

DESCRIZIONE DELLE FUNZIONALITÀ DI AEGIS/WIN, INTERFACCIA GIS DEL SOFTWARE DI SIMULAZIONE COLTURALE DSSAT. UN CASO STUDIO IN CAPITANATA

DESCRIPTION OF AEGIS/WIN, A GIS INTERFACE OF DSSAT CROP SIMULATION PACKAGE. A CASE-STUDY IN CAPITANATA PLAIN

Michele Rinaldi*, Vito Borneo

Consiglio per la Ricerca e Sperimentazione in Agricoltura - Istituto Sperimentale Agronomico
via Celso Ulpiani 5, 70125, Bari

* Corresponding author: tel. +39 080 5475061, fax +39 080 5475023, e-mail: michele.rinaldi@entecra.it

Ricevuto 16 dicembre 2005, accettato 26 aprile 2006

Riassunto

L'aumento delle informazioni raccolte e disponibili in forme di banche dati rende sempre più importante, anche in agricoltura, il ruolo dei sistemi geografici informativi (GIS). Essi sono tra gli strumenti usati nell'Agricoltura di Precisione (allocazione variabile delle risorse in funzione della variabilità spaziale), così come i modelli matematici, in grado, fra le altre cose, di simulare i sistemi colturali.

In questo lavoro vengono illustrate metodologie e procedure richieste nell'analisi spaziale condotta con l'AEGIS/WIN, interfaccia GIS del software di simulazione colturale DSSAT, in un'area campione di circa 10.000 ha in provincia di Foggia, suddivisa in una griglia regolare di 118 campioni di suolo. Ciascun punto è stato fatto simulare dal DSSAT nella sua tradizionale vocazione alla coltivazione del frumento duro, in uno scenario tradizionale asciutto e in uno con una irrigazione di soccorso, e nella coltura di pomodoro sottoposta a tre scenari irrigui. Sono state valutate le produzioni di residui vegetali, l'efficienza d'uso dell'acqua, la resa commerciale, l'incremento di produzione dovuto all'irrigazione di soccorso.

Con l'uso di AEGIS/WIN è stato possibile realizzare mappe tematiche che evidenziano zone più o meno produttive e quelle dove l'irrigazione ha avuto un effetto più o meno significativo. La capacità di trattenuta idrica dei diversi suoli ha inciso in maniera determinante nell'influenzare la risposta produttiva di entrambe le colture.

Lo strumento del modello di simulazione combinato con il GIS può consentire di individuare le aree dove migliorare la tecnica agronomica e quindi permettere una migliore allocazione spaziale delle risorse, specie quella idrica.

Parole chiave: modelli di simulazione, variabilità spaziale, frumento, pomodoro, scenari irrigui

Abstract

The increase of data collected and their availability in data-base makes important, also in agriculture, the role of geographic information systems (GIS). They are among the tools of Precision Agriculture (variable-rate resources allocation as a function of spatial variability) like the crop simulation models that allow, among the other things, to simulate different cropping systems.

In this work, methodologies and procedures used in spatial analysis carried out with AEGIS/WIN, a GIS interface of DSSAT crop simulation package, are described.

The case-study is referred to a 10.000 ha area (Foggia, Southern Italy), characterized by 118 soil samples collected at a regular grid. Durum wheat and processing tomato, widely cropped in the area, have been simulated puntual-based for the 118 soils and with long-term weather data (52 years). For durum wheat rainfed and with one irrigation scenarios, while for tomato three different levels of soil water availability to start automatic irrigation scenarios have been compared.

Mapped output variables (yield, drainage, seasonal irrigation, water use efficiency, percentage yield increment) with AEGIS/WIN allow us to check the areas more or less suitable for durum wheat and tomato crops. Soil water holding capability in the different soils influenced mainly the above productive variables for both crops.

Simulation model combined with GIS could represent an useful tool to recognize the areas where to improve crop management and to permit the best spatial allocation of resources (Precision Agriculture principles), especially water.

Keywords: simulation models, spatial variability, durum wheat, tomato, irrigation scenario

Introduzione

La gestione agricola del terreno che tiene conto della variabilità intrinseca e indotta del suolo e delle specifiche esigenze delle colture al fine di migliorare la produzione, minimizzare i danni ambientali ed elevare gli standard

qualitativi dei prodotti agricoli, prende il nome di Agricoltura di Precisione (Pierce e Nowak, 1990; National Research Council, 1997; Robert, 2002). L'agricoltura tradizionale considera tutti i terreni di una stessa area

omogenei e non variabili nello spazio e, quindi, sottoposti a una tecnica colturale se non proprio identica, almeno a grandi linee, simile; solo l'esperienza del singolo operatore o l'interpretazione di analisi chimico-fisiche possono dare indicazioni su particolari carenze o eccessi di nutrienti nel suolo e orientare meglio la pratica della fertilizzazione. Tuttavia, l'ottimale gestione della difesa dai patogeni, della pratica irrigua, delle tecniche di lavorazione, dei tempi di semina e di raccolta, può differire in modo notevole in funzione della variabilità esistente a livello spaziale (Basso *et al.*, 2000). L'Agricoltura di Precisione si avvale di strumenti e metodologie (immagini telerilevate, geostatistica, modelli di simulazione, sensori di resa) per apprezzare le variabili fisico-chimico-biologiche che insistono su di un'area agricola, e di macchine agricole operatrici idonee per la distribuzione localizzata e graduale del fattore di produzione (irroratrice, metodo irriguo, spandiconcime, seminatrice), migliorando così l'efficienza d'uso delle risorse.

Strumenti, quindi, dell'Agricoltura di Precisione, sono i modelli matematici di simulazione, che permettono di confrontare scenari di tecnica agronomica (risposta alla domanda "What if"), di effettuare valutazioni agro-ambientali ed economiche, previsioni di resa in funzione di cambiamenti climatici (Matthews, 2002). Quelli impiegati negli ultimi decenni sono stati utilizzati a scala puntuale, ma l'esigenza dell'"up-scaling", cioè di considerare aree più ampie e tenere conto delle variazioni climatiche e pedologiche (Analisi spaziale o *Spatial Analysis*) ha portato molti modelli a prevedere anche un'interfaccia con programmi GIS (*Geographic Information System*) che permettono di legare le informazioni al sito geografico a cui si riferiscono.

Tra i modelli matematici puntuali in grado di simulare sistemi colturali e scenari di agrotecnica, che hanno avuto applicazioni anche su scala spaziale attraverso interfacce GIS, si ricordano EPIC (Satya Priya e Shibasaki, 2001; Tan GuoXin e Shibasaki, 2003), CropSyst (Stockle, 1996; Badini *et al.*, 1997; Donatelli *et al.*, 1999; Francaviglia *et al.*, 2001) e DSSAT.

Questo ultimo programma, anche per i corsi annuali di formazione organizzati dal consorzio che lo ha realizzato, è stato largamente utilizzato nella simulazione di sistemi colturali e per applicazioni di vario genere in diverse parti del mondo (Hook *et al.*, 1998; Macrobert e Savage, 1998; Alexandrov e Hoogenboom, 1999; Garrison *et al.*, 1999; Jagtap *et al.*, 1999; Heinemann *et al.*, 2002; Rinaldi, 2004). Nella versione 3.5 è stato inserito un modulo per la visualizzazione e l'analisi delle variabili di output del DSSAT come input in ambiente GIS, attraverso il software Arcview, denominato AEGIS/WIN (Engel *et al.*, 1997; Hartkamp *et al.*, 1999a). Applicazioni del DSSAT a scala spaziale sono riportate in letteratura, aventi come finalità la stima dei fabbisogni idrici (Heinemann *et al.*, 2000, 2002; Nijbroek *et al.*, 2003), la gestione della variabilità spaziale e temporale (Batchelor *et al.*, 2002).

Obiettivo del presente lavoro è quello di illustrare il modulo AEGIS/WIN associato al software DSSAT, descriverne le funzionalità e le potenzialità, mostrare, infine, un caso di studio, in cui l'analisi spaziale viene applicata ad un'area della Capitanata.

Materiali e metodi

Il modello DSSAT (ver. 3.5)

Il DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), è costituito da diversi modelli colturali (CERES, CROPGRO, OILCROP-SUN, che simulano oltre 20 colture tra cui: frumento, orzo, mais, sorgo, patata, pomodoro, girasole, riso,...) e vari altri programmi che permettono di tenere conto dei cambiamenti climatici, degli avvicendamenti, della sequenza - sullo stesso suolo e per lunghi periodi - di sistemi colturali, della variabilità spaziale e della convenienza economica delle diverse strategie agronomiche.

Il DSSAT nasce negli anni '80 da un progetto chiamato IBSNAT (International Bank-mark Sites Network for Agrotechnology Transfer), con l'obiettivo di sviluppare una tecnologia di simulazione computerizzata che potesse permettere l'analisi di un'ampia fascia di problemi agricoli, ambientali, economici (Uehara e Tsuji, 1993). Il progetto nasce, sostanzialmente, dalla constatazione che le risorse alimentari mondiali sono in continuo decremento, mentre la popolazione che la terra deve sopportare continua rapidamente ad aumentare. Tutto ciò pone maggiori problemi all'agricoltura: infatti, le produzioni devono essere incrementate per potere soddisfare il rapido aumento di domanda e, nello stesso tempo, le risorse naturali devono assolutamente essere protette. La nuova ricerca in campo agricolo ha bisogno di fornire informazioni agli agricoltori, agli imprenditori e agli uomini politici su come poter realizzare un'agricoltura sostenibile soprattutto quando sono previsti importanti cambiamenti climatici.

La ricerca tradizionale non può soddisfare del tutto il bisogno di queste informazioni. Gli esperimenti tradizionali sono condotti, infatti, in particolari punti nel tempo e nello spazio e i risultati sono quindi specifici per un determinato luogo e per una determinata stagione; inoltre, le ricerche tradizionali richiedono, nel campo agricolo, periodi molto lunghi. E' quindi improbabile che vi siano delle ricerche che possano fornire informazioni necessarie nei tempi richiesti.

Inizialmente al progetto IBSNAT hanno partecipato diversi ricercatori che sviluppavano modelli di simulazione in diverse parti del mondo; nell'Università delle Hawaii, nell'Università della Florida, nell'Università del Michigan, nell'Università di Guelph (CAN), nell'Università di Edimburgo (UK) e nell'International Fertilizer Development Center (USA). Il sistema DSSAT è stato scelto per essere usato nello studio dell'USEPA (U.S. Environmental Protection Agency) sul cambiamento climatico e riserve alimentari mondiali, (Rosenzweig e Parry, 1994) proprio perché con l'IBSNAT si è creata una rete internazionale di scienziati che ha potuto testare e applicare i modelli nei loro ambienti e in specifiche condizioni di gestione colturale.

Il sistema DSSAT opera su personal computer in ambiente DOS (la versione 4.0 anche su sistema operativo MS Windows[®]) e simula una crescita stagionale in un tempo breve, in molti casi alcuni secondi, consentendo l'effettuazione di simulazioni per un numero elevato di

anni che risultano utili per gli studi climatici e su effetti tipicamente a lungo termine.

Il DSSAT è stato sviluppato per permettere a coloro che lo adoperano di:

- organizzare e gestire dati relativi alla coltura, al suolo e alle situazioni meteorologiche;
- analizzare, riportare e poter mostrare i dati;
- calibrare e validare i modelli di crescita colturale valutando, infine, le differenti pratiche gestionali per specifiche condizioni ambientali.

Le fasi operative per usare il DSSAT sono le seguenti (Jones *et al.*, 2003):

- 1) si raccolgono i dati sperimentali in campo, il così detto "minimum data set", richiesti per la calibrazione e validazione del modello colturale;
- 2) si rilevano i dati sulle caratteristiche del suolo e dati meteorologici sia del periodo considerato che storici;
- 3) si conduce un'analisi di sensibilità del modello, valutando la risposta dello stesso alla variazione di una variabile di input (es: data di semina, concimazione, irrigazione, temperatura, etc);
- 4) utilizzando i dati rilevati si eseguono simulazioni con il modello, al fine di valutarne la capacità nel prevedere le performances delle colture nel sito considerato. Molto spesso sono utilizzati dati raccolti in precedenti esperimenti;
- 5) si individua un set di pratiche gestionali e si avvia una simulazione per ognuna di queste, in modo da fare previsioni sulle risposte delle colture;
- 6) si confrontano, infine, le diverse pratiche colturali utilizzando apposite analisi statistiche (medie, varianza, la distribuzione della probabilità cumulativa delle rese simulate, ecc).

Il minimum data set

Il minimum data set, che costituisce il set di base di informazioni necessario per far girare il modello, ma anche per una comprensione dei risultati dell'esperimento che è stato condotto, è un file in formato testuale e viene realizzato con un comune editor (p. es. "Block Notes") ed include:

- dati meteorologici (weather file): dati giornalieri di temperatura massima, temperatura minima, precipitazione, radiazione solare, umidità e velocità del vento;
- database dei suoli (soil file): dati sulla composizione chimico-fisica del suolo, contenuto idrico del suolo, azoto e carbonio, albedo, etc.;
- database delle specie (crop file): dati sulle caratteristiche della varietà, rese, fasi fenologiche, etc.;
- dati dell'esperimento (management file): informazioni sulle tecniche di gestione, come ad esempio la semina, le irrigazioni, la concimazioni, la raccolta, la sequenza delle colture in rotazione, etc.

Questi dati sono essenziali per potere definire tutte le condizioni pedo-climatiche e gestionali della (o delle) coltura (e) e le sue performances produttive.

Nel modello troviamo diversi moduli di calcolo (routine) per la gestione di questi dati:

- BACKGROUND: informazioni sulla stazione e il campo di sperimentazione a cui si riferiscono i dati.
- EXPERIMENT: editing dei dati di gestione degli esperimenti. Questi dati, riguardano le lavorazioni, la semina,

le concimazioni, la raccolta, etc. oltre ad informazioni generali sul tipo di simulazione e gestione degli output.

- GENOTYPE: editing e calcolo dei dati sulle cultivar (coefficienti genetici).
- WEATHER: editing dei dati meteorologici, creazione di un weather file compatibile con il DSSAT, riempimento dei dati mancanti, analisi statistica dei dati, etc.
- SOIL: editing delle caratteristiche chimico fisiche del suolo, gestione del database dei suoli, etc.

Preparazione del Weather file

Il Weather file è un file ASCII con estensione *.wth contenente le informazioni medie giornaliere (una riga per ciascun giorno) riguardanti la temperatura massima (TMAX), la temperatura minima (TMIN), la radiazione solare (SRAD) e la precipitazione (RAIN). Altre variabili possono essere inserite, ma non sono indispensabili (temperatura di rugiada, DEWP, velocità media del vento, WIND e radiazione fotosinteticamente attiva, PAR). Ogni file è rappresentativo di un anno solare.

```

*WEATHER DATA : FoggiaAZ.Pod.124
@ INSI      LAT      LONG      ELEV      TAV      AMP      REFHT      WNDHT
@ ISFG      41.500    15.100    70      15.6      9.0      -99.0      -99.0
@DATE      SRAD      TMAX      TMIN      RAIN      DEWP      WIND      PAR
00001      9.9      8.0      0.0      0.0
00002      4.6      8.2      -0.2      10.5
00003      8.7      9.5      2.0      0.2
00004      9.5      12.5      1.5      0.0
00005      9.5      12.5      1.9      0.0
00006      9.9      14.0      3.0      0.0
00007      6.3      11.5      3.0      0.0

```

Fig. 1 – Visualizzazione del file meteo ISFG0001.WTH in blocco note

Fig. 1 – Visualization of ISFG0001.WTH weather file in block notes

Informazioni aggiuntive riportate nella parte iniziale del file, riguardano la stazione meteorologica di riferimento, la sua ubicazione geografica in coordinate geografiche del tipo latitudine (LAT) e longitudine (LONG), l'elevazione in metri rispetto al livello del mare (ELEV), temperatura media dell'aria (TAV) e ampiezza della temperatura media mensile (AMP).

I dati relativi ai 53 anni (1952-2004), opportunamente organizzati secondo le regole del DSSAT e utilizzati nel caso di studio (Fig. 1), provengono dalla stazione agrometeorologica sita nell'Azienda Sperimentale Pod. 124 di Foggia.

Preparazione del Soil file

Il Soil file è un file ASCII con estensione *.sol che contiene le informazioni sulle caratteristiche dei suoli nei diversi siti, distinte per strato omogeneo di cui si riporta la profondità inferiore (SLB), tra cui: l'argilla (SLCL), il limo (SLSI), lo scheletro (SLCF), il limite superiore di saturazione (SSAT), il limite inferiore di trattenuta idrica (SLLU) e quello superiore (SDLL), la densità (SBDM), l'azoto totale (SLNI), il carbonio organico (SLOC).

Una parte del file SOIL.SOL utilizzato nel caso di studio è riportato nella Fig. 2, da cui si evince come ogni suolo è stato suddiviso in 8 strati di profondità variabile da 0 a 150 cm, considerata la profondità media dei suoli della zona.

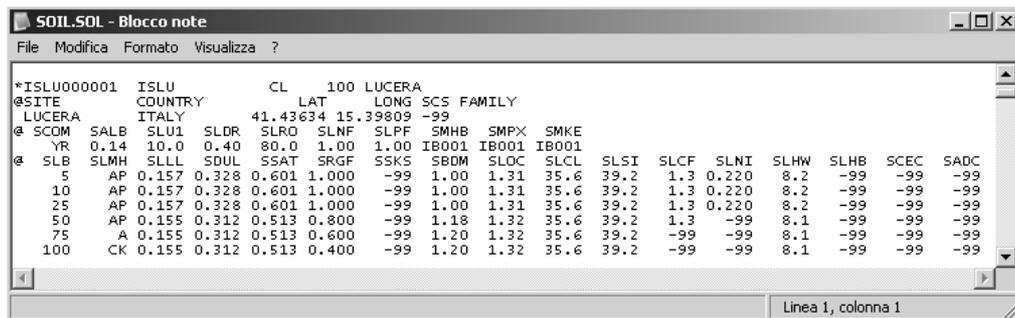


Fig. 2 – Visualizzazione di parte del file SOIL.SOL utilizzato per l' esperimento in blocco note

Fig. 2 – Visualization of part of SOIL.SOL file used for the experiment in block note

Preparazione del file Experiment (X)

Il file Experiment, sinteticamente chiamato FILEX, contiene tutte le informazioni relative all'esperimento che si vuole simulare, come le specie coltivate, le lavorazioni del suolo, la data e il tipo di semina adottata, data, tipologia, metodologia e quantità delle applicazioni fertilizzanti e delle irrigazioni, modalità della gestione dei residui colturali, data e tipo di raccolta. Contiene informazioni generali sulla simulazione (anni, data di inizio della simulazione, diverse opzioni sui vari moduli, sulle formule da adottare per il calcolo di vari parametri), informazioni sulla gestione automatica delle varie tecniche colturali ed, infine, opzioni sulla gestione dei file di output.

L'estensione del FILEX mantiene invariata solo l'ultima lettera (*.**X) mentre le prime due variano in funzione della coltura rappresentativa, ovvero avremo per il grano (Wheat) *.WHX e per il pomodoro (Tomato) *.TMX.

Il DSSAT analizza le colture in modo puntuale senza eventuali influenze morfologiche e geografiche, impiegando solo i dati meteorologici per l'adattamento al clima. Ulteriori informazioni vengono riportate ed analizzate esclusivamente da un particolare FILEX, lo SPATIAL FILEX (*.GSX) mediante l'aggiunta dei campi (Field) riportando latitudine, longitudine, quota s.l.m. ed area. L'Analisi Spaziale (Spatial Analysis) consente l'associazione dei risultati di una località all'interno della mappa geografica della località stessa. L'Analisi non viene gestita dal DSSAT, ma indirettamente da un suo applicativo: l'AEGIS/WIN.

La creazione dei vari file di input (minimum data set) in formato testo non guidata da un'interfaccia grafica, è un'operazione complessa e laboriosa. La versione 4.0 del DSSAT ha permesso il pieno sfruttamento dell'ambiente Windows a scapito, però, della funzionalità dell'AEGIS/WIN, ad oggi non più supportato.

Utilizzo di AEGIS/WIN

L'interfaccia tra il modello di simulazione adottato in DSSAT ed il Sistema Informativo Territoriale gestito da Arcview prende il nome di AEGIS/WIN. Tale interfaccia è un file con estensione *.apr, file nativo di Arcview[®], in cui sono stati aggiunti alcuni script, programmati usando il linguaggio di programmazione Avenue, necessari per implementare le funzionalità del DSSAT nella versione 3.5, quali per l'appunto l'Analisi Spaziale dei dati.

La rigida struttura procedurale di AEGIS/WIN, come del resto anche del DSSAT, implica la corretta disposizione

all'interno dell'Hard disk di file e cartelle come di seguito illustrato. Nella cartella di AEGIS/WIN bisogna inserire uno shapefile di tipo poligonale (estensione *.shp), il cui database sia così composto (nel nostro esempio il file si chiama Whea.shp, Fig. 3):

Shape	Id	Whea	Wsta	Id_soil	Area
Polygon	0	1	ISFG	ISLU000001	1023430.508
Polygon	0	2	ISFG	ISLU000002	1538110.090
Polygon	0	3	ISFG	ISLU000003	1941432.502
Polygon	0	4	ISFG	ISLU000004	776522.648

Fig. 3 – Tabella degli attributi del file Whea.shp visualizzata in Arcview

Fig. 3 – Table of the attributes of the Whea.shp file visualized in Arcview

Shape Shapefile di tipo poligono;

Id l'identificativo dello shapefile, impostato di default zero, può assumere qualunque valore;

name il numero progressivo del Poligono. L'attributo deve avere lo stesso nome del file con l'aggiunta di “_” (nell'esempio in figura 3 Whea_);

Wsta il codice della stazione meteorologica (4 caratteri);

Id_soil Il codice del suolo (10 caratteri);

Area Il valore dell'area del poligono.

Tali informazioni, per quanto necessarie al programma, hanno una esclusiva valenza informativa, ovvero non partecipano direttamente all'input dei dati nel DSSAT, ma esclusivamente all'output in AEGIS/WIN.

Bisogna anche creare nella cartella di AEGIS/WIN una sottocartella denominata con lo stesso nome dello shapefile e all'interno di essa un'altra sottocartella denominata “DATA”, nel nostro esempio:

C:\aegiswin (contiene Whea.shp)

C:\aegiswin\Lucera\DATA (contiene i file per eseguire l'esperimento)

La sottocartella “DATA” deve contenere i seguenti file:

****X** Il file X spaziale necessario per eseguire il DSSAT;

soil.sol il file soil.sol di DSSAT utilizzato per l'esperimento;

.wth i file meteorologici di DSSAT utilizzati per l'esperimento;

exp.lst un file con la lista degli esperimenti da eseguire.

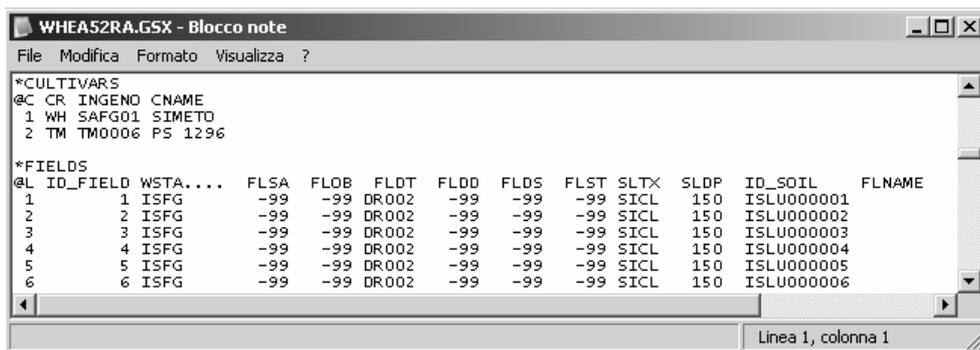


Fig. 4 – Visualizzazione di parte del file WHEA52RA.GSX in blocco note

Fig. 4 – Visualization of a part of WHEA52RA.GSX file in block notes

I file meteo “*.wth” e il file del suolo “soil.sol” sono gli stessi già descritti nei paragrafi precedenti.

Il FILEX (nel nostro caso WHEA52RA.GSX) è uno SPATIAL FILEX, ovvero un comune FILEX utilizzato dal DSSAT, con l’aggiunta dei campi “field”. Nel nostro esempio nel FILEX abbiamo inserito 118 “fields” con 118 differenti tipi di suolo (Fig. 4).

Realizzazione dello shapefile poligonale

L’elenco delle coordinate geografiche dei 118 punti è stato convertito in coordinate piane UTM con Fuso 33 Nord, uniformando in tal modo le nostre informazioni ad altre reperibili sul web e inserite in uno shapefile di tipo puntuale.

Dal sito web <http://glcfapp.umiacs.umd.edu:8080/e-sdi/index.jsp> di GLCF: Earth Science Data Interface è possibile accedere gratuitamente al download di immagini satellitari provenienti da tutto il mondo, come nel nostro caso l’immagine Landsat datata 1999 relativa alla provincia di Foggia (Figura 5).

L’implementazione in Arcview di vari script aggiuntivi consente piena autonomia, consentendo di risolvere problematiche geostatistiche. Lo script da noi utilizzato ha consentito, mediante il metodo di Thiessen (o di Dirichlet), di convertire uno shapefile puntuale in uno di tipo poligonale, applicando un valore di soglia pari a 5 e man-

tenendo tutte le informazioni precedentemente caricate nel database (Fig. 6). Il metodo dei poligoni di Thiessen è il migliore per dati qualitativi, dove altri metodi di interpolazione non sono accettabili (Hartkamp *et al.*, 1999b).

Lo shapefile così ottenuto è pronto per essere utilizzato in AEGIS/WIN a meno delle variazioni nel database, come precedentemente illustrato.

Interfaccia di AEGIS/WIN

Caricato in Arcview il file aegiswin.apr, nel *Menu bar* del programma viene aggiunto il Menu “DSSAT3-Interface” e vengono modificati gli altri Menu, lasciando invariate le funzionalità del programma.

Aggiunto il tema rappresentativo dei 118 suoli (nel ns. esempio Whea.shp), dal Menu “DSSAT3-Interface” eseguiamo il comando “Run Simulation”, scegliendo l’esperimento tra quelli proposti. Gli esperimenti eseguibili sono quelli precedentemente riportati all’interno del file EXP.LST. In tal modo AEGIS/WIN avvia la simulazione del DSSAT, eseguendo il programma con interfaccia DOS mapdrv.exe.

Successivamente, a simulazione completata, sempre dallo stesso menu scegliamo “Read Summary-Output”, ovvero facciamo leggere al programma i file di output del DSSAT ed infine “Join to Result Table”, cioè aggiun-

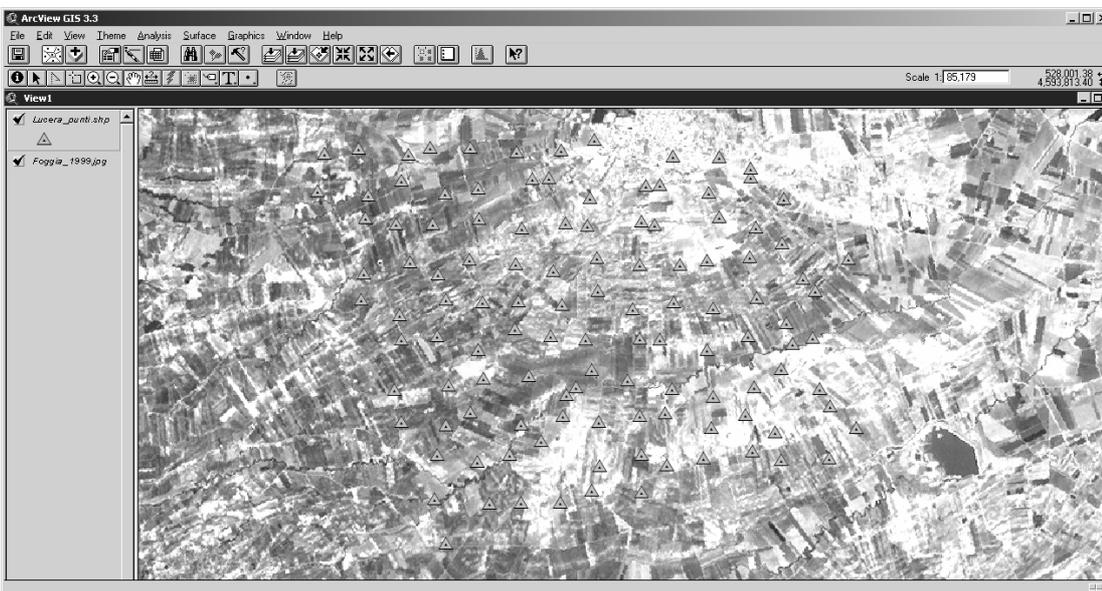


Fig. 5 – Visualizzazione in Arcview dello shapefile dei punti sull’immagine Landsat

Fig. 5 – Visualization in Arcview of the shapefile of the points on the Landsat image



Fig. 6 – Visualizzazione in Arcview dello shapefile realizzato con il metodo di Thiessen
Fig. 6 – Visualization in Arcview of the shapefile realized with Thiessen method

giamo le informazioni di output, opportunamente codificate, all'interno di Arcview.

Dall'ulteriore menu "Simulation Results" è possibile aggiungere direttamente alla mappa i risultati delle diverse variabili di output, consentendo la gestione dell'Analisi Spaziale dei dati in piena sovrapposizione con altri esperimenti o altri dataset in possesso dall'utente.

Caso di studio

L'area di studio

L'area del caso di studio ha una forma all'incirca quadrata (10 km di lato, pari a circa 10000 ha), localizzata nel Tavoliere pugliese e ricadente nei comuni di Lucera e Biccari (Foggia). E' un'area tradizionalmente vocata alla coltivazione del frumento duro che viene avvicendato con pomodoro da industria in rotazioni triennali o quadriennali. L'altitudine varia fra i 100 e i 350 m.s.l. e l'uso del suolo è principalmente a seminativi erbacei e subordinatamente a oliveti e vigneti.

I suoli variano da scarsamente calcarei a calcarei, da moderatamente profondi a molto profondi, la tessitura da moderatamente fine a fine, lo scheletro da abbondante a molto abbondante negli orizzonti profondi, mentre la pietrosità superficiale generalmente è scarsa e solo occasionalmente diviene più elevata. In figura 7 è riportata per ciascun suolo l'acqua disponibile per la coltura (CAW, in mm m^{-1}), calcolata con la formula:

$$CAW = (CIC - PA) * 1000$$

dove CIC è la capacità idrica di campo (contenuto idrico a -0,03 MPa, in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e PA è il punto di appassimento (contenuto idrico a -1,5 MPa, in $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), misurati con le piastre di Richards e riferiti allo strato di 1 m.

Il clima è "termomediterraneo accentuato" (carte Unesco-FAO), con temperature che possono scendere sotto lo 0 °C in inverno e superare i 40 °C in estate (con valori giornalieri anche superiori a 10 mm d^{-1} da evaporimetro di classe A). La pioggia è irregolarmente distribuita nel

corso dell'anno (550 mm anno^{-1}), concentrata prevalentemente tra ottobre e gennaio (Fig. 8).

Dati disponibili

L'area è stata oggetto di un campionamento pedologico costituito da rilievi puntuali effettuati su 118 siti campione definendo in tal modo una griglia regolare di circa 1 km x 1 km (Castrignanò *et al.*, 2001). Al centro di ciascuna cella sono stati prelevati campioni indisturbati (7 cm x 5 cm) e disturbati (carotaggio di terreno del diametro di 5 cm), a due profondità 0-25 cm e 25-50 cm nel novembre 1997. A ciascuna profondità i campioni disturbati prelevati in punti diversi, nel raggio di circa 1 m, sono stati quindi mescolati insieme per produrre un unico campione composito. I punti di prelievo sono stati georeferenziati utilizzando un sistema GPS palmare del tipo GeoExplorer II della Trimble e la registrazione è stata effettuata, per un periodo continuato di almeno 15 min., solo quando 5 o più satelliti erano visibili (più di 15° al di sopra dell'orizzonte), e il PDOP (Position Dilution of Precision), che è un'indicazione della geometria dei satelliti, era inferiore a 6. I dati sono stati quindi elaborati con il software Pathfinder Office della Trimble, che fa riferimento come ellissoide matematico al WGS-84 (World Geodetic System - 1984) e converte da coordinate geografiche a coordinate locali UTM.

I campioni di suolo sono stati analizzati in laboratorio al fine di determinare i seguenti parametri: scheletro (%), sabbia grossa (2-0,2 mm, %), sabbia fine (0,2-0,02 mm, %), limo grosso (0,02-0,05 mm, %), limo fino (0,05-0,002 mm, %), argilla (< 0,002 mm, %), capacità di campo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, a -0,03 MPa), punto di appassimento ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, a -1,5 MPa), conducibilità elettrica (dS m^{-1}), pH (in acqua), N-NO₃ (mg kg^{-1}), N-NH₄ scambiabile (mg kg^{-1}), carbonio organico (mg kg^{-1}), P assimilabile come P₂O₅ (mg kg^{-1}), K scambiabile come K₂O (mg kg^{-1}), Na (mg kg^{-1}), Mg (mg kg^{-1}).

Le profondità dei vari strati sono state le seguenti :0 – 5, 5 – 10, 10 – 25, 25 – 50; 50 – 75, 75 – 100, 100 – 125 e 125 – 150 cm. Nonostante i dati rilevati siano inerenti i

Tab. 1 – Medie, deviazioni standard e coefficienti di variabilità delle produzioni commerciali (in kg di sostanza secca ha⁻¹) di frumento duro (simulate da CERES-Wheat) e di pomodoro (simulate da CROPGRO) nel caso-studio, riferito ai 52 anni di simulazione e ai 118 tipi di suolo

Tab. 1 – Averages, standard deviations and variation coefficients of commercial yields (in kg of DM ha⁻¹) of durum wheat simulated by CERES-Wheat and of tomato simulated by CROPGRO, in the case-study, referred to the 52 years of simulation and to the 118 soils

	Frumento duro			Pomodoro			
	Poten- ziale	RAINFED	FIXIRR	Poten- ziale	AUT25	AUT50	AUT75
Media	3507	3008	3329	11467	8385	9523	9813
Deviazione Standard (Std)	669	710	609	915	1483	752	846
C.V.	19,08	23,60	18,29	7,98	17,69	7,90	8,62
Std tra suoli	-	297	156	-	753	547	537
C.V. tra suoli	-	9,87	4,69	-	8,98	5,74	5,47
Std tra anni	-	654	592	-	1301	541	659
C.V. tra anni	-	21,74	17,78	-	15,51	5,68	6,71

primi 50 cm di terreno, procedure geostatistiche hanno consentito di stimare le caratteristiche degli strati a profondità fino a 150 cm. I valori dei campioni misurati alle due profondità (0 – 25 cm e 25 – 50 cm) sono stati mediati mediante analisi di coregionalizzazione in modo da ottenere sezioni del terreno più verosimilmente compatibili con quelli di accrescimento radicale della pianta e di variabilità di strato dei suoli del Tavoliere Pugliese, caratterizzato da ampi tavolati depositati su masse calcaree e calcarenitiche.

I dati meteorologici giornalieri di temperatura (massima e minima) precipitazioni e radiazione in nostro possesso, misurati presso la stazione meteorologica di Foggia (distante in media circa 10 km dall'area esaminata), si riferiscono al periodo dal 1952 al 2004. Ci consentono, pertanto, di attuare una "seasonal analysis", facendo ripetere per 52 annate agrarie la simulazione, re-inizializzando ogni anno le condizioni di partenza.

Gli scenari simulati

Le colture simulate sono state il frumento duro ed il pomodoro da industria, largamente coltivate nell'area esaminata e per le quali il modello DSSAT è stato già in precedenza calibrato (cultivar SIMETO per il frumento e ibrido PS 1296 per il pomodoro) e validato (Rinaldi, 2001; Rinaldi, 2004; Rinaldi e Gagliano, 2005; Rinaldi *et al.*, 2006).

Delle due colture è stata, innanzitutto, simulata la produzione potenziale dell'ambiente considerato (**WHEPOT**, **TOMPOT**), quella cioè dipendente solo dalla temperatura e dalla radiazione, che si ottiene disattivando i moduli di azoto e acqua. Gli altri scenari agrotecnici simulati hanno riguardato, per il frumento:

1. **RAINFED** (con le sole precipitazioni meteoriche)
2. **FIXIRR**, con una sola irrigazione a metà aprile di 50 mm.

Per il pomodoro da industria:

1. **AUT25**, con irrigazione automatica al raggiungimento del 25% dell'acqua disponibile per la coltura nello strato di suolo 0-30 cm, ripristinando il 100% dell'acqua;
2. **AUT50**, come la 1., ma con l'intervento al 50% dell'acqua disponibile;

3. **AUT75**, come la 1., ma con l'intervento al 75% dell'acqua disponibile.

Questi scenari agrotecnici sono stati scelti in funzione dell'interesse agronomico che hanno nella zona. Infatti, per il grano duro, prevalentemente coltivato in asciutto, risulta molto utile conoscere la risposta produttiva della coltura su base di lungo periodo (analisi stagionale) e ter-

ritoriale (analisi spaziale) se viene irrigata durante una fase notoriamente critica che è quella precedente la spigatura. Per il pomodoro, invece, è utile valutare i margini di una riduzione dell'apporto irriguo, anche in previsione di una disponibilità della risorsa idrica sempre minore a causa della concorrenza con altri settori e dei cambiamenti climatici in atto.

Le variabili di output esaminate e visualizzate con il software ARCGIS sono state per il grano duro: la produzione commerciale (t ha⁻¹ di s.s.), i residui vegetali (t ha⁻¹ di s.s.) e l'efficienza d'uso dell'acqua (produzione commerciale/evapotraspirazione reale, in kg ha⁻¹ mm⁻¹) e l'incremento percentuale tra produzione commerciale della tesi FIXIRR rispetto a quella RAINFED. Per il pomodoro: la produzione commerciale (t ha⁻¹ di s.s. delle bacche), il volume stagionale di irrigazione (mm) e il drenaggio stagionale (mm).

Risultati

La resa potenziale del **frumento duro**, simulata dal modello, è stata in media per i 52 anni pari a 3507 kg ha⁻¹, con oscillazioni tra 2411 e 5214 kg ha⁻¹, non lontana dalle rese che si ottengono in realtà (Tab. 1).

Passando a commentare la figura relativa alla produzione di residui vegetali (Figura 9) nei due scenari simulati per il frumento duro, emerge come l'unica irrigazione del 15 aprile ha fatto incrementare positivamente la produzione del 15% nella metà dei suoli, mentre nell'altra metà la differenza è stata dell'ordine del 5%.

Dalle simulazioni è risultato un aumento dell'efficienza d'uso dell'acqua, passando dalla tesi RAINFED a quella FIXIRR (Figura 10). Diversi suoli sono rimasti nella stessa classe di valori, ed in particolare in quella di maggiore frequenza (tra 9,0 e 9,5 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Particolarmente bassi i valori, in entrambi gli scenari, del suolo n. 52, caratterizzato da una quantità di acqua disponibile per la coltura pari a solo 77 mm m⁻¹ e dei suoli 34 e 72, anch'essi con meno di 100 mm m⁻¹ (Figura 7).

La produzione di granella è risultata in linea con le produzioni normalmente ottenute in zona (3008 kg ha⁻¹ per la tesi RAINFED e 3329 kg ha⁻¹ per la FIXIRR, Tabella 1). La simulazione ha evidenziato l'effetto positivo

dell'unica irrigazione effettuata in una fase prossima alla spigatura, con un incremento medio nei 52 anni e per i 118 suoli rispetto alla tesi non irrigata di oltre il 10%.

Da segnalare come la variabilità delle produzioni simulate nei diversi suoli si sia ridotta in maniera significativa con l'irrigazione, con un coefficiente di variabilità (C.V.) che è sceso da circa il 10% nel caso dello scenario RAINFED al 5%, in quello FIXIRR. La variabilità tra anni, che condiziona pesantemente le rese nel Sud Italia, è risultata comunque alta nei due scenari: la standard deviation è stata pari a $\pm 654 \text{ kg ha}^{-1}$ (C.V. di circa 22%) nella tesi RAINFED, $\pm 592 \text{ kg ha}^{-1}$ (C.V. di circa il 18%), in quella FIXIRR (Tabella 1).

Meno produttivi sono risultati i suoli ad EST nell'area esaminata, ma non nella parte estrema; con l'irrigazione di soccorso, queste differenze si sono quasi completamente annullate. Il suolo n. 52 ha, anche in questo caso, evidenziato i limiti produttivi per le ragioni viste prima (Figura 11). E' risultato inoltre evidente come la variabilità tra anni è stata maggiore nella tesi FIXIRR in quei suoli (52, 34 e 72) a bassa disponibilità idrica, nei quali l'irrigazione di soccorso ha incrementato le rese in tutti gli anni simulati.

Nella Figura 12 sono riportati gli incrementi percentuali della resa in granella tra le tesi FIXIRR e RAINFED. E' possibile in questo modo evidenziare quali sono le zone in cui l'irrigazione ha una produttività più elevata (aree meno produttive) e quindi dove l'intervento irriguo ha una maggiore efficacia per incrementare e stabilizzare le rese di granella. Queste informazioni possono essere di grande utilità per gli operatori agricoli per valutare la convenienza dell'intervento irriguo di soccorso al frumento, in funzione della localizzazione della propria azienda (condizioni pedo-climatiche).

Per il **pomodoro da industria**, la resa potenziale è stata in media di 11467 kg di sostanza secca delle bacche ha^{-1} . Questo valore corrisponde a circa 220 t ha^{-1} di prodotto fresco, maggiore delle rese medie ottenute nella zona ($80\text{-}120 \text{ t ha}^{-1}$ di prodotto fresco, con punte anche di 160 t ha^{-1}), ma giustificato dal fatto che il modello non tiene conto di limitazioni produttive legate ai patogeni, competizione di erbe infestanti e carenze di micronutrienti. Esistono, quindi, margini di incremento produttivo per questa coltura nell'areale di coltivazione Foggiano.

Passando ad esaminare gli scenari irrigui simulati su pomodoro, dalla Figura 13 emerge come il drenaggio stagionale sia, in media, di entità limitata (inferiore ai 40 mm annui, come media dei 52 anni di simulazione). Questo dipende dalle caratteristiche tessiture dei suoli (prevalentemente argillosi, limosi e franco-argillosi), dalla loro profondità (circa 150 cm) e dalle modeste precipitazioni registrate (550 mm come media annuale), che hanno, pertanto, limitato questo fenomeno. Gli scenari irrigui hanno, anche se in maniera molto limitata, influenzato questo parametro, con 4 profili di suolo che hanno superato i 4 mm annui di drenaggio nello scenario AUT25, 5 nello scenario AUT50 e 23 in quello AUT75. Dall'analisi spaziale non emerge un'area più vulnerabile rispetto ad un'altra, si possono individuare solo i suoli 24 e 52 come quelli che presentano, nei tre scenari, un drenaggio stagionale maggiore degli altri. Le loro caratteristiche idrologiche ($\text{CAW} < 90 \text{ mm m}^{-1}$ ed inferiore a

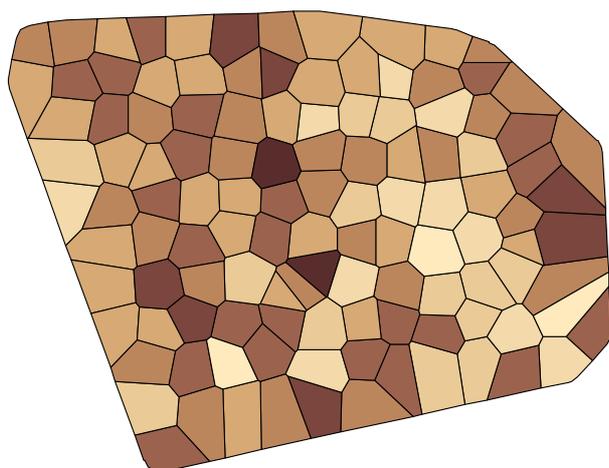
quella degli altri profili, range tra 120 e 200 mm m^{-1}), spiegano questo risultato, non consentendo un sufficiente immagazzinamento di acqua e impedendo alla coltura di sopportare periodi di stress idrico (Figura 7).

Dalla Figura 14 si ottiene un'interessante indicazione sul volume stagionale irriguo del pomodoro, che è oscillato tra 170 e 470 mm annui. Questi valori risultano sottostimati di circa il 20% rispetto a quanto gli agricoltori realmente utilizzano in zona: ciò si potrebbe spiegare con una tendenza alla sottostima dei fabbisogni irrigui da parte del modello, ma potrebbe anche evidenziare la tendenza degli agricoltori ad irrigare con volumi un pò al di sopra delle reali esigenze della coltura, con l'obiettivo di forzare le produzioni e di mantenere sempre il terreno umido per scongiurare momenti di difficoltà nell'erogazione dell'acqua. E' possibile che entrambe le spiegazioni siano attendibili. In ricerche condotte nello stesso ambiente Rana *et al.* (2000) e Rinaldi e Rana (2004) hanno misurato volumi stagionali irrigui al pomodoro dal 10 al 20% superiori ai reali consumi idrici della coltura (misurati con l'anemometro sonico); questa maggiore quantità di acqua erogata serve in parte a compensare le perdite, seppure minime, del metodo irriguo a "goccia" (5-10%) e in parte a tutelarsi da eventuali disfunzioni dell'impianto irriguo. Si può, pertanto, concludere che l'agricoltore fornisce l'acqua in maniera molto oculata (anche perché il costo unitario dell'acqua è funzione dei consumi) e che l'errore del modello è sicuramente accettabile. Tra gli scenari confrontati, emergono classi di volume irriguo stagionale simulato dal modello pari a $170\text{-}300 \text{ mm}$ nella tesi AUT25, $230\text{-}380 \text{ mm}$ in quella AUT50 e $350\text{-}470 \text{ mm}$ in quella AUT75. Non si evidenziano aree caratterizzate da volumi irrigui particolarmente bassi o elevati (Fig. 14).

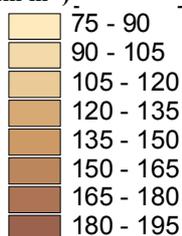
Dalla Figura 15 emerge come la resa in bacche aumenti significativamente passando dallo scenario AUT25 a quello AUT50 (+ 14%): infatti, mentre nel primo scenario le produzioni si mantengono, con poche eccezioni, tra i 6000 e i 9000 kg di s.s. ha^{-1} , nel secondo scenario il range di maggiore frequenza diventa quello tra i 9000 e i 10000 kg di s.s. ha^{-1} . Minore è risultato l'incremento produttivo se l'irrigazione avviene al 75% dell'acqua disponibile (turno irriguo più breve e maggiore volume stagionale) con range tra 9000 e 11000 kg di s.s. ha^{-1} nella maggiore parte dei suoli simulati (+ 17% rispetto allo scenario AUT25). Questo è un risultato importante ai fini della razionalizzazione della pratica irrigua e alla conservazione di questa importante e sempre più limitata risorsa naturale.

Lo scenario AUT25 ha evidenziato, inoltre, una maggiore variabilità, sia tra suoli che tra anni, rispetto agli altri due scenari irrigui (Tabella 1). Ciò conferma l'effetto dell'irrigazione non solo nell'elevare le produzioni, ma anche nello stabilizzarle, risultato questo più evidente in colture primaverili-estive come il pomodoro e meno nel caso del frumento duro che si avvantaggia della piovosità autunno-invernale. Infine, la variabilità produttiva del pomodoro nello spazio e nel tempo è risultata minima se si considerano gli altri due scenari irrigui (AUT50 e AUT75) (Tabella 1).

ACQUA DISPONIBILE



CAW
(mm m⁻¹)



NUMERAZIONE DEI SUOLI

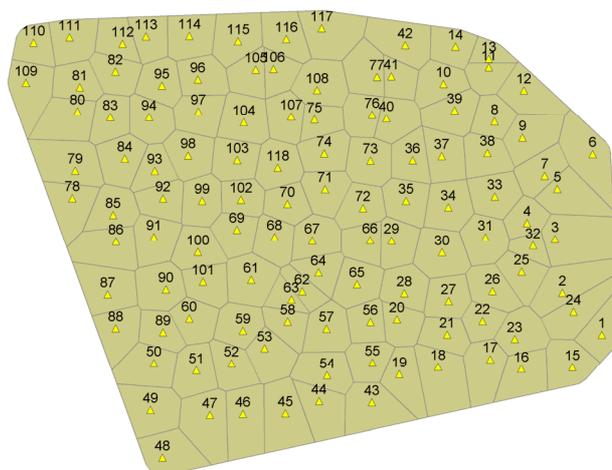


Fig. 7 – Mappa della quantità di acqua disponibile per la coltura (mm m⁻¹) e della numerazione dei suoli

Fig. 7 – Crop available water (mm m⁻¹) and soil numbering maps

Foggia 1952-2004

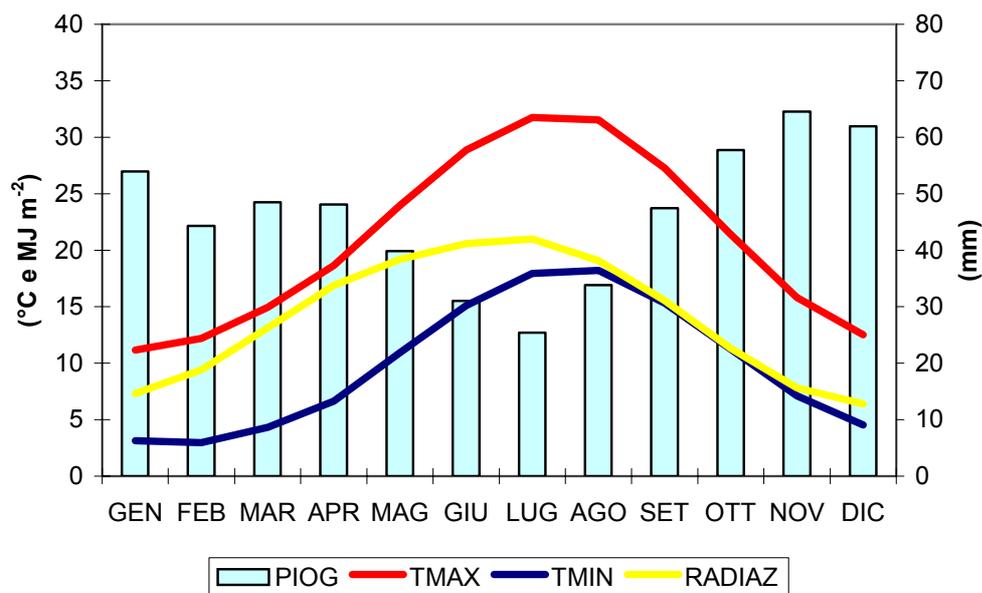


Fig. 8 – Medie mensili delle principali variabili meteorologiche registrate a Foggia nel periodo 1952-2004

Fig. 8 – Monthly averages of main weather variables recorded at Foggia in 1952-2004 long term period

UNICA IRRIGAZIONE

NESSUNA IRRIGAZIONE

FRUMENTO DURO
Residui vegetali
(g DM m⁻¹)

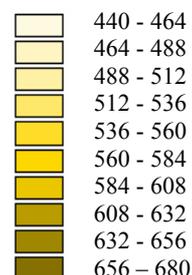
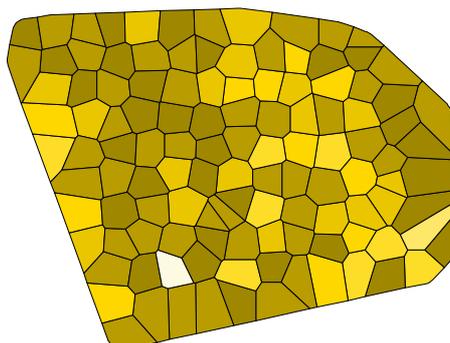
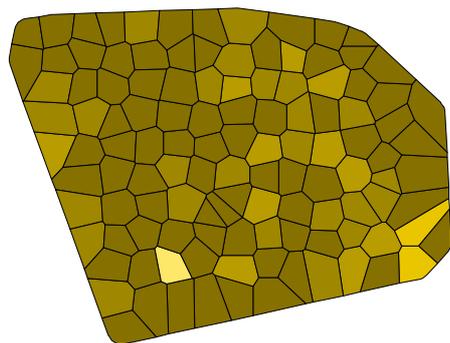


Fig. 9 – Visualizzazione della quantità di residui vegetali (stoppie e paglia, in kg ha⁻¹) di frumento duro nei due scenari irrigui a confronto
Fig. 9 – Visualization of the amount of crop residues (stubble and straw) of durum wheat in the two compared irrigation scenarios

UNICA IRRIGAZIONE

NESSUNA IRRIGAZIONE

FRUMENTO DURO – WUE
(kg DM ha⁻¹ mm⁻¹)

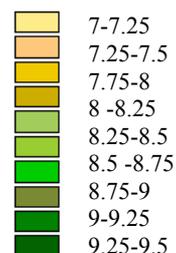
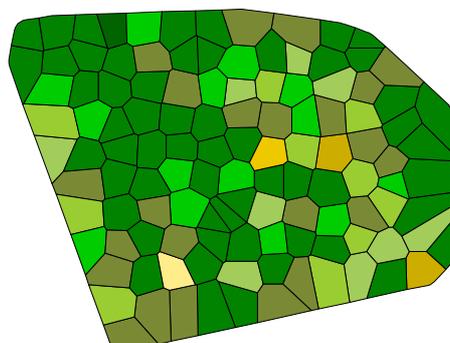
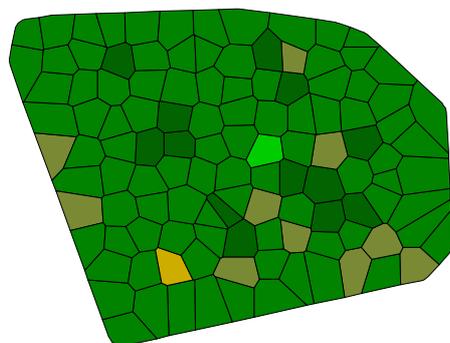


Fig. 10 – Visualizzazione dell'efficienza d'uso dell'acqua (WUE, kg di s.s. di granella/ETr) di frumento duro nei due scenari irrigui a confronto
Fig. 10 – Visualization of the water use efficiency (WUE, kg of DM of grain/ETr) of durum wheat in the two compared irrigation scenarios

UNICA IRRIGAZIONE

NESSUNA IRRIGAZIONE

FRUMENTO DURO
Resa in granella
(kg DM ha⁻¹)

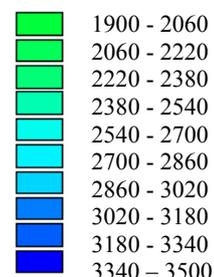
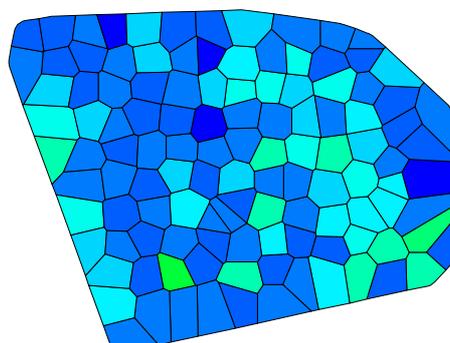
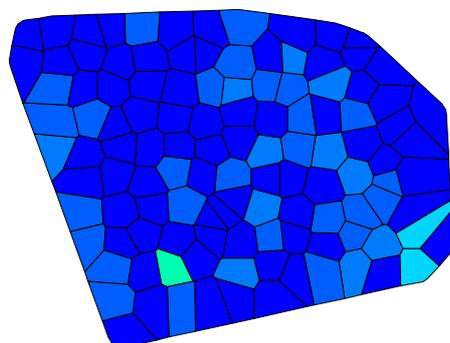
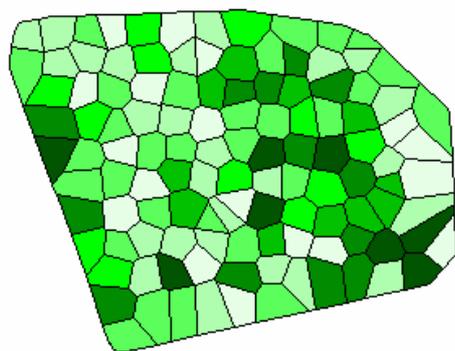


Fig. 11 – Visualizzazione della produzione di granella di frumento duro (kg ha⁻¹) nei due scenari irrigui a confronto
Fig. 11 – Visualization of grain yield at harvest (kg ha⁻¹) of durum wheat in the two compared irrigation scenarios

INCREMENTO DI PRODUZIONE



FRUMENTO DURO
Incremento di produzione (%)

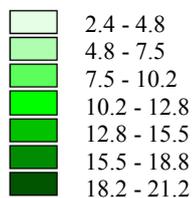
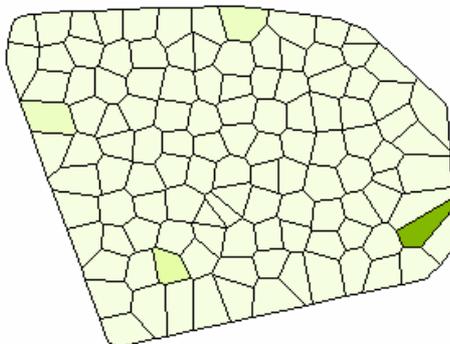


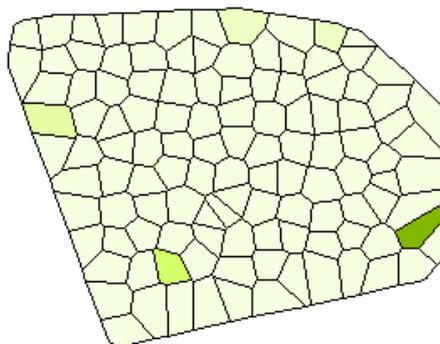
Fig. 12 – Visualizzazione dell'incremento (%) di produzione di granella di frumento duro nei due scenari irrigui a confronto

Fig. 12 – Visualization of durum wheat grain yield increment (%) in the two compared irrigation scenarios

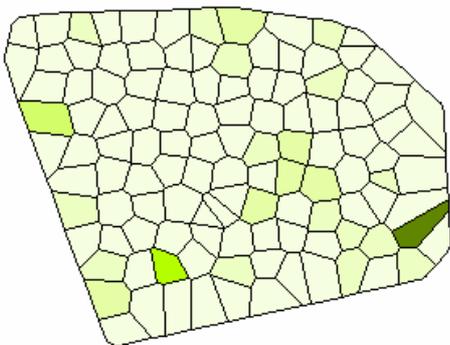
IRRIGAZIONE AUTOMATICA 25%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 50%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 75%



POMODORO
Drenaggio stagionale (mm)

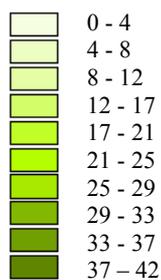
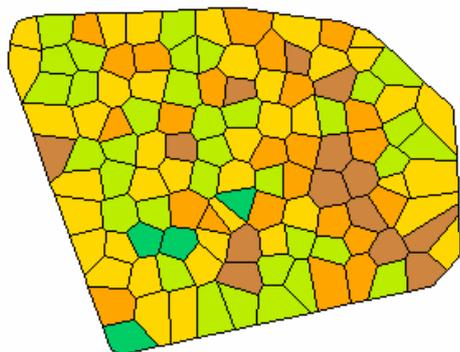


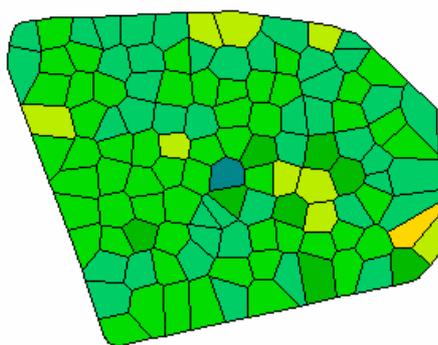
Fig. 13 – Visualizzazione del drenaggio stagionale (mm) nei tre scenari irrigui del pomodoro

Fig. 13 – Visualization of seasonal water drainage (mm) in the three irrigation scenarios in tomato

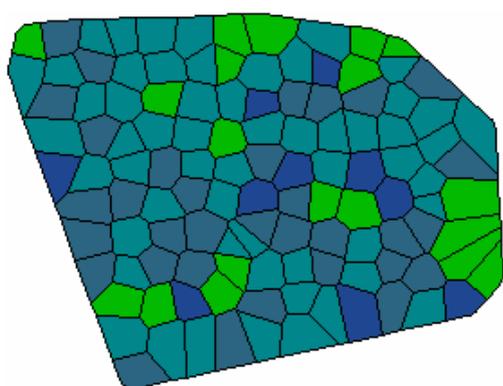
IRRIGAZIONE AUTOMATICA 25%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 50%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 75%



POMODORO
Volume stagionale irriguo (mm)

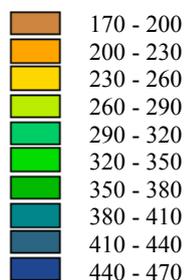
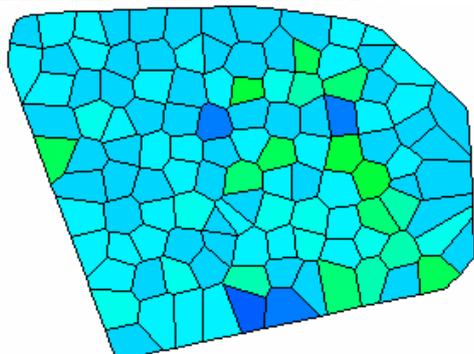
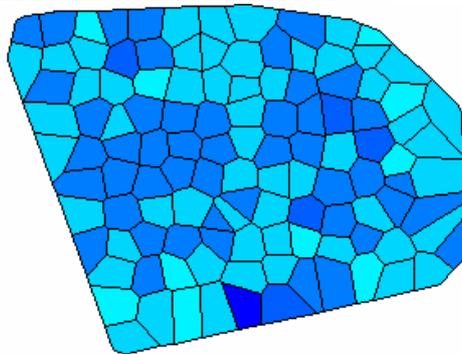


Fig. 14 - Visualizzazione del volume stagionale irriguo (mm) nei tre scenari irrigui del pomodoro
Fig. 14 - Visualization of seasonal irrigation (mm) in the three irrigation scenarios in tomato

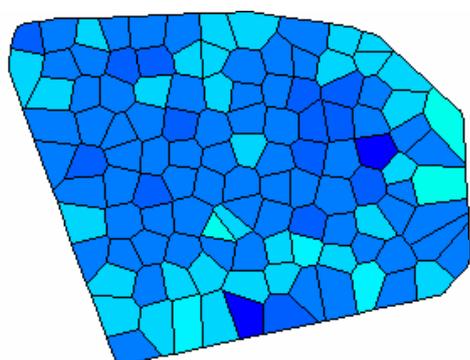
IRRIGAZIONE AUTOMATICA 25%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 50%



IRRIGAZIONE AUTOMATICA 75%



POMODORO
Produzione di bacche totali (kg DM ha⁻¹)

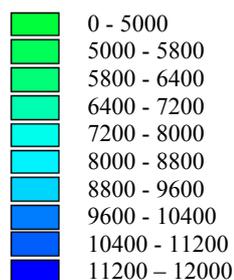


Fig. 15 - Visualizzazione della produzione di bacche totali (kg di sostanza secca ha⁻¹) nei tre scenari irrigui del pomodoro
Fig. 15 - Visualization of fruit yield at harvest (kg of DM ha⁻¹) in the three irrigation scenarios in tomato

Conclusioni

Abbiamo voluto, con questa nota, evidenziare le possibilità operative del modello DSSAT e dell'applicazione AEGIS/WIN, descrivendone le loro principali funzioni e caratteristiche.

E' stato, dunque, possibile effettuare un'analisi spaziale su un caso di studio condotto in Capitanata, con l'obiettivo di individuare sia aree più o meno vocate alla produzione di frumento duro o pomodoro da industria, che zone in cui la tecnica irrigua ha una maggiore efficacia.

E' emerso come il pomodoro irrigato al 75% della acqua disponibile produce incrementi di resa inferiori a quelli che si osservano irrigando al 50%, che si dimostra la più efficiente strategia di intervento. Questo, in un'ottica di Agricoltura di Precisione, può risultare molto utile nella gestione della pratica irrigua, andando ad individuare in quali suoli questi incrementi sono minori o maggiori ed operando, così, un risparmio idrico.

Il frumento duro, normalmente non irrigato, risente molto della quantità di acqua che il suolo riesce a trattenere: infatti, l'analisi spaziale ha individuato un'area meno produttiva per il cereale ma, intervenendo con l'irrigazione di soccorso, queste differenze si sono parzialmente attenuate. Pertanto, suoli profondi e con elevata capacità di trattenuta idrica riescono a fornire rese prossime a quella potenziale, mentre negli altri suoli, risulta importante intervenire con l'irrigazione per elevare e stabilizzare le rese.

L'accoppiata "modello di simulazione – interfaccia GIS" risulta, pertanto, utile per diversi scopi, quali la pianificazione aziendale di adeguate dimensioni, e per la pianificazione di distretti irrigui (colture e management irriguo). Ulteriori affinamenti, infine, potranno essere attuati quando per le simulazioni a scala più ampia, si potranno utilizzare anche informazioni da remote sensing.

Ringraziamenti

La presente ricerca è stata finanziata dal Ministero per le Politiche Agricole e Forestale Progetto: "Supporti decisionali per la conservazione e la gestione territoriale delle risorse idriche in aree vulnerabili del Sud d'Italia" AQUATER (D.M. n. 209/7303/05)", Coord. Dott. Michele Rinaldi, pub. n. 2.

Bibliografia

- Alexandrov, V., Hoogenboom, G., 1999. Evaluation of the CERES model for maize and winter wheat in Southeastern Europe. Proc. of 2nd International Symposium "Modelling Cropping Systems", University of Lleida, Catalonia, Spain, 131-132.
- Badini, O., Stöckle, C.O., Franz, E.H., 1997. Application of crop simulation modeling and GIS to agroclimatic assessment in Burkina Faso. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 64, 233-244.
- Basso, B., Ritchie, J.T., Pierce, F.J., Braga, R.P., Jones, J.W., 2000. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural System*, 68, 97-112.
- Batchelor, W.D., Basso, B., Paz, J.O., 2002. Examples of strategies to analyze spatial and temporal variability using crop models. *European J. Agronomy*, 18, 141-158.
- Castrignanò, A., Colucci, R., Ferri, D., La Cava, P., Martinelli, N., Steluti, M., 2001. Valutazione e descrizione della fertilità dei terreni meridionali mediante la geostatistica. *Bollettino Società Italiana della Scienza del Suolo*, 50, 81-102.
- Donatelli, M., Stöckle, C.O., Nelson, R.L., Francaviglia, R., 1999. Evaluating cropping systems in lowland areas of Italy using the

- cropping system simulation model CropSyst and the GIS software ArcView. *Proceedings of the 7th ICCTA Conference*, 16-17 November 1998, Firenze, Italy, 114-121.
- Engel, T., Hoogenboom, G., Jones, J.W. and Wilkens, P.W., 1997. AEGIS/WIN: A computer program for the application of crop simulation models across geographic area. *Agron. J.* 89, 919-928.
- Francaviglia, R., Donatelli, M., Stöckle, C.O., Marchetti, A., 2001. Applicazione del sistema ArcView/CropSyst nella valutazione della percolazione di acqua e della lisciviazione di nitrati. *Bollettino della Società Italiana della Scienza del Suolo*, 50, 157-164.
- Garrison, M.V., Batchelor, W.D., Kanwar, R.S., Ritchie, J.T., 1999. Evaluation of the CERES – Maize water and nitrogen balances under tile – drained conditions. *Agricultural Systems*, 62, 189-200.
- Hartkamp, A.D., de Beurs, K., Stein, A., White, J.W., 1999b. Interpolation techniques for climate variables. NRG-GIS Series 99-01. CIM-Myt, Mexico, DF.
- Hartkamp, A.D., White, J.W., Hoogenboom, G., 1999a. Interfacing geographic information systems with agronomic modelling. *A review. Agronomy J.*, 91, 761-772.
- Heinemann, A.B., G. Hoogenboom, G.A. Georgiev, R.T. de Faria and J.A. Frizzone. 2000. Center pivot irrigation management optimization of dry beans in humid areas. *Transactions of the ASAE*, 43(6), 1507-1516.
- Heinemann, A.B., Hoogenboom, G., de Faria, R.T., 2002. Determination of spatial water requirements at county and regional levels using crop models and GIS. An example for the State of Parana, Brazil. *Agricultural Water Management*, 52, 177-196.
- Hook, J.E., Harrison, K.A., Thomas, D.L., 1998. Analysis of water use by growers in southwest Georgia. Report to SW GA. Agribusiness Association and GA. NESPAL Report 98 – 01. Department of Natural Resources, University of Georgia NESPAL, Tifton, GA.
- Jagtap, S.S., Abamu, F.J., Kling, J.G., 1999. Long-term assessment of nitrogen and variety technologies on attainable maize yields in Nigeria using CERES – Maize. *Agricultural Systems*, 60, 77-86.
- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. The DSSAT cropping system model. *Eur. J. of Agronomy*, 18, 235-265.
- Macrobert, J.F., Savage, M.J., 1998. The use of crop simulation model for planning wheat irrigation in Zimbabwe. In: Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds.), *Understanding Options for Agricultural Production*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 41-54.
- Mathews, R., 2002. *Crop-soil simulation models: Applications in developing countries*. CABI Publishing, Wallingford. Mathews, R. and Stephens, W, editors, 280 pp.
- National Research Council, 1997. *Precision Agriculture in the 21st Century, Geospatial and Information technologies in Crop Management*. National Research Academy Press, 16-19.
- Nijbroek, R., Hoogenboom, G., Jones, J.W., 2003. Optimizing irrigation management for a spatially variable soybean field. *Agricultural Systems*, 76, 359-377.
- Pierce, F.S., Nowak, P., 1990. Aspects of precision agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1-86.
- Rana, G., Rinaldi, M., Introna, M., Ciciretti, L., 2000. Determinazione sperimentale dei consumi idrici del pomodoro da industria in Capitanata. *Atti Convegno POM B19*, Ed. Gutenberg, Salerno, 6 novembre, 99-106.
- Rinaldi, M., 2001. Durum wheat simulation in Southern Italy using CERES-Wheat model. I. Calibration and validation. Proc. of 2nd International Symposium "Modelling Cropping Systems", Florence (Italy), 16-18 July, 81-82.
- Rinaldi, M., 2004. Water availability at sowing and nitrogen management of durum wheat: a seasonal analysis with CERES-Wheat model. *Field Crops Research*, 89, 27-37.
- Rinaldi, M., Gagliano, C., 2005. Previsione del rischio di lisciviazione azotata per la coltura del pomodoro da industria. *Rivista Italiana di Agrometeorologia, Quaderno degli extended abstract del Convegno AIAM, Vasto (CH)*, 3-5 maggio, 122-123.
- Rinaldi, M., Ventrelli, D., Gagliano, C., 2006. Comparison of nitrogen and irrigation strategies in tomato using long term weather analysis of CROPGRO model. *Agricultural Water Management* (in press).
- Rinaldi, M., Rana, G., 2004. I fabbisogni idrici del pomodoro da industria in Capitanata. *Riv. Italiana di Agrometeorologia* 1, 31-35.
- Robert, P.C., 2002. Precision Agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, 247, 1, 143-149.
- Rosenzweig, C. and Parry, M.L., 1994. Potential impact of climate change on world food supply, *Nature*, 367, 133-138.

Satya Priya, Shibasaki, R., 2001. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling* 136 (2/3), 113-129.

Stöckle, C.O. 1996. GIS and simulation technologies for assessing cropping systems management in dry environments. *American Journal of Alternative Agriculture*, 11, 115-120.

Tan GuoXin, Shibasaki, R., 2003. Global estimation of crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modelling*, 168 (3), 357-370.

Uehara, G. and Tsuji, G., 1993. The IBSNAT project. In: F.W.T. Penning de Vries et al. (eds.), *Systems Approaches for Agricultural Development*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 505-513.