delle irroratrici venduti sono circa 200 (6%). Irroratrici a barra di alta gamma portate (40%) e trainate (50%) prevedono il controllo delle sezioni (4-5% sul totale). Gli atomizzatori a getto mirato per vigneti (10%) prevedono la chiusura delle sezioni e controllo del ventilatore elettroidraulico soprattutto nelle zone sensibili nelle fasce di rispetto (direttiva 2009/128/CE). Per l'irrigazione, mentre il 60-80% degli impianti ad ala articolata (ranger e pivot) è con controllo remoto, solo 2 sistemi ad irrigazione a rateo variabile sono attualmente in funzione, insieme a 15 rotoloni a rientro variabile finora in commercio.

1. Introduzione

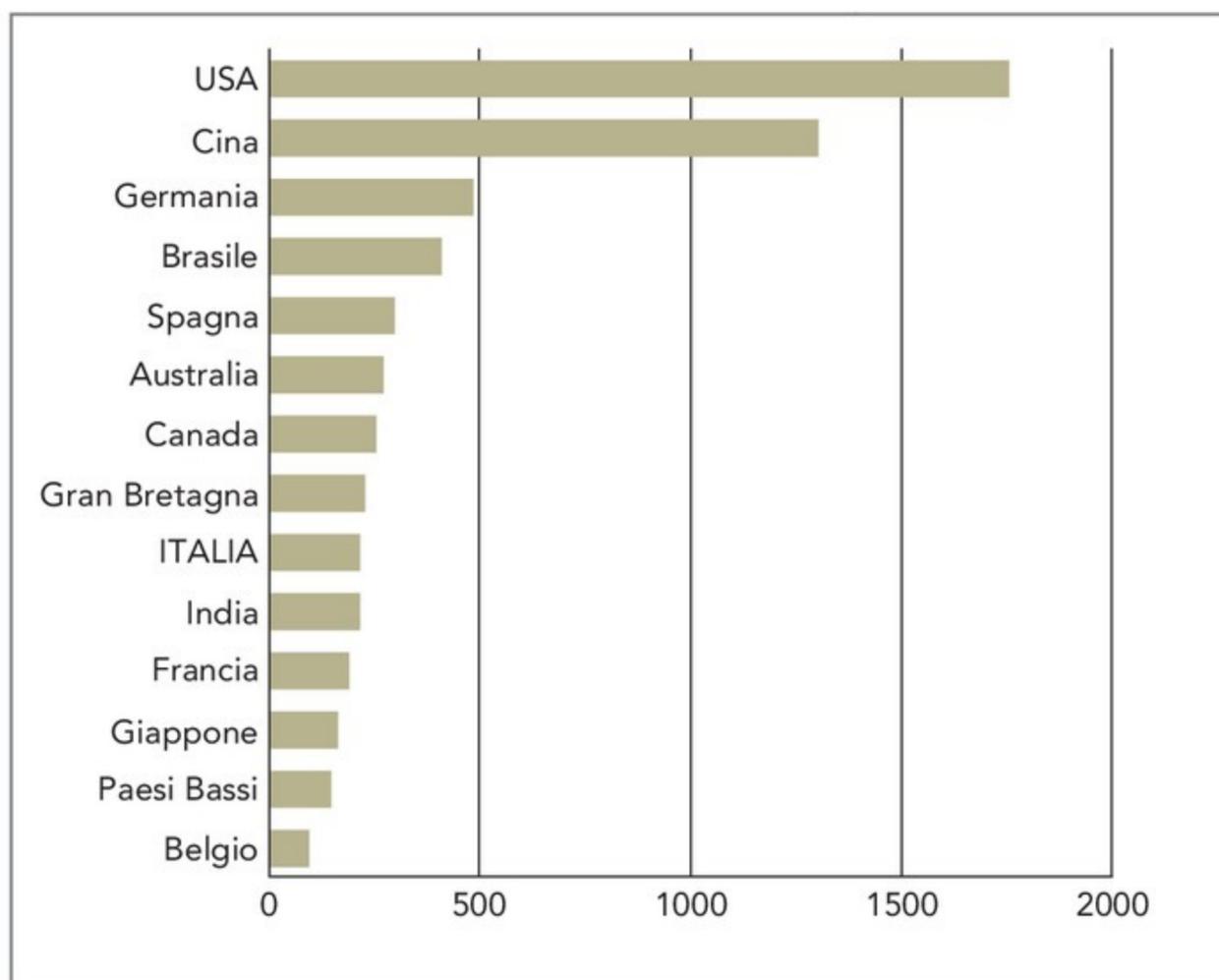


Figura 1.4 - Numero totale di pubblicazioni scientifiche sull'agricoltura di precisione estratte dal database bibliografico Scopus (Elsevier) mediante i termini di ricerca "precision agriculture" e "precision farming" per il periodo 1990-2015, suddivise per paese di affiliazione degli autori.

La ricerca sull'Agricoltura di Precisione in Italia, pur non avendo potuto contare su finanziamenti comparabili a quelli degli altri Paesi, ha comunque avuto una buona produttività scientifica, che la colloca al nono posto a livello mondiale come numero di pubblicazioni scientifiche (Fig. 1.4).

Da un'indagine effettuata dal gruppo di lavoro sull'Agricoltura di Precisione del MiPAAF nel 2016 (CREA, 2016), sono stati censiti 140 progetti od attività di ricerca: il 33% è coordinato da un'Università italiana, il 27% da un Ente Pubblico di Ricerca ed il restante 40% da un privato, un'amministrazione pubblica o un ente/università straniera. Dall'analisi delle parole chiave più ricorrenti si desume che molte attività riguardano i droni (19%), la viticoltura (14%), GIS e telerilevamento (18%). Le filiere in cui concentrano la maggior parte delle ricerche in Italia sono quella viticola e cerealicola (Fig. 1.5).

La prevalenza della viticoltura deriva dalla redditività della coltura, dalla vivacità tecnico-culturale del settore e dalle tecnologie innovative in linea con le attuali richieste del comparto. Proprio in viticoltura, infatti, la massimizzazione del reddito avviene specialmente attraverso l'aumento del valore del prodotto (ovvero della sua qualità). Infine, un ulteriore obiettivo trasversale alle filiere produttive ed alle tecnologie impiegabili, che sostiene l'introduzione delle tecniche di Agricoltura di Precisione, è rappresentato dalla necessità di quantificare le ore di lavoro, fertilizzanti, sementi, diserbanti, combustibili e lubrificanti che vengono oggi impiega-

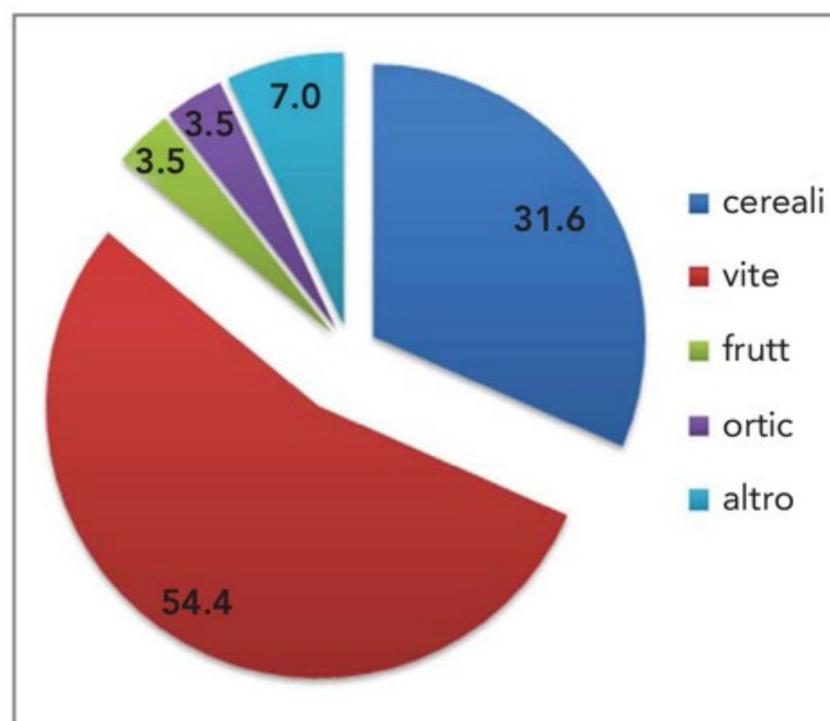


Figura 1.5 - Pubblicazioni scientifiche sull'agricoltura di precisione prodotte in Italia nel periodo 1990-2015 suddivise per tipologia di coltura (CREA, 2016).

ti, senza che esista una reale necessità per un loro impiego. Infatti, l'adozione delle diverse tecniche di Agricoltura di Precisione consente di ottimizzare l'attività di gestione e di ridurre, fino ad azzerare quasi completamente, tutti gli sprechi, trovando in tal modo ampia giustificazione economica, energetica ed ambientale, proprio grazie alla riduzione di tali sprechi per investire in sistemi di precisione, o di adattare i mezzi pre-esistenti con maggiore convinzione che gli oneri sostenuti siano recuperabili

in molto meno tempo di quanto non si percepisca immediatamente (vedi capitolo 10).

1.4 Contenuto del presente volume

Nei diversi capitoli che compongono questo libro sono illustrati i principi ed i metodi, sia tecnologici che concettuali, che consentono l'applicazione dell'Agricoltura di Precisione per il miglioramento della gestione delle produzioni vegetali di pieno campo, erbacee ed arboree. Indubbiamente anche le applicazioni tecnologiche e sensoristiche utilizzabili nelle produzioni animali sono in rapido sviluppo, in quella che viene definita *Precision livestock farming*. In molti casi si tratta di tecnologie che permettono l'automazione e che hanno già introdotto la robotica negli allevamenti zootecnici (es. impianti di mungitura, sistemi di monitoraggio dello stato di salute degli animali). Tuttavia, si è ritenuto di mantenere il focus di questo volume sulle produzioni vegetali a causa delle differenze sostanziali nel processo produttivo, rispetto alle produzioni animali, in particolare della specifica peculiarità di tener conto della variabilità spaziale e temporale, elemento caratteristico ed essenziale dell'Agricoltura di Precisione.

Nella prima parte del volume vengono illustrati i principi ed i metodi che sono alla base dell'Agricoltura di Precisione, partendo dalla considerazione che questa implica un cambiamento di organizzazione e gestione dell'intera azienda agricola, mediante sistemi informativi aziendali, come illustrato nel capitolo 2. Le basi per comprendere ed analizzare la variabilità spaziale e temporale sono fornite nel capitolo 3 che comprende un'introduzione alla geostatistica. I capitoli da 4 a 6 illustrano i principi su cui si basano i sensori utilizzati in Agricoltura di Precisione, dal telerilevamento satellitare (capitolo 4), ai droni (capitolo 5), ai sensori prossimali per il suolo e per le colture (capitolo 6). Nel capitolo 7 e 8 vengono illustrati i sistemi, tra i più diffusi in Agricoltura di Precisione che si basano sull'utilizzo dei dati di posizionamento e navigazione satellitare, quali i sistemi di guida automatica (capitolo 7) e quelli di mappatura delle produzioni (capitolo 8). Nel capitolo 9 vengono illustrate le metodologie di utilizzo delle informazioni mediante modelli e sistemi di supporto alle decisioni per poterli tradurre in comportamenti gestionali sito-specifici. Il capitolo 10, analizza gli aspetti economici legati all'adozione dell'Agricoltura di Precisione ed individua le politiche disponibili per incentivare gli investimenti e il trasferimento delle innovazioni nel contesto in cui opera l'agricoltura italiana.

La seconda parte del volume esamina come l'Agricoltura di Precisione possa contribuire al miglioramento della gestione tecnica delle produzioni vegetali, dalle lavorazioni e semina (capitolo 11) alla fertilizzazione (capitolo 12), l'irrigazione (capitolo 13) e la difesa fitosanitaria delle colture (capitolo 14).

Infine, nella terza parte vengono illustrati alcuni esempi specifici di applicazione dell'Agricoltura di Precisione in Italia per sistemi colturali erbacei (capitolo 15) ed arborei (capitolo 16), comprendendo in questi ultimi la viticoltura.

Bibliografia

AUERNHAMMER H., DEMMEL M. (2016) – “State of the art and future requirements”. In: Q. Zhang (Ed.), *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*, CRC Press (Taylor&Francis), Boca Raton FL (USA), 299-346.

BLONDLOT A., GATE P., POILVE H. (2005) – “Providing operational nitrogen recommendations to farmers using satellite imagery”. In: J. Stafford (Ed.), *Precision Agriculture '05*, Wageningen University Publishers, Wageningen, pp. 345-351.

CREA (2016) – *Report sullo stato dell'arte dell'agricoltura di precisione in Italia: sintesi della chiamata per contributi di ricerca ed innovazione*. Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'Economia Agraria (CREA), Roma, 43 pp.

ERIKSON B., WIDMAR D.A. (2015) – *Precision agricultural services dealership survey results*. Dept. of Agricultural Economics, Purdue University, West Lafayette, Indiana (USA), 37 pp.

FRANZEN D., MULLA D. (2016) – “A history of precision agriculture”. In: Q. Zhang (Ed.), *Precision Agriculture Technology for Crop Farming*, CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton FL (USA), 1-19.

GEBBERS R., ADAMCHUK V. (2010) – Precision Agriculture and Food security. *Science*, 327, 828-831.

GUERIF M., KING D. (2007) – *Agriculture de précision*. Editions Quae INRA, Francia, 277 pp.

LAMMEL J., WOLLRING, RUSCH S. (2001) – “Tractor based remote sensing for variable nitrogen fertilizer application”. In: W.J. Horst *et al.*, *Plant Nutrition - Food security and sustainability of agro-ecosystem*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 694-695.

LINSLEY C.M., BAUER F.C. (1929) – *Test your soils for acidity*. University of Illinois Circular 346, Urbana IL.

MERCER W.B., HALL A.D. (1911) – The experimental error of field trials. *Journal of Agricultural Science*, 4, 107-132.

OECD (2016) – “Is precision agriculture the start of a new revolution?”. In: *Farm Management Practices to*

1. Introduzione

Foster Green Growth, OECD Green Growth Studies, OECD Publishing, Paris.

OLIVER M.A. (2010) – “An overview of geostatistics and precision agriculture”. In: M.A. Oliver (Ed.), *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*, Springer, 1-34.

SOLIE J.B., STONE M.L., RAUN W.R., JOHNSON G.V., FREEMAN K., MULLEN R., NEEDHAM D.E., REED S., WASHMON C.N. (2002) – Real-time sensing and N fertilization with a field scale GreenSeeker™ applicator. In: *Proceedings of the 2002 International Conference in Precision Agriculture*, Minneapolis, MN.