

ASPETTI TECNICI E POSSIBILITÀ FUTURE

Fondamenti dell'agricoltura di precisione

Si inizia sempre più a parlare di GPS, agricoltura di precisione, satelliti, ecc. e si cominciano a vedere al lavoro le prime macchine dotate di questa tecnologia. Spesso però si ignorano alcune informazioni basilari necessarie a comprenderne il funzionamento

Antonio Comparetti

Allo stato attuale, a fronte della disparità tra domanda e offerta di prodotti agricoli e della sovrapproduzione alcuni di essi, è obiettivo universale contenere i costi di produzione e minimizzare i contrasti del mercato agricolo, rivolgendosi all'attuazione di un'agricoltura sostenibile.

La difficoltà primaria consiste nel perseguire tale obiettivo per il terreno, principale fattore produttivo, che notoriamente è dotato di notevole «variabilità», in ordine alle sue caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche.

Per variabilità spaziale di un terreno si intende la variazione delle sue caratteristiche da un punto all'altro dello stesso.

Pertanto, la suddetta variabilità spaziale non riguarda soltanto appezzamenti diversi siti nell'ambito del medesimo territorio aziendale (variabilità inter-appezzamenti), ma anche il singolo appezzamento di terreno (variabilità intra-appezzamento). Attualmente, anche realizzando l'agrotecnica più evoluta, supportata dai più aggiornati software di gestione colturale, si rischia sempre di accentuare la suddetta variabilità, in quanto, rispetto alle effettive esigenze colturali, si possono determinare eccessi di fattori produttivi (concimi, diserbanti, antiparassitari, ecc.) in alcuni punti e carenze degli stessi in altri.

Inoltre, nelle zone in cui le quantità somministrate sono superiori a quelle richieste, le varie applicazioni a dose uniforme determinano un inutile incremento dell'impatto ambientale, dovuto, ad esempio, alla permanenza nel suolo di residui di diserbanti e alla percolazione di

nitriti e fosfati nei terreni e al conseguente inquinamento di falde acquifere e corsi d'acqua.

Nasce dunque la necessità di adottare delle tecniche colturali rispondenti alle reali esigenze del terreno, quali sono le applicazioni a dose variabile.

Il nuovo concetto di agricoltura basato sui suddetti principi è definito «agricoltura di precisione» o «produzione colturale spazialmente variabile» (Schueller, 1997) o meglio ancora «applicazione mirata dei fattori produttivi alle colture in accordo con le esigenze, determinate localmente, a livello del metro o persino del centimetro» (Stafford, 1997).

I sistemi di gestione aziendale basati sul suddetto concetto e, di conseguenza, costituiti dalle «applicazioni a dose variabile» sono definiti «sistemi di gestione spazialmente selettiva».



Foto 1 - Per l'attuazione del campionamento spazialmente selettivo dei terreni, una piattaforma completa abbinata al sistema DGPS è rappresentata dal sistema di collezione «multi-zona», la cui sonda (nella foto è mostrato il modello 9300) consente il prelievo contemporaneo di una, due o tre diverse zone di terreno; il tutto in un tempo inferiore al minuto.
(Fonte: Concord Environmental Equipment)

Gestione della variabilità spaziale

In ordine alla gestione della variabilità spaziale, l'agricoltura di precisione richiede l'impiego di sistemi semplici ed economicamente convenienti, anche se frutto di uno sviluppo tecnologico complesso.

Per quanto concerne gli aspetti economici e ambientali, una gestione spazialmente variabile comprende la produzione di mappe di resa colturale e di qualità produttiva; con esse l'agricoltore potrà individuare le zone in cui la resa colturale e la qualità produttiva sono risultate inferiori, in modo da effettuare successivamente in ciascuna di esse la misurazione dei fattori della «variabilità spaziale».

Il fine ultimo è l'eventuale correlazione della resa e della qualità produttiva con la quantità di uno o più fattori produttivi (concimi, diserbanti, antiparassitari, ecc.) controllabili dall'agricoltore, in modo da correggerne le dosi a partire dal successivo trattamento.

Naturalmente l'esecuzione di operazioni colturali spazialmente variabili è subordinata al possesso delle basilari conoscenze agronomiche da parte dell'agricoltore.

Infatti, l'adozione dell'agricoltura di precisione comprende non soltanto l'esecuzione spazialmente variabile delle varie tecniche colturali, ma anche la rivalutazione dell'esperienza aziendale dell'agricoltore e, di conseguenza, prove di tecniche colturali e tutte quelle procedure che possono contribuire all'incremento dell'efficienza produttiva (intesa come la massima produttività possibile con il minor dispendio di fattori produttivi).

L'agricoltura di precisione è basata sulla misurazione della variabilità spaziale presente nell'ambito dell'appezzamento, tradizionalmente considerato come l'unità di superficie della gestione aziendale.

LA GIUSTA DOSE DI AZOTO CON O SENZA GPS

La tecnologia migliora la fertilizzazione azotata

Uno dei fattori che hanno spinto lo sviluppo dell'agricoltura di precisione negli Stati Uniti è stata proprio la necessità di ottimizzare la distribuzione dei principi nutritivi legandola alla reale necessità della coltura. Fino allo scorso anno questo principio era concretamente applicato partendo dal concetto di fornire al terreno gli elementi nutritivi necessari in funzione della sua dotazione naturale, alle risposte delle colture precedenti e alle esigenze alimentari specifiche della coltura in atto.

L'approccio per arrivare ad avere informazioni sufficienti, per applicare in modo efficiente questi principi, era di due tipi: o si partiva dal campionamento del terreno (*grid sampling*), oppure ci si basava sulle risposte produttive delle colture su di un minimo di tre anni correlandole con la dose distribuita. Entrambi gli approcci avevano svantaggi che erano, rispettivamente, l'elevato costo dell'operazione di campionamento del terreno o la necessità di attendere almeno tre anni per avere un numero di dati sufficienti a una certa affidabilità.

Alcune ricerche, avviate da diversi anni, hanno dimostrato che certi indici spettrali emessi dalle piante (le piante emettono delle caratteristiche lunghezze d'onda) sono fortemente correlati allo stato di nutrizione azotata delle piante.

La Hydro Agri-Europe, già da alcuni anni aveva intrapreso una serie di studi per poter sfruttare questa correlazione con l'obiettivo di migliorare la distribuzione dei concimi azotati in un'ottica di ottimizzare l'effetto fertilizzante e di ridurre l'impat-

to ambientale.

Recentemente le sue ricerche hanno portato all'ottenimento di un sistema di distribuzione dei fertilizzanti basato sul controllo tramite appositi sensori, sviluppati dalla stessa azienda, dello stato nutrizionale delle colture.

Il funzionamento del sistema Hydro Agri è concettualmente molto semplice; un gruppo di sensori, posto anteriormente alla trattrice, «leggono» lo stato nutrizionale delle piante; le informazioni lette vengono interpretate e trasformate in comandi di regolazione dello spandiconcime portato dalla trattrice.

I vantaggi di questa applicazione sono sostanzialmente due: il primo è legato alla possibilità di utilizzo sia con sistemi GPS (ossia con l'acquisto di mappe che andrebbero a far parte dell'archivio storico dell'appezzamento), sia senza nessun sistema di precisione; il secondo vantaggio è invece basato sull'assenza di costi da sostenere, nei sistemi GPS, per la mappatura della variabilità del terreno. Il sistema Hydro Agri consente, comunque, una distribuzione mirata del fertilizzante azotato portando ad una riduzione della quantità distribuita e a un aumento delle rese. L'unico svantaggio è legato alla necessità di dover tarare i sensori sui picchi spettrali caratteristici della coltura che, però, variano varietà per varietà.

Questo semplice sistema «di precisione» per la distribuzione dei fertilizzanti azotati è già utilizzato in Germania e in Francia; dal prossimo anno sarà disponibile anche in Italia.

Schema di funzionamento del sistema



Il sistema di sensori montati anteriormente alla trattrice

A differenza dei sistemi tradizionali di gestione agricola, i quali possono operare con una risoluzione spaziale di 1.000 m a livello aziendale o di 100 m a livello intra-appezzamento, i sistemi di gestione spazialmente selettiva sono in grado di operare con una risoluzione intra-appezzamento di 10 m o persino inferiore ad 1 m.

Pertanto, nell'ambito della gestione aziendale, il primo passo da compiere consiste nel misurare la variabilità intra-appezzamento dei vari fattori produttivi, al fine di valutare se essi in-

fluenzano significativamente la resa; soltanto successivamente l'agricoltore potrà consapevolmente decidere se continuare a considerare l'appezzamento come approssimativamente uniforme e, di conseguenza, trattarlo come tale durante le varie operazioni colturali, o se iniziare un nuovo tipo di gestione basato sull'effettiva variabilità intra-appezzamento.

I fattori che costituiscono la variabilità intra-appezzamento sono generalmente gli stessi della variabilità inter-appezzamenti. Però, mentre nel se-

condo caso si richiede il valore medio di ciascun fattore nell'intero appezzamento, nel primo caso si richiedono più valori in punti precisi o comunque in aree di estensione relativamente limitata.

I fattori potenzialmente variabili possono essere distinti in due gruppi: risorse e output (*tabella 1*).

Le risorse o caratteristiche pedologiche dell'appezzamento includono le caratteristiche topografiche (altitudine, giacitura, pendenza), le caratteristiche fisiche (struttura, resistenza al-

la lavorazione, profondità dello strato coltivabile, tessitura), le caratteristiche chimiche (pH, contenuto in elementi nutritivi, in umidità e in sostanza organica), le caratteristiche biologiche (diffusione della flora infestante, di parassiti e di malattie).

Gli output o caratteristiche colturali comprendono la biomassa vegetale, la resa, la qualità produttiva e l'impatto ambientale della coltura.

Il più soddisfacente approccio all'agricoltura di precisione consiste nel misurare la variazione intra-appezzamento degli output e, di conseguenza, nel cercare di dedurre le relazioni tra gli output e le risorse previamente misurate.

Sistemi di posizionamento

Per l'attuazione del concetto di agricoltura di precisione bisogna disporre di un sistema di posizionamento dei vari mezzi agricoli, cioè di un sistema che consenta di conoscere, istante per istante, la posizione in cui si trova l'operatrice che deve effettuare il lavoro in campo.

Lo scopo è infatti di correlare la posizione dell'operatrice con la quantità del fattore produttivo (ad esempio, azoto) riguardante l'operazione da effettuare (ad esempio, concimazione azotata), in modo che la macchina (ad esempio, spandiconcime dotato di un sistema di regolazione in tempo reale della dose da distribuire) possa somministrare, in quel particolare punto dell'appezzamento, la quantità richiesta dalla coltura considerata.

Precisione, affidabilità, integrità e disponibilità

Bisogna precisare che l'adozione di un sistema di posizionamento va subordinata al soddisfacimento di due condizioni: l'economicità del sistema, in funzione del tipo e dell'estensione dell'ambiente considerato, e il conseguimento di elevati valori di *accuracy*, *reliability*, *integrity* e *availability* (precisione, affidabilità, integrità e disponibilità).

La precisione di un sistema di posizionamento è il grado di conformità tra la posizione stimata o misurata, tempo e/o velocità di un punto della superficie terrestre e la sua reale posizione, tempo e/o velocità. Essa è in ge-

Tabella 1 - Le caratteristiche pedologiche e colturali che costituiscono la variabilità spaziale intra-appezzamento

| Variabilità spaziale intra-appezzamento | Tipo di misurazione | | Numero di misurazioni | | Mappatura automatica | |
|---|---------------------|----------------|-----------------------|-------------|----------------------|--------------|
| | manuale | in tempo reale | una tantum | una annuale | commerciale | sperimentale |
| Caratteristiche pedologiche | | | | | | |
| Topografiche | | | | | | |
| altitudine | | ■ | | ■ | | |
| giacitura | ■ | | | | ■ | |
| pendenza | ■ | | | | ■ | |
| Fisiche | | | | | | |
| struttura | ■ | ■ | | ■ | | ■ |
| resistenza alla lavorazione | | ■ | | ■ | | |
| profondità dello strato coltivabile | ■ | ■ | | ■ | | |
| tessitura | ■ | | ■ | | | |
| Chimiche | | | | | | |
| pH | ■ | ■ | | ■ | | |
| contenuto in elementi nutritivi (N, P, K) | ■ | ■ | | ■ | | |
| contenuto idrico | ■ | ■ | | ■ | | |
| contenuto in sostanza organica | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ |
| Biologiche | | | | | | |
| distribuzione della flora infestante | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ |
| diffusione di parassiti | ■ | | | ■ | | |
| diffusione di malattie | ■ | | | ■ | | |
| Caratteristiche colturali | | | | | | |
| biomassa vegetale | | ■ | | ■ | | ■ |
| resa | | ■ | | ■ | ■ (*) | ■ |
| qualità produttiva | ■ | | | ■ | | |
| impatto ambientale | ■ | | | ■ | | |

(*) La mappatura automatica è commercialmente disponibile soltanto per alcune colture a raccolta meccanizzabile

nera espressa statisticamente come 2 volte la deviazione standard dell'errore del sistema (ad esempio, una precisione pari a ± 5 m significa che nel 95% delle misurazioni si consegue un errore di posizionamento compreso tra -5 m e +5 m).

L'affidabilità di un sistema è la probabilità di eseguire senza errori il posizionamento, in determinate condizioni e durante uno specificato periodo di tempo.

L'integrità di un sistema è l'abilità dello stesso a fornire avvisi tempestivi all'utente quando il sistema stesso è affetto da errori e/o disfunzioni, i quali lo rendono inaffidabile ai fini del posizionamento.

La disponibilità di un sistema è la percentuale di tempo in cui i segnali trasmessi dalle sorgenti sono disponibili per l'uso, nell'ambito di una particolare area.

Essa dipende sia dalle caratteristiche fisiche dell'ambiente operativo (ad esempio, presenza o meno di ostacoli, quali rilievi, alberi o edifici) sia dalle capacità tecniche della sorgente (ad esempio, potenza di emissione del segnale).

I sistemi satellitari

Tra i vari sistemi di posizionamento

disponibili, i sistemi satellitari, basati su di una costellazione di satelliti (che si muovono generalmente in diversi piani orbitali) sono di gran lunga i migliori, poiché consentono di determinare la posizione di punti della superficie terrestre con un'elevata precisione e poiché, nel contempo, i segnali da essi trasmessi (costituiti da onde elettromagnetiche) si propagano in presenza di limitate fonti di disturbo.

Attualmente, nell'ambito dei sistemi satellitari, i più idonei ai fini del posizionamento sono quelli costituiti da satelliti che si muovono in orbite circolari intermedie (ICO=*intermediate circular orbits*): GPS (sistema di posizionamento globale) e Glonass (*global navigation satellite system*, sistema di navigazione satellitare globale), entrambi nati come sistemi militari ma oggi disponibili anche per scopi civili.

Le orbite a un'altezza dalla terra variabile da 5.000 a 20.000 km e, quindi, sono relativamente stabili, a causa di effetti assai ridotti dovuti alla gravitazione terrestre e al trascinamento atmosferico. Il tempo impiegato dai satelliti per percorrere queste orbite è di 6-12 ore (nel sistema GPS, ad esempio, ogni satellite impiega 12 ore). Pertanto, ogni satellite è visibile ad un ricevitore fisso per un periodo di tempo relativamente lungo, cioè finché il suo angolo di elevazione rispetto all'orizzonte (avente il vertice nell'antenna del ricevitore) è maggiore o uguale a 15°; di conseguenza, è sufficiente un ridotto numero di satelliti, affinché i segnali satellitari coprano l'intera superficie terrestre.

Il GPS, progettato e gestito dal Dipartimento della difesa (DoD) degli Usa, è disponibile in due servizi: PPS (servizio di posizionamento preciso), utilizzabile soltanto dal DoD per scopi militari, e SPS (servizio di posizionamento standard), utilizzabile anche dagli utenti civili ma soggetto alla SA o *selective availability* (disponibilità selettiva). Essa è un incremento dell'errore di posizionamento (connesso alla previsione delle posizioni orbitali dei satelliti e all'inaccuratezza degli orologi satellitari) pari a circa 30 m, introdotto dal DoD al fine di incrementare l'errore complessivo da circa 15 m a circa 100 m (nel 95% delle misurazioni), anche per effetto di altre fonti di errore.

La precisione di un sistema di posizionamento è il grado di conformità tra la posizione stimata o misurata, tempo e/o velocità di un punto della superficie terrestre e la sua reale posizione, tempo e/o velocità. Essa è in ge-

Il Glonass, progettato dall'ex Urss e attualmente gestito dalla Repubblica russa, ha il vantaggio, rispetto al GPS, di essere libero da qualsiasi azione di degradazione del livello di precisione. Tuttavia, il suo utilizzo in campo civile non è ancora sufficientemente diffuso.

Va comunque evidenziato che alcuni costruttori di sistemi satellitari (Ash-tech, 3S Navigation, Daimler-Benz aerospace, ecc.) hanno già reso disponibili ricevitori in grado di captare segnali sia da satelliti del sistema GPS (21 attivi) che da satelliti del sistema Glonass (14 attivi), al fine di migliorare la precisione, l'affidabilità e la disponibilità.

Gli «errori» del sistema GPS

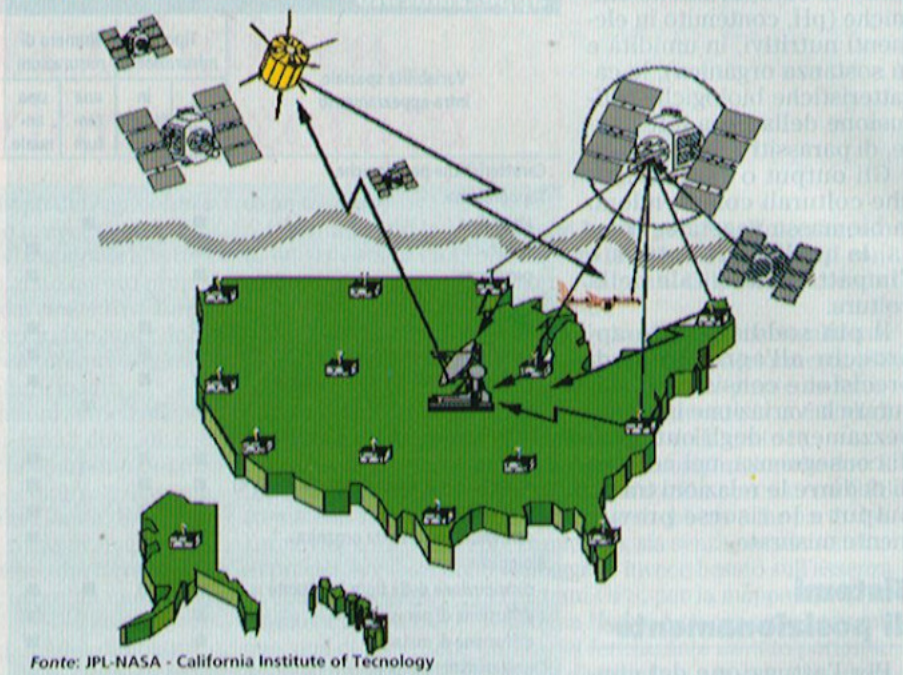
Nel sistema GPS l'orologio della master control station o MCS (stazione principale di controllo) mantiene sincronizzati tutti gli orologi satellitari al GPS time (tempo GPS), *paper clock* (orologio fittizio) costituito dagli orologi di tutte le stazioni di monitoraggio e di tutti i satelliti attivi. Il GPS time è uguale al tempo coordinato universale o UTC (tempo mondiale definito dalla rotazione terrestre) $\pm 1/1.000.000$ s.

Ogni satellite GPS attivo trasmette periodicamente a un ricevitore, dotato di antenna satellitare e di batteria di alimentazione, un segnale che viene visualizzato nella forma di un messaggio di navigazione, contenente, tra l'altro, la prevista posizione orbitale dello stesso satellite (effemeride).

Determinare la posizione tridimensionale di un punto della superficie terrestre significa calcolare le tre coordinate geografiche dello stesso (latitudine, longitudine e altitudine). A tale scopo occorre impiegare un ricevitore che, sulla base della posizione orbitale di ogni satellite visibile allo stesso, sia in grado di misurare il *range*, ovvero la distanza geometrica tra il satellite ed il ricevitore considerati. Il *range* è determinato moltiplicando la velocità della luce per il *time offset*, ovvero per il ritardo di tempo tra la trasmissione e la ricezione del segnale. Tuttavia, il suddetto *time offset* risulta affetto dal *clock error*, ovvero dallo sfasamento tra il tempo segnato dall'orologio satellitare (GPS time) e quello segnato dall'assai meno accurato orologio del ricevitore. Pertanto, il *range* calcolato risulterà anch'esso affetto da tale errore, per cui è chiamato *pseudo-range*.

Al fine di determinare la posizione del punto considerato, il ricevitore deve captare contemporaneamente segnali da almeno quattro satelliti per calcolare il valore dei relativi quattro *range* (distanze dal ricevitore ai quattro satelliti) e, di conseguenza, delle

Figura 1 - Sistema satellitare WAAS o «Sistema di incremento a Larga Area»



Fonte: JPL-NASA - California Institute of Technology

quattro incognite: le tre coordinate geografiche della posizione del ricevitore e il *clock error*.

Il quarto satellite è necessario per assegnare il GPS time alla trasmissione dei segnali da parte degli altri tre e, quindi, al calcolo del *clock error*.

Se più di quattro satelliti sono visibili al ricevitore, quelli ridondanti il numero minimo possono essere impiegati nel caso di avarie (a carico di uno o più satelliti) e, comunque, i segnali derivanti da tutti i satelliti possono essere elaborati al fine di migliorare la precisione di posizionamento.

Siccome il posizionamento GPS è influenzato da varie fonti di errore (SA, effemeride, inaccuratezza degli orologi satellitari, ritardo dovuto alla propagazione dei segnali nella ionosfera e nella troposfera, *multipath* o riflessione multidirezionale dei segnali, rumore del ricevitore, ecc.), al fine di ottenere un'elevata precisione occorre adottare delle tecniche di correzione differenziale, cioè il cosiddetto GPS differenziale o DGPS.

Le «correzioni» differenziali

Le tecniche di correzione differenziale possono essere applicate in «real time» (tempo reale) o in «post-processing» (elaborazione successiva).

Nel primo caso occorre adottare una stazione base e una stazione mobile, ciascuna delle quali deve essere costituita da un ricevitore GPS, dotato di antenna satellitare, da un radio modem per la trasmissione dei segnali di

correzione differenziale e da una batteria per l'alimentazione.

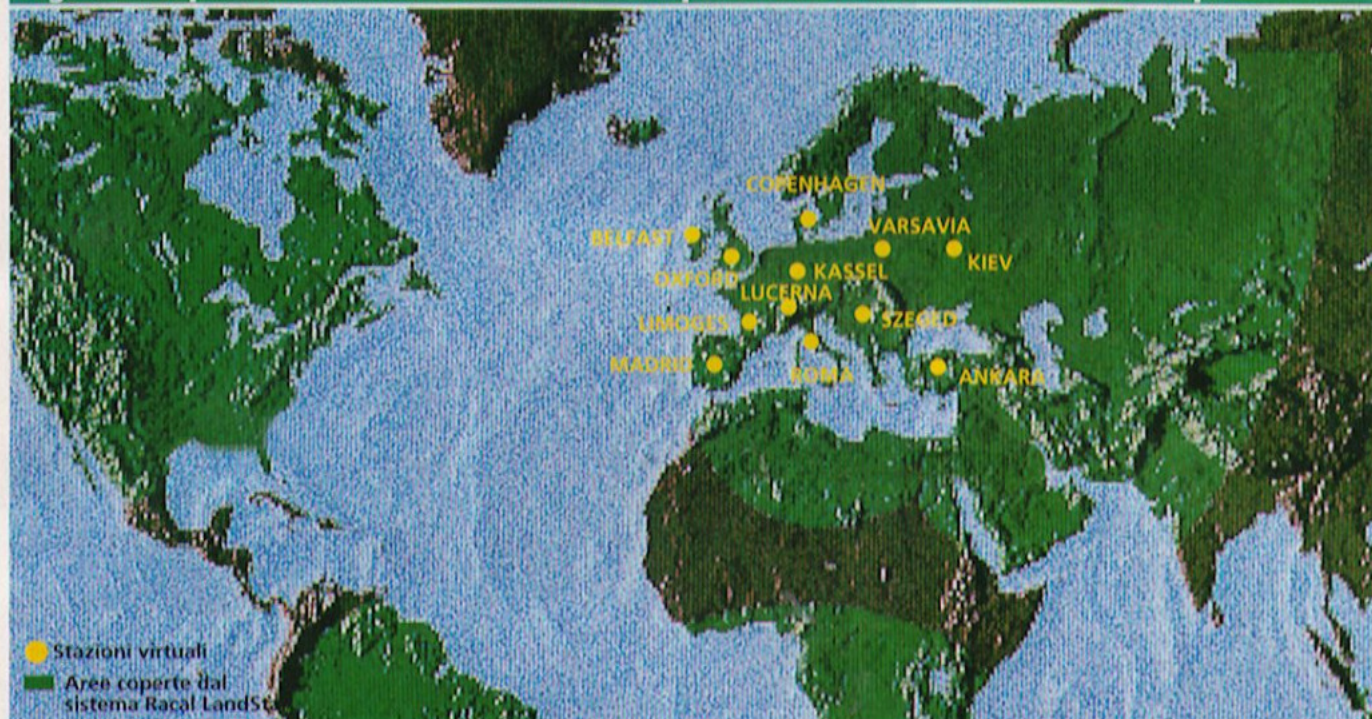
La stazione base va collocata in un punto fisso di coordinate geografiche note mentre la stazione mobile va montata sulla trattoria o sull'operatrice semovente di cui si vuole determinare la posizione.

La stazione base, fondandosi sulle sue stesse coordinate geografiche, determina, per ogni satellite ad essa visibile, oltre allo *pseudo-range*, la correzione differenziale e trasmette quindi un segnale di correzione differenziale alla stazione mobile. Quest'ultima, per ogni satellite ad essa visibile, applicando la suddetta correzione allo *pseudo-range* calcolato, rimuove gran parte dell'errore di posizionamento in modo da determinare il *range*; ripetendo tale operazione per almeno quattro segnali (provenienti da altrettanti satelliti), essa calcola le coordinate del punto considerato.

Nel secondo caso, quello del *post-processing*, il sistema DGPS non necessita di radio modem, in quanto le correzioni differenziali calcolate dalla stazione base vengono applicate agli *pseudo-range* già calcolati dalla stazione mobile (relativi ai satelliti visibili alla stessa), in una fase successiva al posizionamento effettuato dal ricevitore mobile.

Le tecniche di correzione differenziale sono in grado di annullare gli errori dovuti all'inaccuratezza dell'orologio satellitare e quelli connessi all'effemeride e, di conseguenza, anche la

Figura 2 - Copertura del sistema Racal LandStar e posizione delle stazioni virtuali in Europa



SA, per cui consentono di eseguire il posizionamento con una precisione compresa tra 1 e 5 m (nel 95% delle misurazioni); il che si ottiene anche nel caso in cui si adottano sistemi DGPS a basso costo.

Tale livello di precisione è sufficiente per alcune operazioni spazialmente controllate, quali la concimazione e la mappatura di resa. In particolar modo, una precisione di 3 m è richiesta per la mappatura di resa di colture a raccolta meccanizzabile mediante l'impiego di mietitrebbiatrici (se la larghezza dell'aspo è di 5 m), 1-2 m per la mappatura della flora infestante e di malattie e per la concimazione.

Tuttavia, per l'esecuzione di determinate operazioni colturali, l'agricoltore necessita di una precisione più elevata (ad esempio, 10 cm per il diserbo con sistema di controllo atto ad evitare la sovrapposizione di diserbante tra file adiacenti).

A ciò si aggiunga che, se si verifica un qualsiasi errore nel calcolo della correzione differenziale da parte della stazione base, esso influirà negativamente sul posizionamento effettuato dalla stazione mobile.

Al fine di superare i due suddetti limiti, l'agricoltore può adottare un sistema DGPS a larga area (WADGPS), quale è, negli Usa il sistema WAAS impiegato dalla FAA (Federal Aviation Administration) o, in Europa, il servizio Omnistar e il servizio Racal LandStar della Racal Survey (foto 2). Quest'ultimo è costituito dai satelliti GPS,

da una rete di stazioni di riferimento, da un centro di controllo e da satelliti di comunicazione, quali mezzi di previsione delle posizioni dei vari satelliti nelle rispettive orbite; in Europa il sistema Racal LandStar dispone dei satelliti dell'Agenzia spaziale europea (EMS).

Ogni stazione di riferimento calcola i dati di correzione differenziale parziali (relativi ai satelliti visibili alla stessa) e li invia al centro di controllo, insieme ad altre informazioni sullo stato e sulla qualità del sistema (ad esempio, eventuali disfunzioni di uno o più satelliti).

Il centro di controllo è la stazione principale della rete, in quanto, oltre a monitorare costantemente le stazioni di riferimento e i satelliti GPS (mediante la generazione di immagini satellitari), esegue l'elaborazione dei suddetti dati di correzione differenziale parziali, mediante un software che consente di eliminare gli errori causati da una o più singole stazioni; quest'ultimo, infatti, esegue l'interpolazione delle correzioni differenziali parziali delle varie stazioni di riferimento, al fine di determinare le correzioni differenziali degli *pseudo-range* relativi ai vari satelliti visibili ad una stazione di riferimento virtuale, situata approssimativamente al centro della rete. Quindi il centro di controllo trasferisce i suddetti dati, insieme alle posizioni orbitali previste dei vari satelliti, a un satellite di comunicazione geostazionario.

Questo, a sua volta, invia in tempo

reale i dati di correzione differenziale (relativi a tutti i satelliti GPS attivi e visibili alle stazioni di riferimento del sistema) ai ricevitori di cui sono dotati i vari utenti, in modo che essi possano applicare le correzioni differenziali parziali relative ai satelliti visibili localmente per determinare i *range* e, di conseguenza, le posizioni dei punti prescelti.

Pertanto se l'agricoltore decide di affidarsi ad un siffatto sistema, deve pagare il canone annuale al gestore del sistema; d'altra parte però può risparmiare sul costo iniziale rappresentato soltanto dall'acquisto di un ricevitore portatile configurato per ricevere la correzione differenziale.

Nel suddetto sistema Racal LandStar, qualora la distanza tra l'utente e la stazione di riferimento sia inferiore a 30 km e si impieghi un ricevitore di alta qualità, dotato di almeno 12 canali e capace di misurare la *carrier phase* o fase della portante (lunghezza d'onda in funzione del tempo) ed il Doppler shift (apparente variazione di frequenza causata dal moto relativo del satellite e del ricevitore) dei segnali satellitari, si può conseguire una precisione pari a 0,63 m in latitudine e longitudine e 1,49 m in altitudine, mentre, qualora si utilizzi un ricevitore standard, 0,74 m in latitudine e longitudine e 1,87 m in altitudine (nel 95% delle misurazioni). Tuttavia, tale differenza di performance tra i suddetti ricevitori sarà più marcata in condizioni ambientali sfavorevoli, cioè in presen-

za di segnali ostruiti o riflessi (Mack, 1997).

Infatti, durante le varie operazioni colturali spazialmente selettive, qualsiasi sistema GPS o DGPS fornisce una precisione variabile nel tempo, a causa della presenza dei seguenti fattori di ostruzione o riflessione dei segnali in gioco: alberi (assorbimento del segnale), ostacoli naturali o artificiali (multipath o riflessione multidirezionale del segnale), torri trasmettenti (interferenza del segnale); ciò soprattutto vicino ai confini degli appezzamenti. Tale variazione può essere dovuta anche alla perdita temporanea dei segnali di correzione differenziale e/o al cambiamento dei satelliti visibili all'orizzonte e/o della distribuzione dei satelliti nell'atmosfera.

Al fine di minimizzare il suddetto problema, è possibile adottare un metodo che combina due sistemi di posizionamento, il DGPS e il *dead reckoning* (posizionamento relativo); pertanto, occorre montare sul mezzo agricolo impiegato, oltre alla già descritta stazione mobile DGPS, opportuni sensori (spesso già presenti nelle trattrici di elevata potenza per il controllo dello slittamento), quali un radar doppler, per rilevare la velocità di avanzamento, e un rivelatore digitale di campo magnetico, per determinare la direzione di avanzamento.

Il sistema combinato *dead reckoning* - DGPS, oltre ad assicurare il posizionamento anche laddove i segnali di correzione differenziale sono perduti, è in grado di fornire errori di posizionamento inferiori a quelli forniti dal solo sistema DGPS. Questi risultati si conseguono soprattutto nei tratti curvilinei del percorso, ma anche in quelli rettilinei, per cui tale sistema può essere adottato con successo durante l'esecuzione della maggior parte delle operazioni colturali, le quali si effettuano lungo percorsi rettilinei o leggermente curvilinei (LeBars, Boffety, Trassoudaine, Alizon e Imberbis, 1997).

In ordine ai futuri sviluppi della tecnologia di posizionamento, l'adozione diffusa di altri sistemi satellitari di posizionamento (ad esempio, Glonass), unita all'impiego di una metodologia per la misurazione della fase della portante dei segnali satellitari in due diverse frequenze GPS e all'applicazione del GPS in modo differenziale, nell'ambito di un attendibile sistema di posizionamento a larga area in tempo reale (la posizione del punto considerato deve essere acquisita almeno una volta al secondo), permetterà di conseguire una precisione quantificabile in cm o persino in mm, per cui consentirà di realizzare persino la guida e il controllo autonomo delle macchine agricole.

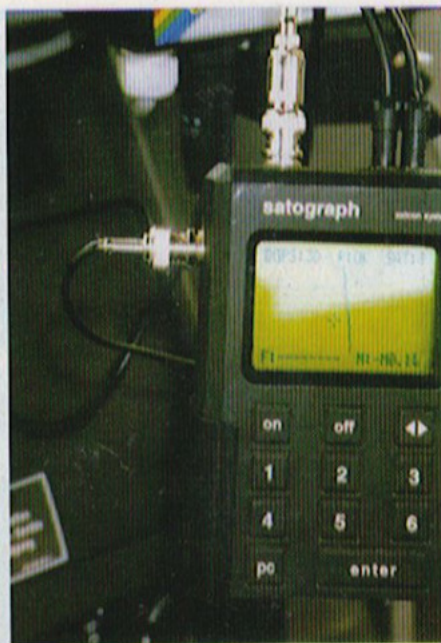


Foto 2 - Per il posizionamento delle macchine agricole si può adottare il sistema DGPS della «SatCon», costituito da un ricevitore mobile (dotato di antenna satellitare per la ricezione dei segnali satellitari), da un radio-modem RTCM (collegato ad un'antenna radio per la ricezione dei segnali di correzione differenziale trasmessi dalla stazione base di riferimento) e da un registratore di dati «Satograph» (osservabile nella foto). I vari dati di posizione sono registrati in una PCMCIA RAM Card in modo da essere successivamente trasferiti nel computer aziendale



Foto 3 - Il motoveicolo a tre ruote (ATV), dotato del sistema di posizionamento della «SatCon», nonché di una sonda di campionamento, consente all'operatore di prelevare rapidamente i vari campioni di terreno in modo da correlare successivamente i risultati delle analisi chimico-fisiche con i corrispondenti dati di posizione

Gestione aziendale

Riguardo alle modalità con cui l'agricoltura di precisione può essere praticamente applicata dall'agricoltore, bisogna distinguere le seguenti fasi: misurazione della variabilità intra-appezzamento e monitoraggio delle condizioni meteorologiche locali, generazione delle mappe relative alle caratteristiche pedologiche e colturali (tra cui le mappe di resa e di qualità produttiva), produzione delle mappe di trattamento, esecuzione delle applicazioni a dose variabile.

Se in un dato appezzamento si vuole adottare un sistema di gestione spazialmente selettiva, il primo passo da compiere consiste nel misurare i fattori della variabilità spaziale intra-appezzamento e, allo stesso tempo, acquisire informazioni sui fattori della variabilità temporale intra-appezzamento, ovvero sulle condizioni meteorologiche locali.

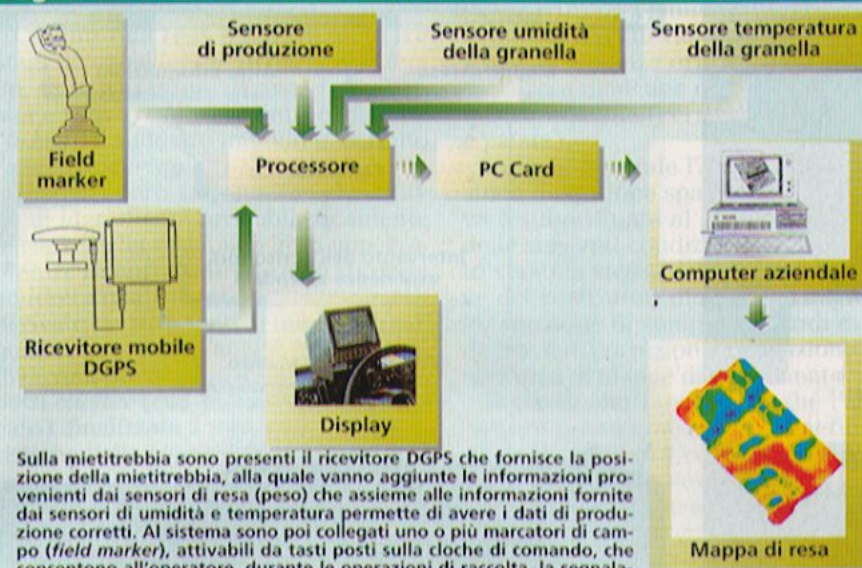
La misurazione della variabilità spaziale intra-appezzamento consiste nel determinare i valori delle caratteristiche topografiche, fisiche, chimiche e biologiche nei vari punti dell'appezzamento considerato (foto 1, 2 e 3).

Al fine di misurare la variabilità in-

tra-appezzamento e, di conseguenza, generare mappe dell'appezzamento considerato per ciascuna delle caratteristiche pedologiche o colturali previamente misurate, è possibile adottare le seguenti tipologie di rilevamento: *remote sensing* (rilevamento a distanza da satelliti, aerei, veicoli comandati a distanza, videocamere, macchine fotografiche digitali, videoregistratori); misurazione effettuata durante le varie operazioni colturali (misurazione delle caratteristiche fisiche dei terreni durante la lavorazione o il trapianto, misurazione della resa durante la raccolta, ecc.); misurazione di tipo manuale (determinazione di struttura, profondità dello strato coltivabile, tessitura, pH, contenuto in elementi nutritivi, in umidità e in sostanza organica mediante il campionamento e l'analisi di campioni di terreni; osservazione della diffusione della flora infestante, di parassiti e di malattie, ecc.) (Schueller, 1997).

Invece, alcune caratteristiche vanno determinate esclusivamente in tempo reale (resistenza alla lavorazione, resa colturale, ecc.), mediante l'impiego dei cosiddetti *real-time sensors*, cioè di sensori in grado di quantificare le suddette durante l'esecuzione delle

Figura 3 - Funzionamento dei sistemi DGPS montati sulle mietitrebbie



Sulla mietitrebbia sono presenti il ricevitore DGPS che fornisce la posizione della mietitrebbia, alla quale vanno aggiunte le informazioni provenienti dai sensori di resa (peso) che assieme alle informazioni fornite dai sensori di umidità e temperatura permette di avere i dati di produzione corretti. Al sistema sono poi collegati uno o più marcatori di campo (*field marker*), attivabili da tasti posti sulla cloche di comando, che consentono all'operatore, durante le operazioni di raccolta, la segnalazione di particolari condizioni del campo come presenza di macchie di infestanti, ristagni d'acqua o quant'altro. Sul display posizionato sulla macchina è quindi possibile leggere: posizione della mietitrebbiatrice, produzione della coltura, umidità della granella, temperatura della granella, superficie raccolta, peso totale raccolto, ora e data e gli attributi dell'appezzamento registrati mediante *field marker*. Nei sistemi più semplici che non consentono di elaborare le mappe direttamente sulla mietitrebbia, i dati raccolti sono memorizzabili su PC card e quindi trasportabili sul personal computer aziendale dove saranno associati ai dati precedentemente raccolti e elaborate le mappe di resa.

varie operazioni colturali (figura 3). A tal proposito bisogna sottolineare la necessità di sviluppare *real-time sensors* per la determinazione della resa colturale.

Inoltre, alcune caratteristiche di un dato appezzamento vanno misurate *una tantum* (caratteristiche topografiche, tessitura, ecc.) mentre altre vanno determinate una volta all'anno (struttura, resistenza alla lavorazione dei terreni, profondità dello strato coltivabile, caratteristiche chimiche e biologiche dei terreni, resa colturale, ecc.).

Il rilevamento delle condizioni meteorologiche locali (precipitazioni, disponibilità idrica potenziale del suolo, ecc.), stagionali e difficilmente prevedibili, richiede la disponibilità di modelli di simulazione della risposta colturale al variare delle suddette.

Infatti, tali modelli saranno indispensabili per correggere le mappe di trattamento successivamente generate (basate sulla variabilità intra-appezzamento dei suoli) in funzione delle condizioni meteorologiche locali presenti nel momento in cui si dovranno eseguire le applicazioni spazialmente variabili. Tra i suddetti fattori meteorologici una particolare attenzione va riservata alla disponibilità idrica potenziale (la quantità di acqua che satura la microporosità dei terreni), quale fattore limitante la produzione colturale.

A tale scopo occorre quindi effettuare la pressoché continua misurazione dei fattori meteorologici, finalizzata a

disporre di valori costantemente aggiornati.

Pertanto, allo stato attuale, lo scopo da perseguire è quello della creazione di un'efficiente rete meteorologica, costituita da varie stazioni di rilevamento che elaborino dei modelli colturali di simulazione; sulla base di tali modelli le stazioni potranno fornire agli agricoltori informazioni meteorologiche affidabili ed economicamente convenienti e, di conseguenza, indicazioni sufficientemente affidabili sul momento ottimale di esecuzione delle varie applicazioni a dose variabile.

Tutti i dati raccolti vanno quindi organizzati mediante un software di elaborazione aziendale che consenta di collegare gli stessi ai corrispondenti dati di posizione, rilevati mediante il ricevitore GPS adottato; ciò al fine di ottenere mappe, relative alle caratteristiche dell'appezzamento, che siano sufficientemente rispondenti alla reale variabilità spaziale delle stesse.

Dall'interpretazione delle suddette mappe, basata anche sull'esperienza aziendale dell'agricoltore, è possibile derivare le raccomandazioni relative alle varie tecniche colturali, nella forma delle cosiddette mappe di trattamento.

Ad esempio, la formulazione delle raccomandazioni colturali relative alla concimazione azotata di un dato appezzamento deve fondarsi non soltanto sulla mappa relativa al contenuto in azoto ottenuta dall'analisi dei campio-

ni dei terreni considerati, ma anche sull'esperienza che l'agricoltore acquisisce durante la sperimentazione di diversi metodi di applicazione a dose variabile dell'azoto. Pertanto, i dati derivati dall'esperienza dell'agricoltore vanno anch'essi fatti confluire nel software di elaborazione aziendale.

Infine, l'ultima fase è rappresentata dall'esecuzione delle applicazioni a dose variabile.

Al fine di selezionare, nell'ambito di ciascuna tecnica colturale spazialmente variabile, il metodo che soddisfa maggiormente le esigenze colturali previamente determinate al livello localizzato, occorre creare dei semplici modelli di simulazione dell'efficienza produttiva delle suddette tecniche.

Nell'ambito di questi modelli uno attualmente impiegabile è quello probabilistico di simulazione al computer adottato da Paice e Day per paragonare gli effetti nel lungo periodo di due metodi di distribuzione a macchia di diserbanti (*patch spraying*).

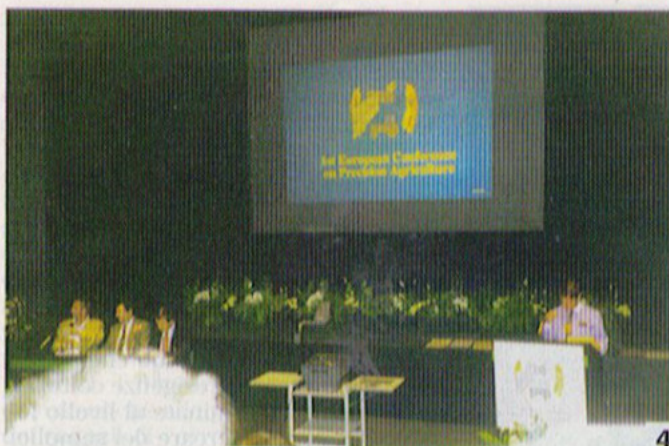
In particolar modo, sulla base dell'iniziale distribuzione delle infestanti e della risoluzione spaziale laterale (larghezza della sezione controllabile individualmente) dell'atomizzatore impiegato, sono stati esaminati i cambiamenti nell'estensione e nel modello dell'infestazione delle malerbe, nonché gli effetti economici, in termini sia di quantità utilizzata di diserbante che di perdita di resa indotta dalla flora infestante.

Il primo metodo è il *patch spraying* di tipo on/off, il quale consiste nell'erogare un'elevata dose di diserbante nelle aree della mappa di trattamento dove la densità delle infestanti è superiore ad una soglia di intervento previamente decisa e nessuna quantità dello stesso nelle aree dove la flora infestante è inferiore alla suddetta soglia.

Il secondo è il *patch spraying* a doppia dose, il quale consiste nell'applicare una dose elevata di diserbante nelle aree in cui la densità delle infestanti è superiore alla soglia di intervento e una dose inferiore nelle aree in cui la flora infestante è inferiore alla suddetta soglia.

La distribuzione a doppia dose risulta di gran lunga più efficiente e, quindi, preferibile a quella di tipo on/off, sia perché determina una più limitata diffusione di macchie di infestanti, sia perché è più redditizia, soprattutto quando si impiega un atomizzatore a limitata risoluzione spaziale laterale (Paice e Day, 1997).

Nell'ambito di un sistema di gestione spazialmente selettiva, le suddette fasi vanno ripetute ciclicamente e soltanto dopo almeno tre anni, in funzione del metodo adottato per l'analisi



4

Figura 4 - Schema del ciclo della mappa di trattamento



5



6

Foto 4 - Alla discussione finale della 1ª Conferenza europea sull'agricoltura di precisione hanno partecipato (nella foto rispettivamente da sinistra verso destra) Dr. Alex McBratney (Australian Centre for Precision Agriculture), Mr. Chris Dawson (Consulente agrario della Dawson Associates) e Dr. John Schueller (University of Florida) ed il Chairman Dr. John V. Stafford (Silsoe Research Institute).

Foto 5 - Per le applicazioni a dose variabile è possibile impiegare una semovente dotata del sistema di posizionamento della «SatCon» (nella foto è mostrata l'antenna satellitare di tipo «patch»), di un computer e di un sistema di controllo di applicazione.

Foto 6 - Sullo schermo del computer «Farmer Navigator», montato nella cabina della semovente della «SatCon», l'operatore può osservare la mappa di trattamento relativa al fattore produttivo da somministrare; questo è possibile grazie all'utilizzo, in ambiente «Windows '95», di un software scritto appositamente per tale applicazione.

Foto 7 - Il sistema di controllo della «SatCon» (il modello mostrato nella foto è adottabile per varie applicazioni a dose variabile), consente di somministrare la dose del fattore produttivo considerato sulla base della mappa di trattamento dopo aver scelto, tra l'altro, tra 5 possibili intensità di erogazione (come è dimostrato dai 5 tasti verdi visibili a destra nella foto). Nella fattispecie tale sistema è impiegato per la concimazione, come dimostrano i due LED accesi nei due tasti di controllo (visibili in basso a sinistra nella foto), utili a regolare la dose applicata in ciascuna delle due sezioni di distribuzione.



7

della variabilità spaziale intra-appezzamento, l'agricoltore può comprendere i fattori della stessa che limitano la resa colturale e, di conseguenza, stabilire, per ciascuna delle applicazioni a dose variabile, le dosi rispondenti alle effettive esigenze colturali.

Infatti, l'interpretazione visuale delle mappe di resa per tre anni successivi di gestione di tipo tradizionale (a dosi uniformi) permette di dividere l'appezzamento considerato in tre zo-

ne di resa potenzialmente uniforme (elevata, media e bassa), in ciascuna delle quali si possono scegliere sette punti, di cui si determinano le posizioni (mediante GPS). Quindi nelle aree intorno ai suddetti punti (10x10 m) va effettuato il *grid sampling* (campionamento a reticolo), a cui si fa seguire l'analisi dei relativi campioni, finalizzata a misurare le caratteristiche pedologiche e colturali dei terreni.

A questo punto, dopo il calcolo della

resa standardizzata per ogni stagione (differenza tra la resa di ogni punto e la resa media nella stagione considerata, divisa per la deviazione standard della resa nella stessa stagione), si effettua la cluster analysis o clustering. Si tratta di un metodo statistico di analisi multivariata, il quale consente di

identificare i *cluster*, ovvero i gruppi di posizioni dello stesso appezzamento aventi una resa simile nelle tre stagioni considerate. In particolare modo, se la variazione di resa tra un cluster e l'altro risulta continua o sfumata (*fuzzy*), il suddetto metodo è definito *fuzzy clustering*.

Bisogna però sottolineare che, al fine di identificare probabilisticamente le cause della variabilità intra-appezzamento, occorre unire i risultati della suddetta analisi statistica con quanto derivato da altre fonti di informazione, quali la successiva analisi di campioni di terreni prelevati nell'ambito dei suddetti *cluster* (campionamento stratificato), finalizzata a misurare le caratteristiche della variabilità spaziale intra-appezzamento, e prove di applicazioni a dose variabile; entrambe vanno condotte per almeno due stagioni consecutive (Lark e Stafford, 1997).

Un messaggio tra futuro e realtà

Nel settembre dello scorso anno, si è tenuta a Warwick (Gran Bretagna), la 1ª Conferenza europea sull'agricoltura di precisione nell'ambito della quale si sono valutati gli aspetti evolutivi di questa nuova tecnologia. È emerso, infatti, che una prima analisi economica dell'agricoltura di precisione può sovrastimare il costo d'attuazione, sottovalutare il futuro sviluppo tecnologico, non prevedere le modalità in cui la relativa tecnologia sarà impiegata e i futuri cambiamenti ad essa esterni.

In particolare modo, il costo d'attuazione della tecnologia di mappatura di resa diminuirà rapidamente, in quanto il sistema di mappatura di resa sarà presto fornito di serie da tutti i costruttori di mietitrebbiatrici.

Un sistema di gestione spazialmente selettiva può essere economicamente adottato da tutti gli agricoltori a prescindere dalle dimensioni aziendali. Infatti, anche gli agricoltori che gestiscono un'azienda il cui flusso di reddito non è sufficiente ad ammortizzare il costo di acquisto della suddetta tecnologia possono comunque affidare l'esecuzione delle operazioni colturali (ad esempio, raccolta) a contoterzisti dotati del macchinario necessario per l'attuazione della mappatura (ad esempio, mappatura di resa), senza perdere così i vantaggi che ne derivano.

Ancora carente risulta, purtroppo, la disponibilità di attrezzature per ottimizzare l'applicazione di questa tecnologia. Allo stato attuale, per esempio, la mappatura automatica è disponibile per il rilevamento di un ridotto nume-

ro di caratteristiche pedologiche e culturali; a livello commerciale è possibile soltanto il rilevamento della dotazione di sostanza organica dei suoli e della resa di alcune colture a raccolta meccanizzabile (cereali, barbabietola e patata).

In linea generale l'attuazione dei sistemi di gestione spazialmente selettiva è subordinata al soddisfacimento delle seguenti condizioni: orientamento verso la stessa delle linee produttive dei costruttori di macchine agricole, adozione di semplici metodi di indagine e di correzione, produzione automatica di mappe di trattamento.

In particolare modo, affinché l'agricoltore possa conseguire benefici in grado di ripagare il costo della mappatura di resa, egli deve indagare sulle cause delle basse rese, laddove esse si determinano e, di conseguenza, effettuare le opportune correzioni atte a rimuoverle.

Pertanto, nell'ambito del ciclo della mappa di trattamento (*figura 4*), le mappe di resa, unitamente alle altre informazioni disponibili, vanno fatte confluire direttamente nel computer in modo da produrre automaticamente le mappe di trattamento.

Siccome nelle prime fasi la produzione automatica delle mappe di trattamento non è affidabile, soprattutto allora è decisiva l'esperienza aziendale acquisita dall'agricoltore; pertanto, occorre scrivere il software che consenta il semplice e appropriato intervento dell'agricoltore.

Il suddetto ciclo va ripetuto per un certo numero di anni, durante i quali vanno eseguite le applicazioni a dose variabile, in base alle mappe di trattamento previamente prodotte (*foto 4, 5 e 6*); in questo modo, alla fine, l'agricoltore disporrà di un numero di dati sufficiente alla creazione del *background* pedologico e culturale della propria azienda.

In particolare modo, come già detto, qualora si utilizzi la cluster analysis, il periodo di raccolta dei dati di resa necessario e sufficiente per scoprire la variabilità intra-appezzamento e, di conseguenza, dividere l'appezzamento considerato in zone caratterizzate da una resa potenzialmente uniforme (in cui va successivamente effettuato il campionamento e l'analisi dei vari fattori produttivi), è di almeno tre anni (Lark e Stafford, 1997). Bisogna però sottolineare che è impossibile identificare le cause della variabilità intra-appezzamento soltanto sulla base delle suddette informazioni, bensì è possibile avere una cognizione probabilisticamente valida di queste ultime soltanto dopo avere unito le informazioni che scaturiscono dalla sud-

detta analisi statistica dei dati di variazione di resa con quelle derivate da altre fonti, quali il campionamento dei terreni e la conseguente analisi dei vari fattori produttivi e, non ultima in ordine di importanza, l'esperienza quotidianamente acquisita dall'agricoltore.

Pertanto, occorre annualmente interpretare le mappe di resa che seguono alle applicazioni a dose variabile.

A tale scopo è necessario disporre di modelli intelligenti basati sui seguenti dati: caratteristiche intrinseche dei terreni, matematica affidabile e strategia per la misurazione dell'azoto.

Al fine di produrre un affidabile software di gestione aziendale è necessario disporre di modelli di risposta colturale ai vari fattori produttivi.

Sebbene tali modelli di simulazione consentano, tra l'altro, di individuare e, di conseguenza, correggere tutti quei dati rilevati dai sensori (impiegati per la misurazione della variabilità spaziale intra-appezzamento di ciascun fattore produttivo) che risultano errati, essi sono molto complessi e richiedono un cospicuo input di dati. Pertanto, l'obiettivo da perseguire è quello della creazione di semplici modelli di simulazione, i quali consentano una gestione aziendale anch'essa semplice.

A ciò si aggiunga la necessità di definire il set minimo di fattori responsabili della crescita e della produzione colturale, quest'ultima intesa sia in termini di resa che di qualità produttiva. In particolare modo, allo stato attuale delle conoscenze, si può affermare che la variazione della produzione colturale è legata soprattutto alla disponibilità idrica potenziale e alla capacità-tampone espletata dai colloidi dei terreni nei confronti degli elementi nutritivi. In conclusione, da quanto esposto e discusso nel corso della Conferenza, si deduce che, nel quadro dell'agricoltura di precisione, la ricerca a lungo termine deve mirare all'ampliamento delle applicazioni, allo sviluppo di sensori per la misurazione delle caratteristiche della variabilità spaziale e all'elaborazione di semplici modelli di simulazione per i sistemi di supporto decisionale (DSS); invece, la ricerca e lo sviluppo urgenti devono riguardare la valutazione dei benefici per l'agricoltore, un'affidabile attuazione pratica e l'elaborazione di una strategia per la gestione spazialmente selettiva dell'azoto nei terreni.

Antonio Comparetti

Dottorando di ricerca

Dipartimento di ingegneria e tecnologie agro-forestali

Università degli studi di Palermo