



## L'INNOVAZIONE NELLO SVILUPPO DELLA MECCANIZZAZIONE E DELLA LOGISTICA

*L. Bodria<sup>1</sup>, R. Berruto<sup>2</sup>*

(1) Dipartimento di Ingegneria Agraria, Università degli Studi di Milano

(2) Dipartimento di Economie e Ingegneria Agrarie Forestale e Ambientale, Università degli Studi di Torino

### SOMMARIO

*Il lavoro traccia un ampio quadro dei principali aspetti che hanno caratterizzato l'evoluzione dell'innovazione nel settore delle trattrici, delle macchine operatrici e della logistica.*

*Viene sottolineato come sostenibilità ambientale e automazione costituiscano le principali forze trainanti in riferimento alla macchine.*

*In parallelo allo sviluppo di macchine più performanti, occorre mettere in atto strategie che ne migliorino l'utilizzazione, specialmente per quanto riguarda le operazioni complesse quali quelle di raccolta e trasporto dei prodotti.*

*Le applicazioni della logistica all'agricoltura consentono sia di migliorare la sostenibilità delle operazioni agricole, sia di ridurre i costi delle medesime. Molto si può ottenere dalla semplice condivisione delle informazioni e dalla messa a punto di metodologie di ottimizzazione dei processi logistici, senza gravare la filiera di investimenti in mezzi di trasporto o in impianti di stoccaggio.*

*Parole chiave: sostenibilità, automazione, logistica, simulazione, tracciabilità*

### 1 INTRODUZIONE

Le macchine agricole e la meccanizzazione costituiscono un settore che ha ormai raggiunto la piena maturità tecnologica all'interno del quale, pertanto, il ruolo dell'innovazione è da qualche decennio principalmente di tipo "incrementale", ossia volto all'ottimizzazione delle caratteristiche operative e funzionali delle macchine e dei cantieri.

In tale ottica, i margini di sviluppo di nuove macchine o tecnologie sono ormai molto ridotti, mentre l'evoluzione più recente è in maniera prevalente orientata secondo le tre grandi linee generali:

- sostenibilità energetica e ambientale;
- automazione e controllo;
- ottimizzazione dei trasporti;

peraltro spesso interconnesse fra loro.

La *sostenibilità* delle produzioni agricole, alimentari e non, è oggi la più grande sfida che l'umanità è chiamata ad affrontare per rispondere, nel rispetto dell'ambiente e delle sue risorse, alla crescente domanda di alimenti ed energia di una società in continuo e rapidissimo sviluppo.

Il *controllo* costituisce la primaria funzione del processo di produzione agricola da quando l'uomo, acquisendo la capacità di fruttare la trazione animale prima e l'energia del motore poi, è passato dal ruolo di generatore di potenza (di fatto modestissima, dell'ordine di 0,075 kW) a quello di elemento di controllo, con la funzione di gestire al meglio la ben più elevata potenza disponibile.

La *logistica per l'ottimizzazione dei trasporti* e della distribuzione dei prodotti costituisce un aspetto emergente di questi ultimi anni in cui un efficiente uso dell'energia, l'attenzione alla adeguatezza dell'intera catena distributiva e della qualità dei prodotti sono divenuti elementi imprescindibili di competitività dei prodotti. L'introduzione di nuove tecnologie e di macchine ad elevata capacità richiede un adeguato livello di gestione delle stesse e del flusso di materiali da esse generato.

## **2 L'INNOVAZIONE E SOSTENIBILITÀ NELLA PROGETTAZIONE DELLE MACCHINE MOTRICI**

La produzione mondiale di trattrici di potenza superiore ai 18 kW è stimata dell'ordine di  $1,4 \cdot 10^6$  di unità, con un valore dell'ordine di  $20 \cdot 10^6$  Euro. Includendo anche le macchine di potenza inferiore, il totale delle unità aumenta considerevolmente per effetto dell'alta produzione dei paesi asiatici.

Benché, almeno in Europa e negli USA, la trattrice agricola abbia raggiunto livelli qualitativi elevatissimi con potenze che giungono a valori di 250 kW (Fig. 1), vi è comunque ancora spazio per il progresso dell'innovazione che può essere resa disponibile su sempre più ampia scala.



**Figura 1.** Moderne trattrici agricole

L'obiettivo attuale della ricerca e dell'innovazione, inizialmente orientato principalmente verso l'aumento della produttività, è oggi essenzialmente volto alla riduzione dei costi e, soprattutto, alla sostenibilità perseguita tramite:

- il risparmio di materiale grazie all'alleggerimento del disegno progettuale e

- all'impiego di materiale riciclato;
- il minore consumo di energia nella produzione e per un razionale accoppiamento trattrice-macchina;
- l'impiego di combustibili e liquidi alternativi per il motore, la trasmissione e l'idraulica;
- l'ottimizzazione delle condizioni operative di motore, trasmissione e idraulica;
- la difesa dell'ambiente;
- la sicurezza e la salute dell'operatore e delle persone circostanti.

## **2.1 Risparmio di materiale**

Benché nella trattrice la massa costituisca un elemento necessario per lo sviluppo di un'appropriata forza di trazione, la riduzione del peso consente un corrispondente aumento del carico utile che è definito dalla capacità di carico dei pneumatici; ne deriva una maggiore versatilità d'impiego con le moderne macchine operatrici di crescenti dimensioni, mentre per le operazioni che richiedono elevati sforzi di trazione si può fare ricorso alla zavorrata.

L'alleggerimento strutturale, pertanto, è diventato un emergente fattore di sostenibilità che porta ad un risparmio di materiale, alla riduzione dei consumi per l'autodislocamento, al minore compattamento del terreno, nonché ad una generale riduzione del costo di produzione della macchina.

Grande è lo sforzo progettuale dei produttori in tale senso, con un crescente impiego di acciai speciali ad alta resistenza, che consentono un minore peso degli organi strutturali, e di sofisticate tecniche informatiche per la simulazione e l'analisi delle sollecitazioni in condizioni operative.

Grazie a quest'ultime, è possibile rendere molto più veloce la fase di definizione del progetto, utilizzando la "prototipazione virtuale" che consente di verificare in ambiente virtuale il prototipo, limitando considerevolmente la sperimentazione di campo, con una consistente riduzione dei costi e del tempo che intercorre fra l'idea iniziale e l'entrata sul mercato del prodotto.

## **2.2 Risparmio di energia e sostenibilità nel progetto**

La non sostenibilità del bilancio energetico mondiale è ormai ampiamente riconosciuta. L'enorme consumo attuale delle risorse energetiche naturali porterà in tempi brevi all'esaurimento delle risorse petrolifere e nessuna nuova fonte di energia ampiamente disponibile e di basso costo è attualmente nota.

Se oltre a ciò si considerano le gravi conseguenze di natura ambientale derivanti dai residui della combustione di prodotti a base di carbonio, è di tutta evidenza come il risparmio energetico costituisca una imprescindibile priorità in termini sia economici, che di sostenibilità ambientale.

Nella trattrice il flusso di energia riguarda il motore, la trasmissione alle ruote e alle PTO, il sistema idraulico.

Il *motore* Diesel, ormai sempre di tipo ad iniezione diretta, caratterizza la sua efficienza energetica mediante la mappatura del consumo specifico riferito alle condizioni di coppia e al regime di lavoro.

Il sistema "Common-Rail" e le profonde innovazioni relative al controllo elettronico dell'iniezione, hanno portato a un importante miglioramento del valore del rendimento

di combustione.

La possibilità di regolare con grande precisione la quantità di combustibile e il momento dell'iniezione modulando l'immissione di gasolio all'interno del cilindro consentono non solo importanti miglioramenti in termini di rendimento, ma anche per quanto riguarda rumorosità e residui di combustione.

Gli attuali motori Diesel di potenza superiore ai 50 kW, operando ad un regime nominale di 2000 giri/min, possono giungere a valori di consumo specifico di 200 g/kWh, esprimendo così un rendimento dell'ordine del 42%.

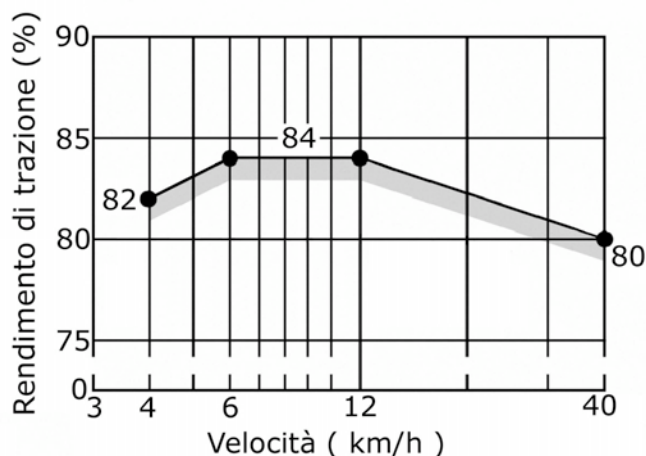
Considerando i limiti imposti dalla termodinamica e dal regolamento delle emissioni, il margine di miglioramento per l'innovazione futura in termini di riduzione dei consumi è molto ridotto e si colloca attorno al limite dei 190 g/kWh ( $\eta = 44\%$ ).

La *trasmissione* si è oggi evoluta dal tipo a diversi rapporti a quella a variazione continua. Nel primo caso l'ottimizzazione del rendimento, con valori dell'ordine del 85% a pieno carico e con velocità comprese fra i 4 e i 12 km/h, è perseguibile adottando la lubrificazione a carter secco, con sistemi intelligenti di gestione delle pompe, e con l'uso di oli sintetici.

La trasmissione a variazione continua (CVT) tradizionale di tipo integralmente idraulico non ha trovato pratica applicazione per decenni a causa del suo basso rendimento che non supera il 75% nelle migliori condizioni.

Solo con la profonda innovazione legata allo sviluppo delle trasmissioni a variazione continua di tipo misto, nelle quali vengono "miscelate" la trasmissione idraulica e quella meccanica, si sono potuti ottenere valori di rendimento competitivi.

Grazie all'impiego delle più recenti pompe idrostatiche assiali a portata variabile con angolo di inclinazione di  $45^\circ$  e a sofisticati sistemi di controllo a basso consumo di energia, le recenti trasmissioni CVT su macchine di potenza superiore ai 100 kW sono in grado di fornire valori di efficienza che alle velocità più comuni di lavoro sono paragonabili a quelli delle trasmissioni meccaniche (Fig. 2).

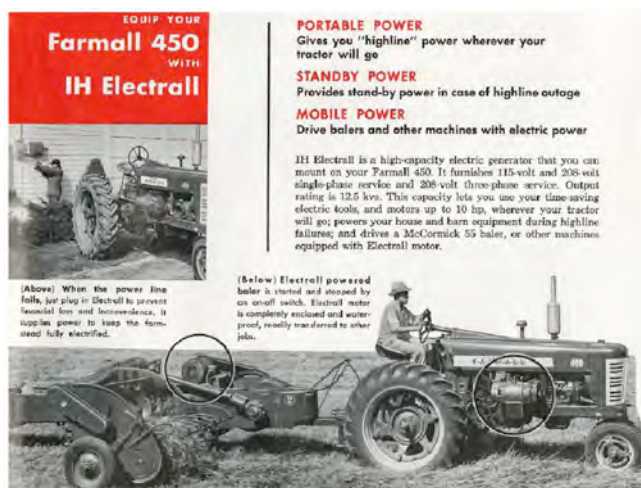


**Figura 2.** Rendimento di trasmissione a variazione continua per trattori di potenza superiore a 100 kW

La *trasmissione della presa di potenza* offre in generale valori di rendimento molto elevati, ma un sistema CVT offre l'importante beneficio di rendere indipendenti il regime di rotazione del motore da quello della macchina operatrice, aprendo così la strada a nuovi interventi di ottimizzazione energetica.

Un'innovazione recentissima e di grandissimo interesse riguarda i primi sviluppi della *trasmissione elettrica per la distribuzione della potenza* a bordo della trattrice.

Il passaggio dal normale uso di corrente a 12 V a sistemi ad alto voltaggio per la trasmissione di potenza ha visto un primo tentativo già nel 1957 da parte dell'International Harvester (Fig. 3) che ha messo sul mercato una raccogliballatrice azionata da un generatore elettrico di corrente alternata trifase da 208 V, della potenza di 10 kW.



**Figura 3.** Trattore Electral della International Harvester con PTO elettrica

Più recentemente la John Deere ha realizzato una macchina dotata di un sistema ad alto voltaggio alimentato da un generatore asincrono da 20 kW a 1800 giri/min per l'azionamento dei dispositivi ausiliari di bordo della trattore (ventilatore, condizionamento, compressore freni, ecc.).

I principali vantaggi connessi a tale soluzione riguardano:

- ottimizzazione del controllo del flusso di potenze;
- riduzione dei picchi di carico generati dai dispositivi ausiliari con miglioramento del rendimento;
- maggiore flessibilità nella disposizione di componenti;
- maggiore produttività e migliore confort per l'operatore.

Per quanto riguarda la trasmissione elettrica del moto si è ancora in fase di studio, ma diversi studi ne hanno dimostrato la fattibilità.

Il progetto MELA (Mobile Elektrische Leistungs-und Antriebstechnik; Mobile electric power train technology) sviluppato nel 2000 da diverse università e

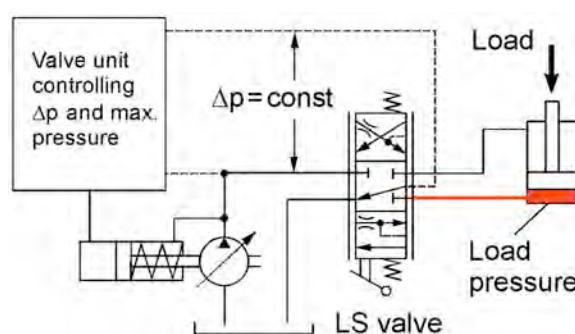
organizzazioni tedesche in collaborazione con la Fendt, ha mostrato la possibilità di realizzare elettricamente una trasmissione a variazione continua del moto alle ruote e alla PTO.

Nel 2009 la Belarus ha presentato un prototipo con motore Diesel da 220 kW e generatore elettrico da 172 kW con trasmissione integralmente elettrica (Fig. 4).



**Figura 4.** Trattore Belarus con trasmissione elettrica

Il *sistema idraulico* può trarre un importante beneficio in termini di efficienza da una più estesa applicazione del sistema a “centro chiuso” (load sensing-LS), oggi riservato a macchine di alta gamma con potenza superiore ai 60-80kW, che regola la portata dell’olio in funzione della caduta di pressione  $\Delta p$  alla valvola di controllo e pone la pompa in posizione di stand-by in assenza di richiesta di potenza (Fig. 5).



**Figura 5.** Sollevatore idraulico a centro chiuso di tipo Load Sensing

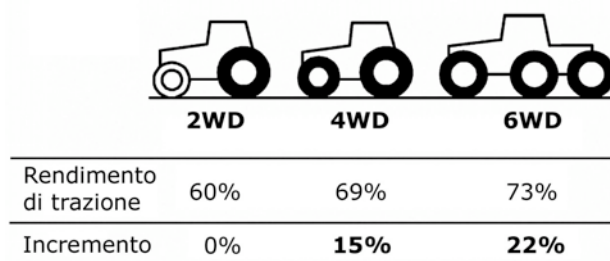
Ciò richiede una riduzione dei costi delle pompe a volume variabile, mentre possibili margini di miglioramento legati all’innovazione riguardano:

- la diminuzione del valore di controllo della caduta di pressione, oggi

dell'ordine di 20-30 bar;

- la riduzione delle perdite di carico lungo le tubazioni;
- il recupero dell'energia nelle fasi di discesa;
- l'aumento della pressione nominale a valori dell'ordine dei 250 bar.

Nelle operazioni che comportano alti valori della forza di trazione l'efficienza di trasferimento della potenza alle ruote, ampiamente migliorata con lo sviluppo delle 4 ruote motrici, può essere ulteriormente aumentata con l'aggiunta di un terzo assale motore che comporta un miglioramento del 7% (Fig. 6).



**Figura 6.** Rendimento di trasmissione a variazione continua per trattori di potenza superiore a 100 kW

### 2.3 Combustibili alternativi

L'utilizzazione di olio vegetale o biodiesel è stata oggetto di studio e sperimentazione su vasta scala da molti anni, ma sino ad ora non pare non pare essere emersa una soluzione prevalente, anche per effetto della scarsa resa energetica delle colture da olio.

Nuovo interesse sta ora incontrando, specialmente nel nord Europa, la tecnologia Biomass to Liquid (BTL) di seconda generazione basata su gassificazione e sintesi Fischer-Tropsch i cui costi sono previsti competitivi entro il prossimo decennio.

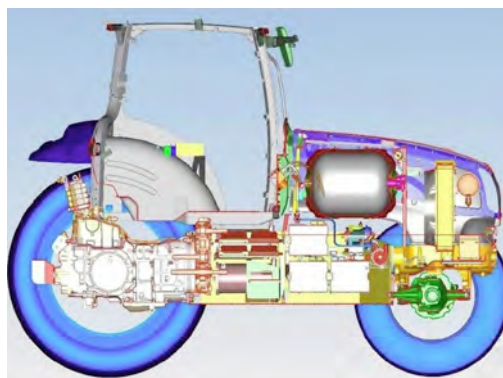
Certamente le prospettive di maggiore interesse riguardano lo sviluppo dell'idrogeno per l'alimentazione delle celle a combustibile che consentono importanti benefici:

- totale assenza di emissioni;
- trasmissione elettrica CVT semplice e di alta efficienza;
- bassa rumorosità.

Vi è, tuttavia, necessità di ulteriori, importanti passi innovativi per superare i tre principali problemi tuttora irrisolti relativi alla produzione del gas, all'alto costo industriale delle celle e allo stoccaggio dell'idrogeno.

Significativo in merito il prototipo CNH che si colloca nella più ampia visione dell'azienda agricola autosufficiente che produce con energia rinnovabile l'energia di cui abbisogna (Fig. 7).





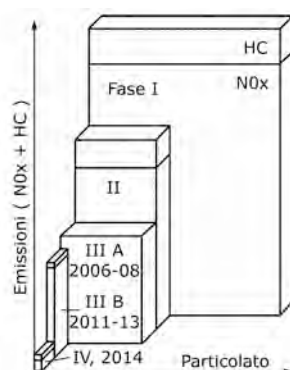
**Figura 7.** Prototipo NH2 della CNH azionato da cella a combustibile alimentate ad idrogeno

## 2.4 Protezione dell'ambiente

I principali obiettivi ai fini della protezione ambientale per la trattoria agricola consistono nella prevenzione/limitazione di:

- i residui della combustione, principalmente  $\text{NO}_x$ , HC e particolato;
- le emissioni di  $\text{CO}_2$  ;
- il compattamento del suolo.

Il *controllo delle emissioni* costituisce da molti anni la principale preoccupazione della ricerca in campo motoristico nei paesi industrializzati dove la legislazione impone vincoli progressivamente sempre più severi (Fig. 8). Mentre i livelli I e II hanno potuto essere rispettati con semplici interventi di modifica sui motori, il livello III A ha richiesto sofisticati interventi di revisione progettuale del disegno delle testate, dell'intero sistema di iniezione e del raffreddamento. La sensibile riduzione del particolato imposto dal livello III B richiederà l'adozione di filtri antiparticolato e di sistemi di riduzione catalitica (Selective Catalytic Reduction – SCR) con urea.



**Figura 8.** Prototipo NH<sup>2</sup> della CNH azionato da cella a combustibile alimentate ad idrogeno



Le principali tecnologie disponibili per ottenere bassi valori sia di emissioni, sia di consumo specifico sono le seguenti:

- alimentazione con 4 valvole per cilindro e iniezione centrale;
- pressioni di iniezione superiori ai 2000 bar;
- turbine di compressione a geometria variabile;
- ricircolo dei gas di scarico;
- filtri antiparticolato e tecnologie SCR;
- oli lubrificanti sintetici;
- regolazione continua della velocità del ventilatore;
- pompe idrauliche a portata variabile.

Non meno importante in termini ambientali è la *protezione del suolo* dall'azione di compattamento dovuta al passaggio delle macchine, al fine di mantenere il necessario valore di porosità per un ottimale sviluppo delle colture.

I tre principali fattori che condizionano il compattamento del suolo sono:

- il carico sulla ruota;
- le dimensioni del pneumatico;
- la pressione di gonfiaggio.

I suoli secchi e sabbiosi sono meno sensibili al compattamento e possono accettare pressioni medie sul suolo sino a 2 bar, mentre terreni umidi e argillosi richiedono pressioni di contatto inferiori a 0,5 bar.

Il valore della pressione media al suolo è direttamente correlata alla pressione di gonfiaggio, tuttavia, i valori di pressione ottimali per le lavorazioni in campo non sono compatibili con quelli necessari per la circolazione su strada.

Un'innovazione di grande valenza ambientale, pertanto, è costituita dallo sviluppo dei dispositivi per il controllo della pressione dei pneumatici che consentono di mantenere sempre il valore ottimale in funzione delle condizioni operative.

### **3 L'INNOVAZIONE NEL CONTROLLO DELLE MACCHINE OPERATRICI**

Se, come visto, il primo grande passo dell'evoluzione dell'agricoltura è consistito nella sostituzione del lavoro dell'uomo con quello delle macchine, stiamo oggi assistendo ad una ulteriore evoluzione epocale in cui anche la funzione di controllo, sino ad ora responsabilità umana, viene progressivamente attribuita a nuove e sempre più sofisticate tecnologie di automazione.

Le linee di sviluppo più significative dell'innovazione nel controllo delle macchine riguardano:

- l'ottimizzazione della gestione operativa e funzionale delle operazioni
- la tecniche computerizzate di visione;
- la guida automatica.

#### **3.1 Gestione delle macchine operatrici**

L'innovazione nella gestione della macchine, grazie ai sempre più accessibili sistemi di georeferenziazione, si è sviluppata principalmente nell'ambito di quella che viene ormai generalmente definita "agricoltura di precisione" e ha portato allo sviluppo di numerose tecnologie volte soprattutto alla salvaguardia ambientale mediante la

regolazione appropriata dei prodotti chimici distribuiti.

Tra le applicazioni di maggiore interesse ambientale delle tecnologie elettroniche vi è certamente quella relativa al *controllo della dose* di prodotto distribuito.

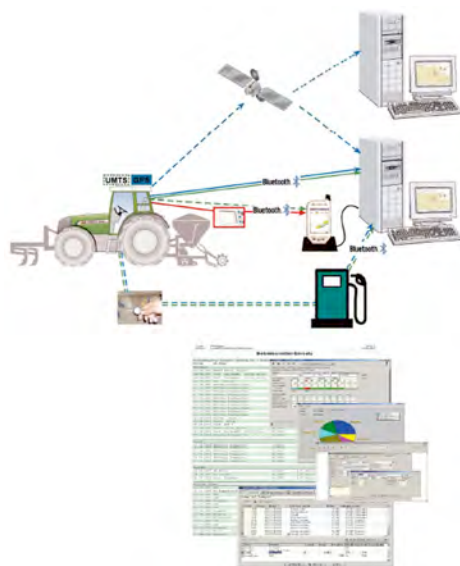
I moderni sensori per il rilievo della velocità e della portata, oggi semplici ed economici, hanno portato alla diffusione dei sistemi DPA (Distribuzione Proporzionale all'Avanzamento) nei quali, una volta impostati nella centralina di controllo il valore della quantità di prodotto che deve essere distribuito per ettaro, la portata invariata agli ugelli viene automaticamente regolata in funzione della velocità di avanzamento del trattore per mantenere il valore voluto della dose distribuita.

In grande evoluzione sono anche le ricerche in atto per giungere alla *distribuzione differenziata* degli "input" secondo, da un lato, le caratteristiche del prodotto (tipo di prodotto attivo, concentrazione di azoto ecc.) e, dall'altro, le esigenze localizzate delle colture e di aree particolarmente sensibili, al fine di garantire una migliore sostenibilità ambientale dei processi (Fig. 9).



**Figura 9.** Gestione informatizzata della distribuzione dei liquami

L'acquisizione delle capacità di comunicare e scambiare dati fra le diverse centrali elettroniche di controllo (ECU), ottenuta con lo sviluppo di reti elettriche in grado di trasportare e riconoscere pacchetti di dati digitali (sistemi CAN-BUS) ha consentito, poi, di trasformare i dati grezzi in informazioni che diventano così elementi attivi nell'ambito di processi gestionali, sia operativi, sia direttivi, giungendo a definire i *sistemi informatici aziendali* (Fig. 10).



**Figura 10.** I sistemi informatici aziendali consentono di ottimizzare la gestione dei cantieri di meccanizzazione

Ciò si realizza integrando tecnologie meccaniche, elettroniche e informatiche in sistemi articolati che comprendono:

- tecnologie elettroniche preposte, sia all'acquisizione dei dati, sia alla loro utilizzazione per la regolazione e il controllo del processo;
- tecnologie di posizionamento, per la collocazione spaziale dell'informazione all'interno del sistema aziendale;
- tecnologie informatiche hardware, per la gestione fisica delle informazioni (registrazione, visualizzazione, modifica e trasmissione dei dati);
- tecnologie informatiche software, per la loro elaborazione e la definizione di modelli e strategie.

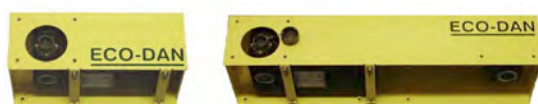
Si sviluppano così i sistemi informativi volti ad una più razionale gestione aziendale, con quali è possibile:

- raccogliere i dati inerenti a ciascun singolo evento operativo;
- elaborare ed archiviare i dati raccolti;
- utilizzare tali informazioni secondo le strategie aziendali definite.

### **3.2 Tecniche di visione**

La crescente attenzione agli aspetti ambientale delle produzioni agricole ha stimolato l'attenzione verso le tecniche di visione a servizio del *controllo meccanico delle infestanti* in sostituzione dei trattamenti a base di erbicidi.

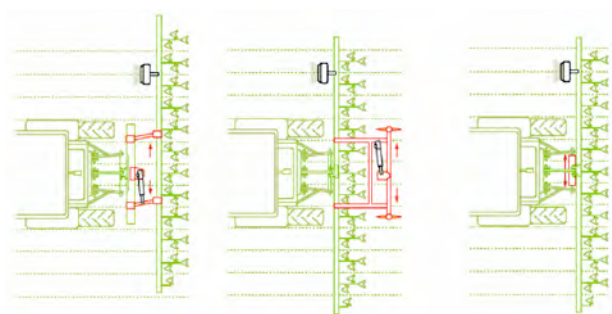
Una prima applicazione risale agli anni '90 con il sistema ECO-DAN in cui due telecamere a colori e un sistema di analisi dell'immagine consentono di individuare la presenza di infestanti sulla fila, guidando opportunamente i dispositivi di diserbo meccanico (Fig. 11).



**Figura 11.** Telecamera ECO-DAN per la gestione del diserbo meccanico sulla fila

La maggior parte dei costruttori di coltivatori interfila offre oggi dei modelli dotati di telecamera, di una ECU di controllo, un sensore di posizione e di un sistema attuatore idraulico.

La telecamera è posta sul telaio della macchina ed osserva la fila della coltura, mentre un anello di regolazione gestito dalla ECU rileva lo scostamento sulla fila e provvede alla regolazione laterale degli organi lavoranti con sistema a parallelogramma, a disco rotante o a spostamento laterale (Fig. 12).



**Figura 12.** Sistema di controllo automatizzato del coltivatore sulla fila mediante telecamera e dispositivo idraulico di posizionamento

In condizioni normali di lavoro, tali sistemi offrono una precisione di  $\pm 30$  mm operando ad una velocità dell'ordine di 10 km/h.

Il sistema è stato recentemente completato integrando i normali denti con un organo rotante per il diserbo tra le piante sulla fila. La velocità di rotazione del braccio operante tra le piante deve essere regolata opportunamente con continuità per tenere conto della variazione di distanza fra le diverse piante.

Rispetto al caso precedente l'algoritmo del sistema di visione risulta più complesso in quanto deve individuare sia la posizione della fila, sia quella della piante sulla fila stessa.

La macchina è in grado di fornire una capacità di lavoro di 2 piante/secondo per fila con una percentuale d'asportazione delle malerbe dell'98,5%.

Nel caso in cui il diserbo avvenga con mezzi chimici, l'innovazione riguarda lo sviluppo di tecniche di *trattamento localizzato*, con l'obiettivo di minimizzare la quantità di diserbante limitando la distribuzione alle sole aree che necessitano

effettivamente del trattamento.

Il sistema prevede una serie di telecamere poste sulla barra di distribuzione, un computer di controllo per l'analisi dell'immagine in grado di localizzare le posizione delle infestanti, ugelli dotati di valvole di controllo comandati dal sistema di localizzazione.

Particolarmente problematica è individuazione delle infestanti molto vicino o al di sotto della coltura e, pertanto, la velocità di avanzamento della macchina deve essere molto bassa, rendendo tale soluzione più adatta in prospettiva a macchine robotizzate prive di conducente.

Il trattamento localizzato con piattaforme autonome costituisce una tematica di grandissimo interesse che comporta tecniche altamente sofisticate per l'individuazione della pianta/infestante, l'azionamento e la regolazione degli ugelli e tutti gli aspetti della navigazione di macchine prive di conducente e sul quale sono attivi importanti progetti internazionali, fra i quali il recente progetto europeo CROPS, per un importo di 10 milioni di Euro, che veda la partecipazione anche del Dipartimento di Ingegneria Agraria di Milano.

### **3.3 Guida automatica**

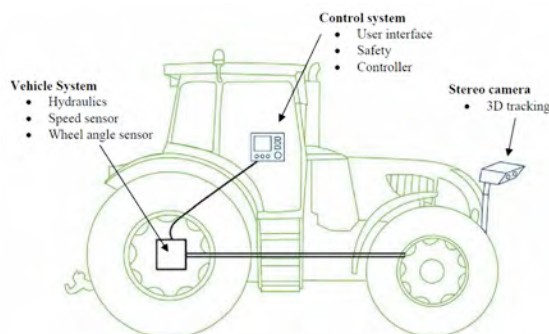
Caratteristica tipica dei lavori agricoli è le loro ripetitività e il prolungato orario di legato alla stagionalità e alla dipendenza dalle condizioni atmosferiche.

Ne deriva un elevato affaticamento del conducente impegnato con continuità, sia nella guida del mezzo, sia nella gestione e controllo dell'ottimale svolgimento dell'operazione in corso.

Da qui l'interesse per sistemi automatici di navigazione del veicolo quando si muove all'interno di strutture colturali, in grado di ridurre lo stress del conducente.

Al fine di ottenere la necessaria alta precisione nel movimento del veicolo, è necessario integrare il sistema di georeferenziazione GPS con tecniche di visione che, sulla base del riferimento della struttura (filare, andana, ecc.) colturale sulla quale si sta' operando, determina con la necessaria accuratezza la posizione del veicolo all'interno dell'appezzamento.

Il monitoraggio della coltura è fatto utilizzando telecamere 3D e rilevando l'altezza della coltura rispetto al piano terra, a sua volta determinato in base all' altezza e inclinazione della telecamera (Fig. 13).



**Figura 13.** Sistema di guida automatica sull'andana

Tra le prime applicazioni vi è la *guida all'interno dei vigneti* dove sistemi di visione in 3D provvedono, una volta che la macchina è giunta sul filare, a guidare l'avanzamento del mezzo senza l'intervento del guidatore, che è così libero di concentrarsi completamente sulla macchina operatrice. Un segnale acustico avverte il conducente quando si giunge al termine del filare e un sistema di sicurezza arresta il mezzo nel caso il conducente non riprenda la guida manuale.

L'accuratezza è dell'ordine dei  $\pm 30$  mm e il sistema può operare anche di notte sulla sola base delle normali luci di bordo.

Anche per quanto riguarda la *raccolta dei foraggi* la guida automatica trova un interessante campo di applicazione. Tramite appropriati sistemi di visione è possibile definire la struttura della coltura di fronte alla macchina durante la raccolta e guidare l'avanzamento della macchina da raccolta seguendo l'andamento dell'andana del prodotto da raccogliere (Fig. 14).



**Figura 14.** Trinciacaricatrice con sistema di guida automatica e controllo del riempimento del rimorchio

Operativamente è possibile avere una precisione della traiettoria della macchina con un tolleranza di  $\pm 50$  mm, per velocità dell'ordine dei 10 km/h, e di  $\pm 100$  mm, a 20 km/h.

Il sistema può essere completato con un dispositivo con un sistema di visione per l'*automazione del riempimento del rimorchio* per la raccolta del prodotto che affianca le macchine da raccolta.

In questo caso, infatti, l'operazione si presenta particolarmente faticosa per l'operatore che deve non solo guidare la macchina, ma anche dirigere il getto del prodotto all'interno del rimorchio di carico affiancato per sfruttare completamente il volume utile disponibile.

Il dispositivo prevede una telecamera 3D che inquadra e rileva il rimorchio e un computer di gestione che, sulla base del livello di riempimento e della disposizione del prodotto all'interno del rimorchio, comanda la rotazione del braccio di carico e l'inclinazione del deflettore al fine di ottenere una omogenea distribuzione del prodotto, sino al completo riempimento del rimorchio.

#### **4 LOGISTICA**

La logistica è quella parte della supply-chain che pianifica, implementa e controlla l'effettivo flusso e stoccaggio di beni, servizi e informazioni a essi correlate dal punto di origine al luogo di consumo per far fronte alle esigenze del cliente (Ricks et al., Council of Logistic Management, 2002). Dalla definizione si evince come il consumatore venga posto in primo piano e come le sue esigenze dettino l'organizzazione della logistica. Per logistica non s'intende, quindi, solamente una distribuzione fisica dei prodotti - trasporto dal luogo di produzione a quello di utilizzo - ma un processo trasversale di pianificazione, organizzazione e controllo delle attività finalizzate a rendere disponibile la cosa giusta, al momento giusto e nel luogo desiderato. Nel tempo, infatti, si è assistito al passaggio da un approccio funzionale della logistica a un integrato. L'approccio funzionale, il primo a essere sviluppato, vedeva le singole attività attribuite ad aree funzionali diverse, dislocate ai vari attori della catena; mentre quello integrato prevede l'integrazione all'interno dell'impresa e fra tutti gli attori della *supply chain* delle singole attività e una gestione unica delle stesse.

Alla logistica sono assegnati due obiettivi spesso difficili da conciliare:

- Ottimizzare l'efficienza interna aziendale, utilizzando in maniera ottimale le risorse e contendendo i costi connessi;
- Ottimizzare l'efficacia dell'azienda verso il mercato, con la capacità di soddisfare le esigenze del cliente (qualità, tempi e costi).

L'ottimizzazione dell'efficienza interna aziendale o della filiera può essere svolta tramite i seguenti processi:

- Riduzione dei costi di acquisto (economie di scala);
- Supporto alla produzione - riduzione delle rotture di "stock", migliore impiego (saturazione) degli impianti;
- Riduzione dei costi di trasporto e distribuzione;
- Riduzione dei costi di stoccaggio;
- Riduzione dell'immobilizzazione in scorte e dei relativi costi per oneri finanziari.

L'ottimizzazione dell'efficacia riguarda i seguenti aspetti:

- Rispetto dei tempi di consegna e delle quantità concordate (affidabilità);
- Riduzione dei tempi di consegna al cliente (tempestività);
- Riduzione dell'incidenza degli ordinativi evasi solo parzialmente;
- Personalizzazione del prodotto e servizio (flessibilità);
- Miglioramento dei servizi di assistenza post-vendita (prestazioni in garanzia, parti di ricambio);
- Miglioramento rapporto qualità/prezzo del prodotto.

La logistica gioca un ruolo importante nell'agricoltura di oggi, dove nuove sfide (colture geneticamente modificate, globalizzazione, tracciabilità, distribuzione del prodotto locale, macchine di raccolta ad elevata capacità, richiesta di qualità e diversificazione dei prodotti agroalimentari, impatto ambientale), e nuove opportunità (filieri agro energetiche, tecnologie GPS, commercio elettronico, nuovi metodi di ricerca operativa, tecnologie informatiche e di comunicazione) richiedono



un'ottimizzazione del flusso dei prodotti e delle informazioni a essi correlate.

Alcune metodologie logistiche proprie del settore industriale possono essere utilizzate in agricoltura, tuttavia occorre adattarle alle caratteristiche delle filiere agricole (trasporto e stoccaggio di prodotto deperibile, produzione e domanda stagionale, vincoli di tempestività, vincoli di sicurezza alimentare). In alcuni casi occorrono invece delle metodologie completamente nuove. La logistica in agricoltura si presenta ancora come un "green field", in altre parole un campo dove la ricerca è solo agli inizi.

#### **4.1 Applicazioni logistiche per le filiere agroalimentari.**

Passiamo ora a esaminare i principali campi di applicazione della logistica alle filiere agroalimentari.

##### **4.1.1 La logistica applicata all'operazione di raccolta di prodotti agricoli**

Un miglioramento logistico aziendale comporta un più razionale flusso di lavoro e una migliore gestione del parco dei veicoli per incrementare l'efficienza e l'efficacia delle operazioni (Auernhammer 2001). Le operazioni di raccolta di prodotti vengono svolte da un insieme di macchine connesse tra loro a formare un sistema (Busato, Berruto et al. 2005). Il sistema è un insieme ordinato di entità fisiche o astratte interconnesse tra loro, caratterizzato dalle seguenti proprietà:

- Complessità. E' descritto da molte relazioni tra gli oggetti che lo compongono;
- Interattività. E' costituito da un numero di componenti che interagiscono reciprocamente;
- Dinamicità. Il suo comportamento varia nel tempo.

Come risultante ne abbiamo che la capacità di una macchina nel sistema può limitare la performance dell'operazione di raccolta e trasporto nel suo complesso. Quindi, l'esecuzione delle operazioni di campo da una macchina o da più macchine in cooperazione, deve essere pianificata attentamente in modo da raggiungere la massima efficienza operativa, considerando unitamente le operazioni logistiche. Questo aspetto è ancora più evidente a seguito della comparsa sul mercato di macchine per la raccolta molto performanti, che richiedono un adeguato dimensionamento del cantiere di trasporto e la predisposizione di stoccaggi temporanei.

Un metodo tradizionale di valutazione dei sistemi complessi è l'analisi del ciclo, che considera tutti i tempi di permanenza delle macchine nel sistema. Questa procedura può essere utile a identificare i sistemi di trasporto adatti alle operazioni in campo (Buckmaster and Hilton 2005). Tuttavia, questo è uno strumento statico che non prende in considerazione la variabilità della velocità, le produzioni raccolte e l'aspetto dinamico del sistema.

In Australia, ad esempio, per far fronte alle carenze del sistema di trasporto, vengono impiegati dei silos temporanei in campo, il cui posizionamento ottimale, con l'utilizzo della simulazione discreta ad eventi, ha consentito una riduzione fino al 14% dei tempi di lavoro (Busato, Berruto et al. 2007; Busato, Berruto et al. 2008).

Una soluzione innovativa in merito agli stoccaggi temporanei è costituita dai silobags, cilindri di film plastico riempiti con granella, della capacità di 200 t ciascuno (Bartosik, Rodríguez et al. 2008). L'adozione di tale sistema di raccolta riguarda 60 milioni di tonnellate di cereali nella sola Argentina. Il basso costo di stoccaggio, unito alla possibilità di suddividere in fasi successive la raccolta e il trasporto, comporta

risparmi fino a 138 \$/ha per quanto riguarda la soia (Berruto, Busato et al. 2011).

Alcuni autori hanno investigato l'uso di soluzioni intermodali, con scambio di prodotto tra i mezzi di trasporto. Lo scopo era quello di aumentare l'efficienza del sistema utilizzato dagli agricoltori per fare fronte alla maggiore capacità di raccolta delle nuove mietitrebbie (Bernhardt, Lixfeld et al. 2010). Le differenze di costi tra i sistemi esaminati sono state fino a 8 €/t. Al disotto dei 9 km di distanza dal centro di stoccaggio sono convenienti i rimorchi agricoli. A distanze maggiori una soluzione economica è l'uso di uno stoccaggio intermedio dove i mezzi asserviti alla mietitrebbia scaricano il loro prodotto, simile alla soluzione utilizzata dalla raccolta dei grandi appezzamenti nell'Australia del sud (Busato, Berruto et al. 2008).

L'essiccazione lenta è invece una metodologia che si svolge direttamente nei silos di stoccaggio. In questo caso il vantaggio logistico è dovuto al fatto che l'essiccatoio non è un componente limitante nella capacità del sistema di raccolta e trasporto della granella, in quanto la sua capacità è pari a quella dei silos di stoccaggio. L'essiccazione avviene a bassa temperatura, grazie ad un sistema automatico di controllo che gestisce il ventilatore e un piccolo bruciatore ausiliario (Bartosik and Maier 2004; Bartosik, Berruto et al. 2007). Il controllo di tale processo consente di ottimizzare l'essiccazione dal punto di vista energetico e protegge la qualità della granella. I risparmi complessivi ottenibili nell'utilizzo di tale tecnica sul risone sono di circa 25 \$/t, dei quali 8,5 \$/t sono ascrivibili al miglioramento della logistica connessa alle operazioni di raccolta e trasporto del prodotto (Berruto, Busato et al. 2011).

Al fine di ottimizzare il sistema aumentando la produttività delle operazioni di raccolta trasporto e riducendo i tempi di servizio degli automezzi, l'organizzazione delle operazioni di scarico del prodotto presso i grandi centri di stoccaggio nel Nord America è stata oggetto di numerosi studi. Processando i carichi a gruppi contenenti la granella omogenea (BATCH), si sono ottenuti risparmi del 27% nei tempi di scarico rispetto alla gestione FIFO (first-in, first out) delle code degli automezzi (Berruto and Maier 2001). Tuttavia, se l'impianto presenta un tasso di impiego delle macchine inferiore al 70% risulta più conveniente la gestione FIFO delle code. Per velocizzare le operazioni di scarico del prodotto sono state realizzate delle buche che contengono 28 t di prodotto e permettono di scaricare un autotreno senza lo spostamento del medesimo, con una riduzione di 1.6 min per automezzo scaricato. I risultati scaturiti dal GANTT sono stati analizzati con modelli di simulazione di tipo regionale, considerando unitamente tutte le aziende che conferiscono al medesimo impianto (Berruto, Busato et al. 2008). Il lavoro ha evidenziato come nei giorni di punta, sempre più frequenti a causa dell'aumento di capacità delle mietitrebbie, si possa ritirare il 17% di prodotto in più e che i tempi di servizio si riducono in media di 35 min/carico (riduzione del 34% nei tempi di servizio).

Alcuni articoli prodotti su base annuale sulle riviste di ricerca operativa presentano una revisione dei lavori relativi alla logistica svolti nel settore agroalimentare (Ahumada and Villalobos 2009). Si rimanda a questi per esaminare altri paper non oggetto di questa relazione.

#### **4.2 Applicazione del Vehicle Routing Problem per l'ottimizzazione dei trasporti**

Il trasporto è un link chiave nella supply chain alimentare ed agricola, provvedendo a servizi essenziali per la società. Allo stesso tempo esso è il maggiore responsabile di un effetto negativo sull'ambiente e per questo necessita di sforzi per migliorarne

l'efficienza economica, così, come quella ambientale. Il settore dei trasporti è il responsabile del 21% delle emissioni totali di gas a effetto serra nell'area EU a 15 paesi e del 87% dell'aumento di emissioni di gas dal 1990 (EEA 2007). Le esternalità dei costi di trasporto, considerando gli incidenti, l'inquinamento dell'aria e i cambiamenti climatici (non considerando le infrastrutture, la congestione ed il rumore), sono state stimate al 7% del PIL europeo e per il trasporto su gomma (veicoli pesanti) sono stati stimati costi marginali corrispondenti per € 0.26-0.92/veicolo-km (EEA 2005). L'ottimizzazione dei trasporti è un problema da tempo studiato dagli esperti di ricerca operativa.

Con l'acronimo di VRP o *vehicle routing problem*, si intendono tutti i problemi di pianificazione dei percorsi dei veicoli adibiti a consegne multiple. La versione più semplice del VRP vede un insieme di clienti distribuiti nel territorio, ognuno dei quali ha una domanda di un certo tipo di merce. I clienti possono essere serviti con un parco di veicoli, la cui capacità di carico è limitata, localizzati in corrispondenza di un deposito.

L'obiettivo del VRP è servire tutti i clienti minimizzando la lunghezza complessiva dei percorsi dei diversi veicoli, con conseguente diminuzione dei costi e dei tempi dei trasporti per l'azienda (funzioni obiettivo nella programmazione lineare).

Gli articoli sul VRP si concentrano normalmente sull'instradamento di prodotti normali (Bodin, Golden et al. 1983; Solomon and Desrosiers 1988). Pochi studi riguardano la distribuzione di prodotti refrigerati (Tarantilis and Kiranoudis 2002 ; Tarantilis and Kiranoudis 2005; Dabbene, Gay et al. 2008).

Chaug e Sheng nel 2003, nel loro lavoro estendono il VRP con finestra temporale considerando la casualità dei processi di distribuzione dei cibi refrigerati e costruiscono un modello VRPTW (Vehicle Routing Problem with Temporal Window) per risolvere l'ottimale pianificazione dei trasporti. La funzione obiettivo del modello cerca di minimizzare la somma dei costi di trasporto, di inventario e quelli energetici. Tra questi, i costi di trasporto dipendono dal chilometraggio della strada pianificata, mentre i costi dell'inventario si basano sulla deperibilità dei cibi freschi. I costi energetici sono dovuti ad un consumo energetico extra delle attrezzature frigorifere dei veicoli. Lo studio formula inoltre una funzione tempo dipendente del deterioramento del prodotto refrigerato e calcola la probabilità che il deterioramento si presenti e valuta quante perdite può causare (Chaug-I and Sheng-F 2003).

In agricoltura il VRP è stato solo recentemente introdotto per la pianificazione ed esecuzione delle operazioni in campo, nonostante il fatto che quasi tutte queste (Agricultural Field Operations) coinvolgano intrinsecamente il movimento dei veicoli (Bochtis and Sørensen 2009; Bochtis and Sørensen 2010).

Molte operazioni agricole di campo prevedono un numero elevato di compiti interconnessi, eseguiti da un sistema di macchine eterogenee. Sistemi complessi di macchine sono coinvolti nel flusso di materiali in uscita (es. raccolta), così come nel flusso di materiali in ingresso (es. irrorazione e fertilizzazione). Essi sono composti da un numero di unità primarie (PUs) supportate da un numero di unità di servizi, principalmente di trasporto (SUs).

Queste operazioni richiedono uno sforzo considerevole in termini di compiti manageriali di scheduling e pianificazione. Nella seconda parte del lavoro si descrive un approccio teorico per rappresentare la pianificazione e lo scheduling dei compiti per le unità di servizio-trasporto (SUs) come ad esempio i problemi di ottimizzazione

combinatoria, vehicle routing problem con finestra temporale (VRPTW). E' stato dimostrato come il problema di scheduling e pianificazione per le SUs nei sistemi convenzionali di macchinari, così come nei sistemi emergenti dei robot, possa essere descritto come esempio di VRPTW e conseguentemente essere risolto usando un metodo avanzato sviluppato per la risoluzione di alcuni casi illustrati.

Sono importanti i risparmi ottenibili nella gestione del traffico controllato sugli appezzamenti derivante dall'adozione di tali metodologie, con effetti importanti anche sulla sostenibilità delle operazioni agricole (Bochtis, Sørensen et al. 2010).

Alcuni lavori presentati recentemente all'ASABE meeting hanno evidenziato come sia possibile utilizzare questi algoritmi per la definizione di percorsi ottimali per la raccolta delle balle prismatiche giganti in campo. L'utilizzo di dispositivi di accumulo delle balle lungo alcune direttrici trasversali al campo, accoppiati alle imballatrici giganti, ha consentito risparmi nei tempi di lavoro del 25% per l'attività di raccolta e carico delle balle sugli autocarri rispetto al modello VRP che ottimizzava la raccolta delle balle nella posizione originale in campo, senza l'utilizzo di accumulatore (McNaull, Webster et al. 2011).

#### **4.3 Gestione dei lotti e tracciabilità delle filiere**

La tracciabilità è un requisito fondamentale per le filiere agroalimentari. Essa è diventata obbligatoria nella gran parte degli Stati europei. L'obiettivo principale di un sistema di tracciabilità è di registrare in modo accurato la storia e la dislocazione dei differenti prodotti lungo la filiera. L'informazione raccolta diventa strategica nel caso sfortunato nel quale un lotto di prodotto debba essere richiamato in quanto difettoso (Dupuy, Botta-Genoulaz et al. 2005; Bechini, Cimino et al. 2008). Un modello di ottimizzazione della dimensione dei lotti, espresso sotto forma di programmazione lineare intera-mista, è applicato a una numerosa serie di casi dagli autori (Dabbene and Gay 2011). In questo articolo vengono presentati nuovi criteri e metodologie di ottimizzazione delle performance dei sistemi di tracciabilità e rintracciabilità. Differenziandosi dai precedenti metodi in uso che ottimizzavano le misure indirette, l'approccio proposto prende in esame il peggiore caso di quantità media di prodotto che dovrebbe essere richiamato nel caso di una perdita di controllo. Esempi numerici testimoniano l'efficacia della metodologia proposta, sia in termini di prestazioni che di costi computazionali.

Un altro lavoro identifica altri fattori chiave nella performance dei sistemi di tracciabilità e rintracciabilità oltre alla tradizionale dimensione dei lotti, quali le modalità ed i lead-time nel trasporto del prodotto, l'ammontare del prodotto stoccato lungo la filiera, la modalità ed i lead-time nel passaggio dell'informazione. Allo scopo è stato implementato un modello in grado di tracciare ogni singolo collo di prodotto (Busato and Berruto 2009).

Due livelli di tracciabilità sono stati valutati per quanto riguarda la raccolta e il trasporto del riso. Sono stati messi a confronto la possibilità di tracciare la varietà, ovvero quella attualmente utilizzata per la raccolta del riso, e la tracciabilità di appezzamento, dove ogni singolo appezzamento viene raccolto separatamente. I maggiori costi per l'operazione di raccolta e trasporto ammontano a circa 14€/ha (80% dei quali sono attribuibili a costi aggiuntivi di trasporto), senza considerare gli effetti importanti sul sistema di stoccaggio (Berruto and Busato 2008).

Un modello di simulazione è stato sviluppato per evidenziare costi logistici derivanti dalla tracciabilità del frumento, considerando incertezze nella domanda, disponibilità di treni per il trasporto e tempi di transito del prodotto. Lo studio ha evidenziato l'aumento di costi logistici all'aumentare della segregazione e della suddivisione in lotti (Schlecht 2004).

La gestione dei cereali geneticamente modificati ha effetti considerevoli sui processi post-raccolta nei centri di stoccaggio del Nord America, in quanto trattasi a tutti gli effetti di un prodotto (soia OGM-free) da mantenere in purezza, e che si innesta, come flusso tra quelli dei cereali tradizionalmente conferiti in autunno (mais umido, mais secco e soia). Per ridurre l'impatto, tra le strategie è stata scelta l'assegnazione di una buca per lo scarico ad orari dedicati per il prodotto OGM-Free. Ciò ha portato, rispetto ai sistemi senza scheduling, ad una riduzione del 16-20% dei tempi di servizio per mais e soia OGM, mentre i tempi di servizio delle consegne OGM-free si sono ridotti del 56-60% (Berruto and Maier 2002).

#### **4.4 La logistica e la distribuzione del prodotto deperibile**

La filiera studiata in questo caso va dal produttore al consumatore. Ciò comporta effetti sul prodotto importanti, con la variazione della shelf-life al punto vendita, unitamente a differenze importanti nei costi di gestione. Uno studio francese suggerisce l'implementazione di sistemi EDI (Electronic data interchange) tra produttori e grande distribuzione, citando una strategia messa in atto da CARREFOUR (J.C. Montigaud 1995). Oggi, a distanza di 15 anni, tutti i produttori che vogliono fornire direttamente alla grande distribuzione sono dotati di questo sistema di trasmissione elettronica dei documenti di trasporto.

Studi sulle pesche nettarine hanno evidenziato come fosse possibile aumentare la shelf-life del prodotto di 22 h nel caso in cui il prodotto venga distribuito direttamente dalla centrale di confezionamento al punto vendita, evitando la piattaforma di distribuzione (Berruto, Gay et al. 2003).

Un tentativo analogo è stato fatto per aumentare la qualità al punto vendita di fragole, zucchini e pomodori, mediante una gestione diversa del magazzino con un aumento, tuttavia, della percentuale di ordini inevasi e dei costi complessivi di gestione (Busato and Berruto 2006).

Un altro lavoro riguarda l'ottimizzazione della catena organizzativa dei prodotti freschi, cioè ortofrutticoli di 1<sup>a</sup> e 4<sup>a</sup> gamma, frutta e carne, in condizioni di incertezza (delle vendite). Lo scopo è ottimizzare la catena organizzativa del fresco per gestire il costo opportunità tra i costi logistici e alcuni indici misuranti la qualità del cibo, come viene percepita dal consumatore: maturazione, cambiamento della carica microbica o temperatura interna. La supply chain e il comportamento di un prodotto durante la consegna sono descritti usando un modello ibrido consistente di due parti. La prima prende in considerazione la dinamica guidata dagli eventi (tipicamente la gestione dei prodotti), mentre la seconda descrive le dinamiche guidate dal tempo (le dinamiche di alcuni parametri caratterizzano la produzione del cibo nella supply chain). Le prestazioni della supply chain, espresse in termini sia di costi logistici che di qualità finale, sono poi migliorate usando un algoritmo specifico di ottimizzazione che usa il modello per garantire la fattibilità delle soluzioni ottimali proposte (Dabbene, Gay et al. 2008; Dabbene, Gay et al. 2008; Gay 2008).

#### **4.5 La logistica applicata alla distribuzione del prodotto locale.**

La concentrazione di popolazione nelle grandi città, difficilmente consentirà lo sviluppo della filiera del prodotto locale, tuttavia, essa va sostenuta per i vantaggi in termini di salubrità, qualità, sviluppo delle produzioni e dell'economia locale. Inoltre, in alcuni scenari potenziali di aumento notevole dei costi energetici, i ridotti costi di trasporto per la filiera locale possono renderla concorrenziale (Berruto and Busato 2009). L'interesse è notevole anche per i paesi in via di sviluppo (Batt and Parining 2000).

La logistica del prodotto locale deve mettere a punto le strategie opportune per la distribuzione, che tengano conto dei bassi volumi e del limitato bacino di utenza che caratterizza questi prodotti. Per quanto riguarda la ricerca, occorre che la comunità scientifica studi delle forme alternative di distribuzione e di logistica, considerando che la complessità nella distribuzione deriva dai piccoli volumi e dal raggruppamento di prodotti che vengono distribuiti contemporaneamente. Le strategie per rendere efficace ed economica la distribuzione del prodotto locale devono considerare le peculiarità dei canali distributivi, in termini di packaging, tempi di consegna, tracciabilità, informazioni sulla disponibilità del prodotto in termini temporali e sui diversi servizi che fanno parte del customer service (Berruto and Busato 2009).

Tra i fattori strategici ci sono la location del punto vendita o delle consegne rispetto alla produzione, il raggruppamento di ordini e consegne sia nello spazio (location prestabilite) che nel tempo (orari prestabiliti).

#### **4.6 La condivisione dell'informazione lungo la filiera agroalimentare e algoritmi di previsione della domanda**

La condivisione dell'informazione in tempo reale nella filiera agroalimentare è oggi possibile grazie agli avanzamenti tecnologici importanti disponibili per le aziende (Electronic Data Interchange, Internet, e-commerce).

Con l'obiettivo di verificare il valore economico dell'informazione, si sono simulati tre diversi livelli di condivisione tra la piattaforma di distribuzione e il punto vendita, relativamente alle politiche di distribuzione di prodotto in caso di carenza del medesimo (Busato, Berruto et al. 2007; Busato, Berruto et al. 2007). Nei confronti della politica proporzionale, dove viene condivisa come informazione solo la quantità ordinata dai singoli negozi, la policy lagrangiana aumenta il profitto del 19-24%, mentre la policy che considera il livello di servizio presenta risultati intermedi con aumento del 9-12%.

Anche i comportamenti del consumatore hanno effetti importanti sulla performance dei sistemi di gestione degli ordini (Busato, Berruto et al. 2008). Per i prodotti a domanda stagionale sono state effettuate delle simulazioni con lo scopo di valutare diversi metodi di previsione della domanda (media mobile su due e quattro periodi e smorzamento con stagionalità). Sono stati rilevati i dati di domanda e di inventario giornaliero di tre prodotti commercializzati da Eataly (A, B, C) caratterizzati appunto da domanda stagionale. Le quantità vendute giornalmente sono state raggruppate su base settimanale. Sono stati ipotizzati ordini con frequenza settimanale e con lead time pari ad una settimana ( $LT=1$ ), ovvero gli ordini vengono consegnati la settimana successiva all'ordine. Nel caso del prodotto A, citato come esempio, la giacenza media del medesimo con la politica ordini di Eataly risulta pari a 477 unità contro quella stimata dal modello messo a punto (smorzamento con stagionalità) pari a 60 pezzi, con una

riduzione dell'inventario del 87% (Pedroni 2009).

La conoscenza dell'informazione, opportunamente aggregata, può migliorare la performance dei processi produttivi agroalimentari. Un modello di programmazione lineare mista intera è stato applicato alla gestione degli inventari e all'imbottigliamento del vino. Il modello prevede come output l'imbottigliamento di un numero intero di pallets, ciascuno contenente 330 bottiglie (Berruto, Gay et al. 2004; Berruto, Tortia et al. 2006). Gli output indicano settimana per settimana, sulla base dei prodotti a magazzino, della domanda corrente, e delle necessità di stoccaggio stagionale, quale gruppo vino-vetro imbottigliare. Questo tipo di output consente di pianificare la produzione con un miglioramento della gestione (riduzione inventari, mancanza di rotture di stock), evitando situazioni di emergenza che spesso si verificano nelle catene di imbottigliamento dei prodotti.

#### **4.7 La logistica della raccolta della biomassa**

La maggiore parte dei costi nella generazione di energia da biomassa si origina proprio da operazioni logistiche.

Alcuni studi sono stati eseguiti per prevedere il contributo della biomassa sulle forniture energetiche future, sia a livello regionale che globale (Yamamoto H, Fujino J et al. 2001; Berndes G, Hoogwijk M et al. 2003; Jager-Waldau A and H. 2004). Tutti questi studi ipotizzano un aumento dell'utilizzo della biomassa negli anni a venire. Tuttavia non si trova un consenso sul livello di sfruttamento massimo raggiungibile con la biomassa, in quanto questo è fortemente influenzato dalle condizioni logistiche al contorno della medesima (disponibilità di infrastrutture, stoccaggi, ecc.). Questa considerazione lascia intravedere un crescente interesse per gli aspetti logistici.

##### **4.7.1 Valutazione della biomassa potenziale con applicazioni GIS**

Una serie di lavori si concentra principalmente sulla valutazione della biomassa potenziale (Caprara, Gabellini et al. 2007; Velazquez-Martí 2008; Velazquez-Martí and Annevelink 2009) e l'assegnazione dei siti di raccolta delle biomasse e degli impianti di produzione di energia (Iakovou, Karagiannidis et al. 2010).

Alcuni lavori sono volti all'analisi dei residui di potatura di vigneti, mandorleti e uliveti (Velázquez-Martí, Fernández-González et al. 2010; Velázquez-Martí, Fernández-González et al. 2011), anche se la bassa quantità di residui per ettaro è un fattore che limita pesantemente lo sviluppo di tali filiere, ai prezzi attuali del combustibile fossile. I lavori si limitano spesso alla definizione delle quantità disponibili senza indicare nello specifico la necessità di mezzi o la pianificazione delle operazioni di raccolta.

##### **4.7.2 Verifica dei costi logistici ed ottimizzazione delle operazioni di raccolta e trasporto della biomassa**

L'utilizzo di più fonti di biomassa, specialmente se trattasi di residui con quantità limitata a disposizione, diminuisce i costi totali del sistema poiché si risparmia sulla fase dello stoccaggio, poiché un flusso in entrata di biomassa regolare lungo l'anno può diminuire le superfici a magazzino richieste. Inoltre, risparmi aggiuntivi si possono ottenere da un flusso regolare lungo la supply chain della biomassa a livello di attrezzature e laboratorio (Rentizelas, Tolis et al. 2009). Nel lavoro di Nilsson si riporta che dall'utilizzo di due biomasse si è ottenuta una riduzione del 15-20% dei costi



rispetto all'uso di una sola biomassa, dimostrando il potenziale vantaggio di questa soluzione (Nilsson 2001).

Quest'approccio però comporta degli svantaggi, in ultima analisi sintetizzabili in:

- Complicazione della logistica. Aspetti organizzativi, variazioni di disponibilità, stoccaggio di sicurezza, specialmente nei mesi invernali, sono questioni che richiedono studi più dettagliati (Faaij A, Van Ree R et al. 1997);
- Adattamento della tecnologia di conversione energetica per usare un mix di combustibili, comprendente diversi tipi di biomassa con differenti caratteristiche, o combustibili che variano le loro caratteristiche in accordo alle stagioni dell'anno.

Alcuni lavori hanno verificato la fattibilità economica dell'utilizzo della biomassa per la produzione di energia elettrica attraverso la combustione o la conversione con gassificazione, su impianti di diversa taglia. Il confronto tra le due tecnologie è stato fatto nel range da cinque 5 a 50 MW considerando gli investimenti di capitale, la vendita dell'energia, i costi di gestione e la valutazione dettagliata dei costi logistici, in quanto anch'essi hanno una influenza importante sulla convenienza economica (Caputo, Palumbo et al. 2005). L'analisi indica come impianti sotto i 30 MW abbiano un valore attuale netto inferiore a zero mentre per gli impianti sopra i 30 MW, la redditività sia maggiore per gli impianti gassificazione in quanto utilizzano quantità inferiori di biomassa e sono quindi meno gravati dai costi logistici. Questi ultimi però presentano costi di investimento molto elevati.

La canna da zucchero, grazie alla elevata quantità di biomassa prodotta, è stata sempre oggetto di studi logistici per l'ottimizzazione dei trasporti ed il contenimento dei costi (Hansen, Barnes et al. 2002). Nel lavoro è presentato un metodo di segmentazione dell'appezzamento in singole passate in modo da semplificare la simulazione delle operazioni logistiche su appezzamenti di forma irregolare. Un modello stocastico di pianificazione dei trasporti di canna da zucchero che stima il numero di carri, turni e bins richiesti è stato messo a punto per le produzioni australiane (Higgins and Davies 2005).

Sebbene ricerche scientifiche abbiano contribuito allo sviluppo di modelli per uno scheduling off-line delle operazioni in campo coinvolgenti flotte di macchine agricole, l'esecuzione effettiva di queste operazioni è nella maggior parte dei casi, eseguita basandosi sull'esperienza degli operatori e senza alcuna pianificazione on-line ottimale. Alcuni approcci promettenti riguardanti la pianificazione on line (Bochtis, Vougioukas et al. 2007), presentano una procedura algoritmica basata sulla programmazione dinamica per la pianificazione delle operazioni di raccolta.

Alcuni studi sull'imballatura dei residui della canna da zucchero in Brasile hanno indicato che la maggiore densità delle balle giganti prismatiche unite al maggiore utilizzo dello spazio sui mezzi di trasporto riduce i consumi energetici per il trasporto del 20%. Questo tipo di indagine permette di selezionare metodi di operazione alternativi nell'ambito delle filiere di produzione di energia da questo tipo di biomassa, aumentando la sostenibilità del processo (Romanelli, Berruto et al. 2010).

Il trasporto del cippato proveniente da SRF è influenzato dalla capacità di lavoro delle macchine, dalla densità del prodotto e può essere eseguito con diversi metodi. L'indagine indica come dai 9 ai 13 km l'uso delle trattrici con rimorchi sia la possibilità più economica. A distanze superiori sono convenienti sistemi intermodali con scarico

dei rimorchi su autotreni (Handler and Blumauer 2010).

Un lavoro presenta l'applicazione di un modello messo a punto per la raccolta dei residui del cotone (Ravula, Grisso et al. 2008). La simulazione ha dimostrato come sia possibile incrementare l'utilizzo dell'impianto di ricevimento dal 69 al 77%, con un incremento del 99% dell'efficienza dei sistemi di trasporto, a patto che la tecnologia disponibile consenta ai manager dell'impianto di conoscere la disposizione sul territorio dei moduli della biomassa prodotta, ed essi possano assegnare in modo diretto gli automezzi per il trasporto.

Altri studi sulla raccolta degli steli di cotone per la produzione di biomassa indicano dei vantaggi nella gestione della filiera con possibili riduzioni dei costi se gli agricoltori vengono coinvolti nel processo (Tatsiopoulos and Tolis 2003). La riduzione dei costi di trasporto può essere fino al 57% del prezzo originario (da 5,8 a 2,5 €/t SS).

Alcuni lavori hanno investigato la raccolta del silo mais finalizzata alla produzione di energia in impianti a biogas utilizzando analisi di ciclo (Harrigan 2003) e modelli di simulazione, in combinazione con strumenti di programmazione lineare (Berruto and Busato 2008; Berruto and Busato 2008). I costi di raccolta, trasporto e stoccaggio variano da 15 a 23 €/t SS, a seconda che la raccolta avvenga in un raggio di 5 o 20 km, mentre l'energia consumata per tali operazioni è pari al 2,6-5,8% di quella contenuta nella biomassa, se si passa da 5 a 20 km. L'utilizzo di macchine con capacità più elevata (testata 8 file) comporta costi di da 22 a 32 €/t SS su distanze tra 10 e 40 km (Busato, Berruto et al. 2008).

La raccolta di residui (paglia di riso, stocchi di mais), a causa della bassa produzione per ettaro associata alla necessità della loro rimozione tempestiva dal campo per permettere le operazioni di preparazione del terreno per la coltura primaverile, comporta costi più elevati di quelli del silo mais. Per la paglia di riso raccolta nell'areale del vercellese, i costi sono di 33 €/t SS se la raccolta avviene in un raggio di 5 km, per arrivare a 77 €/t SS se la raccolta avviene nel raggio di 15 km.

In Canada la raccolta degli stocchi di mais, effettuata in primavera prima della lavorazione del terreno, e il trasporto in azienda comportano costi di 26-32 \$/t SS, a seconda che si usino le balle prismatiche giganti con un numero adeguato di mezzi di trasporto, oppure un numero sub-ottimale di rimorchi per il trasporto e l'utilizzo di rotoballe, che sfruttano meno la capacità di carico di rimorchi e autocarri (Berruto, Busato et al. 2010).

Sono disponibili modelli di simulazione dell'intera filiera di raccolta, trasporto, stoccaggio e pre-trattamento della biomassa, finalizzati alla determinazione, su base regionale delle dimensioni dei cantieri a utilizzare biomassa dei campi degli impianti di processo (produzione di bioetanolo con impianti di seconda generazione, combustione di biomassa per la produzione energia termica ed elettrica).

Un modello denominato Integrated Biomass Supply Analysis and Logistics (IBSAL) model è stato sviluppato nell'Oak Ridge National Laboratory (Sokhansanj, Amit et al. 2006; Kumar and Sokhansanj 2007; Ravula, Grisso et al. 2008). IBSAL è un modello di simulazione dinamica ad eventi discreti per una analisi integrata della biomassa e la logistica costruito con il software *Extendsim®* (Berruto and Maier 2001). Tale modello viene utilizzato per simulare la raccolta, lo stoccaggio, le operazioni di trasporto per conferire la biomassa agricola alle bioraffinerie. Il modello consiste di eventi temporali dipendenti rappresentanti il tasso di lavoro delle attrezzature e le code rappresentanti la

capacità delle strutture di stoccaggio. Nel modello sono calcolati non solo i costi ma anche le emissioni di CO<sub>2</sub> e l'energia consumata nelle attività logistiche.

#### **4.8 Gruppo di lavoro CIGR sulla logistica**

Ancora poche ricerche specifiche per l'agricoltura sono svolte a livello mondiale sull'argomento e occorre condividere informazioni e metodologie per diffonderne la conoscenza.

Lo scrivente ha ottenuto l'approvazione di un gruppo di lavoro sulla logistica da parte della CIGR, nell'ambito della V Sezione – Management and System Engineering, del quale è presidente.

Gli obiettivi di tale gruppo sono i seguenti:

- Condividere la metodologia e la tecnologia per la gestione ottimale della logistica in ambito aziendale extra - aziendale e regionale;
- Sviluppare metodi e strumenti per migliorare l'efficienza delle operazioni logistiche, che considerino aspetti tecnici, economici ed ambientali;
- Indicare i parametri standard da utilizzare nelle simulazioni e nelle metodologie di verifica delle operazioni in campo per consentire la comparazione fra sistemi logistici esaminati da autori diversi.

Con l'attivazione del gruppo "Logistics" si intende promuovere una network per organizzare workshop specifici sull'argomento, per scrivere articoli inerenti le ricerche in questo ambito e per collaborare con colleghi di altre discipline che hanno punti di contatto con la logistica, inclusa l'industria ed i servizi di assistenza tecnica.

### **5 CONCLUSIONI**

Il quadro descritto, assolutamente incompleto, ha soltanto indicato alcune linee generali dei più recenti sviluppi dell'innovazione nel settore della meccanica agraria.

Per quanto riguarda le macchine motrici, che rappresentano ormai un settore ampiamente maturo, la sostenibilità ambientale si pone come aspetto ampiamente prioritario.

Gli obiettivi principali riguardano il risparmio di materiale mediante l'ottimizzazione progettuale, la riduzione di consumi con un intelligente rapporto con le macchine operatrici, l'attenzione verso combustibili alternativi, la protezione dell'ambiente e dell'operatore.

Nelle macchine operatrici agli aspetti ambientali si uniscono quelli funzionali, in termini di ottimizzazione delle prestazioni e agevolazione dell'opera umana di controllo mediante l'automazione delle operazioni.

Lo sviluppo dell'automazione, tuttavia, deve costituire un aspetto progettuale intrinseco della macchina e armonicamente inserito nella stessa, così da costituire, nella sua complessità, un componente tecnologico robusto e maturo in grado di offrire la necessaria affidabilità. Il quadro descritto, assolutamente incompleto, ha soltanto indicato alcune linee generali dei più recenti sviluppi dell'innovazione nel settore della meccanica agraria.

La logistica è una disciplina che da pochi anni è diventata un settore di ricerca in agricoltura. Molte delle tecniche e delle metodologie sono implementate da quanto messo a punto per i processi industriali.

Sebbene da alcuni anni si sia assistito a un progressivo interessamento alle operazioni logistiche da parte di ricercatori nel settore agroalimentare, occorre una maggiore integrazione tra chi studia l'evoluzione della qualità delle derrate (deperibili e non) e coloro che nel nostro settore si occupano della logistica a livello di decisioni strategiche, tattiche e operative.

Allo stesso modo occorrerà formare gruppi di lavoro per la logistica della biomassa che, grazie all'espansione delle filiere agri energetiche, sta diventando un settore di interesse cruciale, sia per la produzione di biogas su impianti di piccola-media taglia, per arrivare ai grandi impianti per la produzione di bioetanolo.

Le soluzioni presentate in questo lavoro toccano diversi aspetti, tutti importanti ai fini della determinazione dei costi e della sostenibilità delle operazioni logistiche.

Molte delle soluzioni di ottimizzazione proposte, con lo scambio d'informazioni e con investimenti minimi, possono diminuire i consumi energetici e i costi di alcuni punti percentuali, fornendo così un contributo importante alla competitività delle aziende, alla diminuzione delle emissioni e del consumo di energia da fonti fossili, così come auspicato dalla politica energetica e climatica dell'Unione Europea.

## 6 BIBLIOGRAFIA

### 6.1 L'innovazione e sostenibilità nella progettazione delle macchine motrici

- Billingsley, J. & Schoenfisch, M. The successful development of a vision guidance systems for agriculture, *Computers and Electronics in Agriculture*, 1997, Vol. 16, pp. 147-163
- Buning, E. Electric drives in agricultural machinery: approach from the tractor side, Proceedings Full Meeting Club of Bologna, 2010
- Giles, D.K., Downey, D., Slaughter, D.C., Brevis-Acuna, J.C. and Lanini, W.T. 2004. Herbicide micro-dosing for weed control in field-grown processing tomatoes. *Appl. Eng. Agric.* 20(6): 735-743.
- Goering, C. Engines, *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, St. Joseph MI, American Society of Agricultural Engineers, 1999, III, pp. 41-54
- Goering, C.E., Stone, D.W. Smith & Turnquist, P.K. Off-Road Vehicle Engineering Principles, American Society of Agricultural Engineering, St. Joseph, Mich., 2003
- Hahn K. High Voltage Electric, Tractor-Implement Interface, SAE paper 2008-01-2660
- Kondo N., Nishitsuji Y., Ling, P.P. & Ting, T.C. Visual feedback guided robotic cherry tomato harvesting, *Transactions of the ASAE*, 1996, Vol. 39, pp. 2331-2338
- Lee, W.S., Slaughter, D.C. and D.K. Giles. 1999. Robotic weed control system for tomatoes. *Precis. Agric.* 1: 95-113.
- Luck, J.D., Zandonadi R.S., Luck R.S. & Shearer S.S. Reducing pesticide over-application with map-based automatic boom section control on agricultural sprayers, *Transactions of the ASAE*, 2010a, Vol. 53(3), pp. 685-690
- Luck, J.D., Pitla S.K., Zandonadi R.S. & Shearer S.S. Estimating off-rate pesticide application errors resulting from agricultural sprayer turning movements, *Precision Agriculture*, 2010b (published online)
- Lund, I., Jensen, P.K., Jakobsen, N.H. & Thygesen, J.R. The Intelligent Sprayer Boom: a new generation of sprayers, *Aspects of Applied Biology*, 2010, 01.01.2010, pp. 439-442
- Möller J. New development of automation for agricultural machinery, Proceedings Full Meeting Club of Bologna, 2010
- Munack A. & Speckmann H. Communication technology is the backbone of precision agriculture, *Agriculture Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development*, 2001, Vol. III

- Onyango, C.M. & Marchant, J.A. Physics-based colour image segmentation for scenes containing vegetation and soil, *Image and Vision Computing*, 2001, Vol. 19, pp. 523-538
- Reid, J.F., Zhang Q., Noguchi, N. & Dickson M. Agricultural automatic guidance research in North America, *Computers and Electronics in Agriculture*, 2000, Vol. 25 (1-2), pp. 155-167
- Renius K.Th, Tractors: Two Axle Tractors, *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, St. Joseph MI, American Society of Agricultural Engineers, 1999, III, pp. 115-184
- Renius K.Th., Resch R. Continuously Variable Tractor Transmission, *ASAE Distinguished Lecture Series No. 29*, St. Joseph MI, American Society of Agricultural Engineers, 2005
- Shewanghart H. Effect of Reduced Tire Inflation Pressure on Agricultural Tires, *Proceeding 6<sup>th</sup> European ISTVS Conference 28*, 30.9.1994, Vienna, 1, pp- 277-294
- Shearer S. Trends in the automation of agricultural field machinery *Proceedings Full Meeting Club of Bologna*, 2010
- Slaughter, D. C., Giles, D.K. and Downey, D. 2008b. Autonomous robotic weed control systems: a review. *Comput. Electron. Agric.* 61: 63–78.
- Sobotzik J. Electric Drives, *Potentials on Tractors and Implements*, July 2010, Munich, Germany
- Zwiggelaar, R. A review of spectral properties of plants and their potential use for crop/weed discrimination in row-crops, *Crop Protection*, 1998, Vol. 17, pp. 189-206

## 6.2 Logistica

- Ahumada, O. and J. R. Villalobos (2009). "Application of planning models in the agri-food supply chain: A review." *European Journal of Operational Research* 196(1): 1-20.
- Auernhammer, H. (2001). "Precision farming-the environmental challenge." *Computers and Electronics in Agriculture* 30(1-3): 31-43.
- Bartosik, R., R. Berruto, et al. (2007). Natural air/low temperature rice drying: Feasibility of application in the north-west of Italy by means of simulation. *4th Temperate Rice Conference*. Novara, Italy, S. Bocchi, A. Ferrero, A. Porro. I: 182-183.
- Bartosik, R. and D. Maier (2004). "Evaluation of three na/lt in-bin drying strategies in four corn belt locations." *Transaction of the ASAE* 47(4) 47((4)): 1195-1206.
- Bartosik, R., J. Rodríguez, et al. (2008). Storage of corn, wheat soybean and sunflower in hermetic plastic bags. *International Grain Quality and Technology Congress*. Chicago, ASABE.
- Batt, P. and N. Parining (2000). "Price-quality relationships in the fresh produce industry in Bali." *Management Review* 3: 177-187.
- Bechini, A., A. Cimino, et al. (2008). "Patterns and technologies for enabling supply chain traceability through collaborative e-business." *Information and Software Technology* 50: 342-359.
- Berndes G, Hoogwijk M, et al. (2003). "The contribution of biomass in the future global energy supply: A review of 17 studies." *Biomass Bioenergy* 25(1-28).
- Bernhardt, H., W. Lixfeld, et al. (2010 ). Technological and organizational development potentiality for grain logistic in Germany *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR)*. Québec City, Canada, CSBE/SCGAB. I: Electronic proceedings.
- Berruto, R. and P. Busato (2008). Modeling the impact of traceability on harvest and transport operations of rice crops. *Model-It IV International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Agri-Food Chain*. P. Barreiro & M. Hertog. Madrid, Spain, P. Barreiro, M. Hertog, F.J. Arranz, B. Diezma, E.C. Correa. I: 213-219.
- Berruto, R. and P. Busato (2008). System approach to biomass harvest operations: Simulation modeling and linear programming for logistic design. *ASABE Annual International Meeting*, Providence, Rhode Island, MA, USA.
- Berruto, R. and P. Busato (2008). Virtual prototyping of energy supply chains from biomass

- crops: Web application and simulation of technical, logistic, and economic aspects. *16th Biomass Conference*, Valencia, Spain.
- Berruto, R. and P. Busato (2009). Logistics and postharvest handling of locally grown produce. *Postharvest handling: A systems approach, second edition*. R. S. W. Florkowski, B. Brueckner, S. Prussia. San Diego, Elsevier: 284-331.
- Berruto, R., P. Busato, et al. (2011). Logistics and economics of grain harvest and transport systems with the use of silo-bag. *2011 ASABE International Meeting*. A. S. o. A. a. B. Engineers. Louisville, KY, USA, American Society of Agricultural and Biological Engineers: paper # 1100023.
- Berruto, R., P. Busato, et al. (2011). Logistics and economics of rice harvest and post-harvest operations with the use of low temperature in-bin drying system. *2011 ASABE International Meeting*. A. S. o. A. a. B. Engineers. Louisville, KY, USA, American Society of Agricultural and Biological Engineers: paper # 1100024.
- Berruto, R., P. Busato, et al. (2010). Modeling corn stover harvest operations. *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)*. Québec City, Canada.
- Berruto, R., P. Busato, et al. (2008). Logistic strategies for segregation of identity preserved grain during unloading operations: Assessment by means of network simulation. *Innovation Technology to Empower Safety, Health and Welfare in Agriculture and Agro-Food Systems*, Ragusa, Italy.
- Berruto, R., P. Gay, et al. (2003). Hybrid modelling for fruit quality prediction in supply chain networks, *Acta Horticulturae*.
- Berruto, R., P. Gay, et al. (2004). Linear programming for wine bottling scheduling optimization. *Atti del convegno "ICEF 2004"* Montpellier, Francia
- Berruto, R. and D. Maier (2002). Using modeling techniques to test the feasibility of segregating non-gmo soybeans at commercial elevators. *IFAC Conference*. IFAC. Wageningen, IFAC.
- Berruto, R. and D. E. Maier (2001). "Analyzing the receiving operation of different grain types in a single-pit country elevator." *Transactions of the ASAE* 44(3): 631-638.
- Berruto, R., C. Tortia, et al. (2006). "Wine bottling scheduling optimization." *Transactions of the ASABE* 49(1): 291-295.
- Bochtis, D., S. Vougioukas, et al. (2007). "Optimal dynamic motion sequence generation for multiple harvesters." *Agricultural Engineering International: the CIGR Journal of Scientific Research and Development* IX: Manuscript ATOE 07 001.
- Bochtis, D. D. and C. G. Sørensen (2009). "The vehicle routing problem in field logistics part i." *Biosystems Engineering* 104(4): 447-457.
- Bochtis, D. D. and C. G. Sørensen (2010). "The vehicle routing problem in field logistics: Part ii." *Biosystems Engineering* 105(2): 180-188.
- Bochtis, D. D., C. G. Sørensen, et al. (2010). "Tramline establishment in controlled traffic farming based on operational machinery cost." *Biosystems Engineering* In Press, Corrected Proof.
- Bodin, L., B. Golden, et al. (1983). "Routing and scheduling of vehicles and crews: The state of the art." *Computers Operational Research* Vol. 10: 63-211.
- Buckmaster, D. R. and J. W. Hilton (2005). "Computerized cycle analysis of harvest, transport, and unload systems." *Computers and Electronics in Agriculture* 47(2): 137-147.
- Busato, P. and R. Berruto (2006). Fruitgame: Simulation model to study the supply chain logistics for fresh produce. *4th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources*. J. X. F. Zazueta, S. Ninomiya, G. Schiefer. Orlando, Florida USA, American Society of Agricultural and Biological Engineers. I: 488-493.
- Busato, P. and R. Berruto (2009). Logistic study on the recall of non-conform perishable produce through the supply chain by means of discrete event simulation model. *EFITA-Joint international Agricultural Conference*, Wageningen, Netherlands.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2007). Fruitgame: A simulation tool to evaluate supply chain

- logistics and the effects of information sharing for fresh produce. *5th Efito-WCCA Conference*, Glasgow, UK.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2007). La logistica della supply-chain di prodotti ortofrutticoli ed il suo impatto sulla qualità e quantità al punto vendita: Uno studio di simulazione. *Convegno Nazionale III, V e VI Sezione AIIA*. Volterra, Italy. *I*: 56-59.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2008). Integrating simulation and optimization for inventory control of perishable items. *Model-It IV International Symposium on Applications of Modelling as an Innovative Technology in the Agri-Food Chain*. M. H. P. Barreiro, F.J. Arranz, B. Diezma, E.C. Correa. Madrid, Spain, Barreiro, Hertog, Arranz, Diezma, Correa. *I*: 251-257.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2005). Modeling of rice harvesting chains: Technical and logistic aspects. *XXXI CIOSTA CIGR V Increasing Work Efficiency in Agriculture, Horticulture and Forestry*. Hokenheim, M. Krause. *I*: 168-176.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2008). Simulation and optimization of biomass harvest and transport system. *CIGR International Conference of Agricultural Engineering*, Iguassu Falls City, Brazil.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2007). "Optimal field-bin locations and harvest patterns to improve the combine field capacity: Study with a dynamic simulation model." *CIGR Ejournal Manuscript CIOSTA 07 001 IX*. December.
- Busato, P., R. Berruto, et al. (2008). Logistics and efficiency of grain harvest and transport systems in a south australian context. *ASABE Annual International Meeting*, Rhode Island, MA, USA.
- Caprara, C., C. Gabellini, et al. (2007). A gis based modelling system for the assessment of agriculture residues production. *15th European Biomass Conference*, Berlin, Germany.
- Caputo, A. C., M. Palumbo, et al. (2005). "Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables." *Biomass and Bioenergy* 28(1): 35-51.
- Chaug-I, H. and H. Sheng-F (2003). "Vehicle routing problem for distributing refrigerated food." *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies* 5.
- Dabbene, F. and P. Gay (2011). "Food traceability systems: Performance evaluation and optimization." *Computers and Electronics in Agriculture* 75(1): 139-146.
- Dabbene, F., P. Gay, et al. (2008). "Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, part i: Background and methodology." *Biosystems Engineering* 99: 348 – 359.
- Dabbene, F., P. Gay, et al. (2008). "Optimisation of fresh-food supply chains in uncertain environments, part ii: A case study." *Biosystems Engineering* 99: 360-371.
- Dupuy, C., V. Botta-Genoulaz, et al. (2005). "Batch dispersion model to optimise traceability in food industry." *Journal of Food Engineering* 70(3): 333-339.
- EEA (2005). How much biomass can europe use without harming the environment, briefing 2/2005. .
- EEA (2007). "Transport and environment: On the way to a new common transport policy term 2006: Indicators tracking transport and environment in the european union." *EEA report 1/2007*.
- Faaij A, Van Ree R, et al. ( 1997). "Gasification of biomass wastes and residues for electricity production." *Biomass Bioenergy* 12: 387–407.
- Gay, P. D., F.; Sacco, N. (2008). Efficient supply chain design for perishable food products. *Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering, Conference Title Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering*. Hersonissos, Crete, Greece, .
- Handler, F. and E. Blumauer (2010). Logistic chain for wood chips from short rotation forestry. *International Conference on Agricultural Engineering*. EURAGENG. Clermont-Ferrand, France.



- Hansen, A. C., A. J. Barnes, et al. (2002). "Simulation modeling of sugarcane harvest-to-mill delivery systems." *Transactions of the ASAE* 45(3): 531-538.
- Harrigan, T. M. (2003). "Time-motion analysis of corn silage harvest systems." *Applied Engineering in Agriculture* 19(4): 389-395.
- Higgins, A. and I. Davies (2005). "A simulation model for capacity planning in sugarcane transport." *Computers and Electronics in Agriculture* 47(2): 85-102.
- Iakovou, E., A. Karagiannidis, et al. (2010). "Waste biomass-to-energy supply chain management: A critical synthesis." *Waste Management* 30(10): 1860-1870.
- J.C. Montigaud, R. A., J.M. Ferry (1995). "Logistics and its consequences on the production sector: The example of fruits and vegetables." *Acta Horticulturae* 391: 153 - 161.
- Jager-Waldau A and O. H. (2004). "Progress of electricity from biomass, wind and photovoltaics in the european union." *Renew Sustain Energy Rev* 8: 157-182.
- Kumar, A. and S. Sokhansanj (2007). "Switchgrass (*panicum virgatum*, L.) delivery to a biorefinery using integrated biomass supply analysis and logistics (ibsal) model." *Bioresource Technology* 98(5): 1033-1044.
- McNaull, R., K. Webster, et al. (2011). Modeling and validation of large corn stover square bale collection logistics with a bale accumulator and precision bale placement. *2011 ASABE International Meeting*. A. S. o. A. a. B. Engineers. Louisville, KY, USA, American Society of Agricultural and Biological Engineers: paper # 1111282.
- Nilsson, D. a. H. P. A. (2001). "Influence of various machinery combinations, fuel proportions and storage capacities on costs for co-handling of straw and reed canary grass to district heating plants." *Biomass Bioenergy* 20: 247-260.
- Pedroni, R. (2009). Sviluppo di modelli di simulazione per l'ottimizzazione degli ordini. Un caso pratico: Eataly. Master Research, *Torino*.
- Ravula, P. P., R. D. Grisso, et al. (2008). "Cotton logistics as a model for a biomass transportation system." *Biomass and Bioenergy* 32(4): 314-325.
- Rentizelas, A. A., A. J. Tolis, et al. (2009). "Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 887-894.
- Romanelli, T., R. Berruto, et al. (2010). Energy expense by logistics within sugarcane's energy production chain - two case studies. *XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural Engineering (CIGR)*. CSBE/SCGAB. Québec City, Canada: Electronic proceedings.
- Schlecht, S. M. W., W. W.; Dahl, B. L. (2004). "Logistical costs and strategies for wheat segregation." *Agribusiness & Applied Economics Report - Department of Agribusiness and Applied Economics, North Dakota State University* 551: 41.
- Sokhansanj, S., K. Amit, et al. (2006). "Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (ibsal)." *Biomass and Bioenergy* 30(10): 838-847.
- Solomon, M. M. and J. Desrosiers (1988). "Time window constrained routing and scheduling problems." *Transportation Science* Vol. 22, No. 1: 1-13.
- Tarantilis, C. D. and C. T. Kiranoudis (2002 ). "Distribution of fresh meat." *Journal of Food Engineering Applications of Artificial Intelligence* Vol. 51: 85-91.
- Tarantilis, C. D. and C. T. Kiranoudis (2005). "Operational research and food logistics." *Journal of Food Engineering* 70(3): 253-255.
- Tatsiopoulos, I. P. and A. J. Tolis (2003). "Economic aspects of the cotton-stalk biomass logistics and comparison of supply chain methods." *Biomass and Bioenergy* 24: 199-214.
- Velazquez-Martí, B. and E. Annevelink (2009). "Gis application to define biomass collection points as sources for linear programming of delivery networks." *Transactions of the ASABE* 52(4): 1069-1078.
- Velázquez-Martí, B., E. Fernández-González, et al. (2010). "Quantification of the residual biomass obtained from pruning of trees in mediterranean almond groves." *Renewable Energy* 36(2): 621-626.
- Velázquez-Martí, B., E. Fernández-González, et al. (2011). "Quantification of the residual

- biomass obtained from pruning of vineyards in mediterranean area." *Biomass and Bioenergy* 35(8): 3453-3464.
- Velazquez-Marti, B. A., E. (2008). Mathematical algorithm to transform digital biomass distribution maps into linear programming networks in order to optimize bio-energy delivery chains. *Agricultural and biosystems engineering for a sustainable world. International Conference on Agricultural Engineering* Hersonissos, Crete, Greece, 23-25 June, 2008. .
- Yamamoto H, Fujino J, et al. (2001). "Evaluation of bioenergy potential with a multi-regional global-land-use-and-energy model." *Biomass Bioenergy* 21: 185–203.