

POLITECNICO DI MILANO
Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture
viarie, e Rilevamento



**MODELLISTICA DISTRIBUITA DI
BILANCIO IDROLOGICO PER LA
GESTIONE DELL'IRRIGAZIONE: IL CASO
DI STUDIO DEL "CONSORZIO DI
BONIFICA MUZZA BASSA LODIGIANA"**

Relatore: Prof. Marco Mancini
Correlatori: Dott. Alessandro Ceppi
Ing. Giovanni Ravazzani

Tesi di laurea di:
Francesca Pala Matr. 731345

Anno accademico 2010/2011

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Professor Marco Mancini per avermi dato la possibilità di trattare e approfondire un lavoro di tesi così interessante e stimolante.

Ringrazio Alessandro per la disponibilità che mi ha dimostrato durante lo svolgimento di questo lavoro.

Un ringraziamento particolare ad Arpa Lombardia per la cortesia nel fornire i dati meteorologici e al Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana per i dati necessari allo sviluppo del lavoro di tesi.

Sintesi

Negli ultimi anni le situazioni di crisi idrica sempre più frequenti hanno evidenziato la necessità di utilizzare l'acqua in modo sempre più oculato. Questo problema si riflette nel cercare una migliore e più adeguata gestione e pianificazione dell'irrigazione da parte dei Consorzi.

Infatti, in questo settore si sono sviluppati negli ultimi anni sistemi basati su algoritmi in grado di ottimizzare le decisioni, con l'obiettivo di migliorare l'efficienza nell'uso delle risorse idriche limitate.

Il presente lavoro di tesi fa parte del progetto, finanziato dalla Regione Lombardia, “Previsione meteo idrologica per la Gestione Irrigua” (“PRE.G.I.”), che propone la realizzazione di un prodotto di previsione dei contenuti idrici dei suoli e dei fabbisogni irrigui utili alla regolazione parsimoniosa dell'acqua per l'irrigazione, unendo la previsione meteorologica di lungo periodo alla simulazione del bilancio idrico del suolo.

Lo strumento PREGI è applicato ai territori della Provincia di Lodi serviti dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (MBL) ed è sviluppato da Centro Epson Meteo – Meteo Operations Italia s.r.l., MMI s.r.l., il D.I.I.A.R. del Politecnico di Milano e dal Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (MBL).

Prendendo spunto dalle recenti pubblicazioni di letteratura, nel Capitolo 1 viene fornito prima un inquadramento generale sulla necessità di migliorare sempre di più la gestione irrigua e, successivamente, gli obiettivi che la tesi propone.

Segue poi una descrizione dell'area di studio con particolare attenzione alle caratteristiche idrologiche del bacino irriguo in esame (Capitolo 2).

Nel terzo e nel quarto capitolo viene presentata rispettivamente una descrizione del sistema irriguo del Consorzio MBL nel suo stato attuale e nella sua modellazione.

Nel Capitolo 5 sono stati discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il modello idrologico FEST-EWB per il periodo compreso tra il 2003 e il 2010.

Infine nel Capitolo 6 sono state presentate le conclusioni ottenute a seguito delle analisi svolte e i possibili sviluppi futuri in questo settore.

Indice dei contenuti

MODELLISTICA DISTRIBUITA DI BILANCIO IDROLOGICO PER LA GESTIONE DELL'IRRIGAZIONE: IL CASO DI STUDIO DEL "CONSORZIO DI BONIFICA MUZZA BASSA LODIGIANA"	I
RINGRAZIAMENTI.....	I
SINTESI.....	III
INDICE DEI CONTENUTI.....	V
INDICE DELLE FIGURE	VIII
INDICE DELLE TABELLE.....	XIII
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE	1
1.1 STATO DELL'ARTE.....	2
1.2 IL PROGETTO PREGI.....	6
1.3 OBIETTIVI DELLA TESI	8
CAPITOLO 2 AREA DI STUDIO	11
2.1 CARATTERIZZAZIONE GEOGRAFICA E MORFOLOGICA	13
2.2 CARATTERIZZAZIONE IDROGRAFICA	15
2.3 CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA	17
CAPITOLO 3 DESCRIZIONE DEL SISTEMA “IRRIGUO” NELLO STATO ATTUALE	20
3.1 TOPOGRAFIA, USO DEL SUOLO E LITOLOGIA	20
3.2 IL RETICOLO IRRIGUO E LE TECNICHE DI DISTRIBUZIONE.....	36
3.3 DATI METEO – IDROLOGICI OSSERVATI	54

3.3.1 <i>La stazione di Livraga (LO)</i>	55
3.4 DATI METEO PREVISTI.....	59
CAPITOLO 4 LA MODELLAZIONE DEL SISTEMA “IRRIGUO”	61
4.1 SCHEMATIZZAZIONE DEL SISTEMA DI “COMIZI”	61
4.2 LA DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI IRRIGAZIONE.....	65
4.3 SOGLIE DI RIFERIMENTO: θ_{RESIDUO} E $\theta_{\text{SATURAZIONE}}$	69
4.4 LE GRANDEZZE DI MONITORAGGIO: VOLUMI IRRIGUI E TEMPI DI AUTONOMIA	71
CAPITOLO 5 RISULTATI E DISCUSSIONI	75
5.1 CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO PER LA CELLA DI LIVRAGA	76
5.2 L’IRRIGAZIONE SUL CAMPO CASCINA NUOVA A LIVRAGA (LO)	80
5.2.1 <i>Stress idrico e soil moisture</i>	82
5.3 SIMULAZIONI 2003-2010 IN CONDIZIONI DI IRRIGAZIONE SECONDO CONCESSIONE	84
5.3.1 <i>Mappe di soil moisture relative al Consorzio MBL</i>	86
5.3.2 <i>Mappe di soil moisture relative al campo Cascina Nuova di Livaga</i>	88
5.4 SIMULAZIONI IN CONDIZIONI DI “CONTABILITA’ IDRICA”	90
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	95
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	99
APPENDICE A SOFTWARE UTILIZZATI	103
APPENDICE B MODELLO METEOROLOGICO	105
APPENDICE C MODELLO IDROLOGICO	111
C.1 BLOCCO DATI.....	116
C.1.1 <i>Dati meteo</i>	116
C.1.2 <i>Dati suolo e vegetazione</i>	117
C.2 BLOCCO NEVE.....	117
C.2.1 <i>Modello di accumulo utilizzato</i>	118

C.2.2 <i>Modello di fusione</i>	120
C.3 BLOCCO INFILTRAZIONE	121
C.4 BLOCCO DEL BILANCIO IDROLOGICO	122
C.5 BLOCCO DI PROPAGAZIONE DEL DEFLUSSO SUPERFICIALE.....	123
C.6 BLOCCO DI PROPAGAZIONE DEL DEFLUSSO IPODERMICO.....	124
C.7 MODELLAZIONE DEGLI ACQUIFERI	124
C.7.1 <i>Interazione falda fiume</i>	126
APPENDICE D IL MODELLO IDRAULICO.....	128

Indice delle figure

Figura 2.1 Modello digitale delle quote per la Regione Lombardia con risoluzione spaziale pari a 40 m. I confini in rosso evidenziano il Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana (MBL). La legenda in alto a destra esprime le quote altimetriche in metri sul livello del mare.	12
Figura 2.2 Territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, (fonte MBL).	14
Figura 2.3: Schema generale della distribuzione irrigua consortile, (fonte MBL).	16
Figura 2.4 Altezze di pioggia a Lodi nel periodo 15 maggio - 31 agosto e correlazione di tendenza, dal 1961 al 2003; fonte MBL	18
Figura 3.1 Modello digitale delle quote per il Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana (MBL) con risoluzione spaziale pari a 40 m. La legenda in alto a destra esprime le quote altimetriche in metri sul livello del mare.	22
Figura 3.2 Carta Tecnica Regionale relativa al territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana	23
Figura 3.3 Mappa delle pendenze espresse in gradi (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	24
Figura 3.4 Mappa dell'esposizione dei versanti (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	25
Figura 3.5 Mappa della permeabilità del suolo in condizione di saturazione (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)	26
Figura 3.6 Mappa del contenuto d'acqua del suolo in condizione residue (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)	27

Figura 3.7 Mappa del contenuto d’acqua del suolo in condizione di saturazione (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)	27
Figura 3.8 Mappa della capacità di campo del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	28
Figura 3.9 Mappa dell’indice di distribuzione delle dimensioni dei pori di Brooks & Corey (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	29
Figura 3.10 Mappa del punto di appassimento del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	30
Figura 3.11 Mappa del punto di bubbling pressure (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	31
Figura 3.12 Mappa delle classi idrologiche del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	32
Figura 3.13 Mappa del Curve Number (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)	34
Figura 3.14 Mappa della profondità del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).	35
Figura 3.15 Mappa dei bacini o utenze primarie (a sinistra) e mappa dei bacini o utenze secondarie (a destra), (fonte MBL).	37
Figura 3.16 In rosso è riportata la rete irrigua all’interno del consorzio Muzza; in blu sono raffigurati i fiumi principali.	45
Figura 3.17 Comprensorio irriguo del Canale Muzza con le relative derivazioni	46
Figura 3.18 Provenienza delle acque irrigue: acque dirette, di recupero e modalità di derivazione primaria, (fonte MBL).	49
Figura 3.19 Irrigazione a scorrimento con sollevamento meccanico secondario di un campo di grano turco e di un prato stabile, (fonte MBL)	50
Figura 3.21 Ruota irrigua all’interno del bacino “Porra Nuova”. Si noti la durata della ruota di 14 giorni, la suddivisione all’interno dei singoli campi (poderi), (fonte MBL)	53

Figura 3.22 Stazioni pluviometriche e termometriche (fonte ARPA Lombardia).	55
Figura 3.20 Posizione della stazione micro-meteorologica eddy-covariance di Livraga (LO) le cui coordinate geografiche sono: latitudine 45.11 Nord, longitudine 9.34 Est, altitudine 60 m s.l.m. La dimensione del campo è di circa 500 m x 300 m.	56
Figura 3.23 Sonde Cambell per la misura dell'umidità del suolo	57
Figura 3.24 Confronto tra gli andamenti del valore di soil moisture rilevato dalle sonde Campbell a 10, 35, 60 cm di profondità, con l'andamento del valore di soggiacenza della falda misurata tramite freatometro e con la profondità delle radici di mais	58
Figura 4.1 Bacini irrigui suddivisi in comizi.	66
Figura 4.2. Disposizione dei punti all'interno dei bacini irrigui (sinistra) e successiva suddivisione in comizi con poligoni di Thiessen (destra).	67
Figura 4.3 Turnazione irrigua del bacino irriguo “Coppa Incassata” situato nella parte settentrionale del comprensorio irriguo, gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana	69
Figura 4.4 Esempi di valori del contenuto d'acqua in base alle precipitazioni (previste e/o osservate) e dei turni irrigui	70
Figura 4.5 Diagrammazione delle portate massime prelevabili nei diversi periodi dell'anno dal fiume Adda tramite il Canale Muzza	72
Figura 4.6 Valori teorici (in blu) e valori reali (in rosso) come media giornaliera nel decennio 2001-2010 delle portate di concessione del Canale Muzza.	73
Figura 5.1 Posizionamento delle sonde di umidità alle varie profondità del suolo	77
Figura 5.2 Andamento dei valori osservati di umidità del suolo alle profondità 10, 35 e 60 cm e relativa media pesata	77

Figura 5.3 Confronto tra il valore di soil moisture simulato e la media mesata dei valori di soil moisture osservati per il periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010	80
Figura 5.4 Confronto tra gli andamenti di soil moisture simulato e media pesata dei valori osservati e altezza d'acqua dovuta all'irrigazione e alle precipitazioni realmente cadute a Livraga nel periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010.	81
Figura 5.5 Confronto tra gli andamenti di soil moisture simulati per la cella Livraga con e senza irrigazione e il valore di umidità critica stimato per la pianta di mais	83
Figura 5.6 Andamento del valore di soil moisture e della soggiacenza della falda per il bacino irriguo del Consorzio MBL	85
Figura 5.7 Mappe di umidità del suolo in diversi giorni del mese di luglio per il periodo 2003-2010	85
Figura 5.8 Mappa di turnazione irrigua relativa al 14 giugno 2010 per la parte settentrionale del territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana. In blu scuro è cerchiata la zona presa in considerazione	87
Figura 5.9 Mappe di soil moisture relative al 14 giugno 2010 (sopra) e al 15 giugno 2010 (sotto). In blu è cerchiata la zona del bacino irriguo del Canale Muzza analizzata.	87
Figura 5.10 Mappa dei bacini irrigui del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana. In rosso è evidenziato il campo Cascina Nuova nel comune di Livraga (LO).	89
Figura 5.11 Mappa del soil moisture relativa al 14 giugno 2010 (a sinistra) e al 15 giugno 2010 (a destra). In rosso è cerchiata la cella corrispondente al campo Cascina Nuova, situata a Livraga (LO)	90
Figura 5.12 Andamento della soggiacenza della falda simulato attraverso il modello idrologico FEST-EWB con irrigazione al 100%, 90%, 80%, 70%, 60% per il periodo 2003-2010.	91

Figura 5.13 Mappe di umidità del suolo relative al 23-07-2010 con un valore di irrigazione pari al 100%, 90%, 80%, 70% e 60% del valore teorico

92

Indice delle tabelle

Tabella 3.1 Dati	21
Tabella 3.2 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Handbook of Hydrology, 2001)	26
Tabella 3.3 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti.	31
Tabella 3.4 Valori del CN_{II} per diverse tipologie ed uso del suolo (Soil Conservation Service); i valori riportati nella colonna della classificazione DUSAf si riferiscono ai tipi di suolo presenti all'interno del Consorzio Muzza, (Regione Lombardia, 2004).	32
Tabella 3.5 Elenco dei derivatori del primo e del secondo ordine del Canale Muzza con le relative portate Q [l/s].	37
Tabella 3.6 Turnazione irrigua nel campo di “Cascina Nuova” nel Comune di Livraga	53
Tabella 3.7. Stazione pluviometriche e termometriche	54
Tabella 3.8 Coefficienti utilizzati per la conversione delle misure di umidità, osservate tramite le sonde Campbell	57
Tabella 4.1 Ricostruzione della ruota irrigua per ogni bacino appartenente al Consorzio della Muzza Bassa Lodigiana.	62
Tabella 5.1 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Handbook of Hydrology, 2001)	78

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

L’irrigazione in Italia nel corso dei secoli ha assunto (e assume ancora oggi) una rilevanza importante e fondamentale nell’assetto dell’agricoltura.

Per il comprensorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, l’irrigazione rimane a spicca connotazione rurale. Su gran parte del reticolo irriguo, costruito e mantenuto da tempo immemorabile per la pratica agraria, si è costituito, oltre ad un recente sistema produttivo artificiale extra agricolo, un antico e consolidato connubio naturale acqua-suolo che è elemento fondamentale per il mantenimento del delicato equilibrio ecologico territoriale.

Contrariamente ad altri bacini, posti a Sud del Po, i sistemi irrigui di distribuzione utilizzano prevalentemente canalizzazioni di tipo naturale e adacquamenti per scorrimento, pur risultando inefficienti sotto l’aspetto idraulico e agrario. Essi sono origine e garanzia di conservazione dell’attuale assetto territoriale che si mantiene, grazie a questa irrigazione, entro ambiti ancora accettabili.

Inoltre in periodi sempre più frequenti di siccità e quindi di conseguente scarsità idrica, si è manifestata la necessità di ottimizzare la pianificazione dell’irrigazione. In questo contesto si inserisce il lavoro di tesi proposto, che ha lo scopo di valutare, tramite un modello idrologico (FEST-EWB), lo stato di salute, in termini di contenuto di umidità dei terreni appartenenti ai consorziati. Infatti spesso il Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana si trova costretto a dover attuare una politica di risparmio della risorsa idrica, attivando la modalità di derivazione in

contabilità idrica. Per questo la scelta di integrare al modello idrologico l'uso di previsioni meteorologiche a lungo termine può risultare un ottimo strumento per migliorare la gestione dell'attività irrigua nel Consorzio.

1.1 STATO DELL'ARTE

La carenza d'acqua ha da sempre rappresentato uno dei fattori di maggior criticità per la sopravvivenza e il sostentamento delle popolazioni di tutto il mondo. Non per nulla le Nazioni Unite hanno proclamato il 2003 come Anno Internazionale dell'Acqua e il 2006 come Anno Internazionale dei Deserti e della Desertificazione, evidenziando la necessità di intervenire nella prevenzione e nella mitigazione degli eventi legati alla scarsità idrica.

In ambito Comunitario e Nazionale sono state intraprese azioni, sia sul piano normativo che conoscitivo, per affrontare il problema della scarsità d'acqua (direttiva 2000/60, il D. Lgs. 152/99 e la sua riedizione 152/06). Per quanto riguarda la Regione Lombarda, è stato definitivamente approvato il Piano di Tutela ed Uso delle Acque della con Delibera di Giunta n. 2244 del 29 marzo 2006.

Infatti, la gravità di situazioni di crisi idrica che si sono manifestate in modo sempre più evidente negli ultimi anni anche in regioni tradizionalmente ricche d'acqua come la Regione Lombardia, ha fatto sì che l'Autorità di Bacino del fiume Po promuovesse un protocollo d'intesa per le emergenze idriche nel bacino idrografico del fiume Po, coordinandosi in modo sinergico con l'Associazione Nazionale Bonifica ed Irrigazione (ANBI), l'Agenzia Interregionale Po (AIPO), le regioni e i gestori idroelettrici. A livello regionale si ricorda, inoltre, la L.R. 7/2003 in materia di bonifica e irrigazione.

Sempre in Lombardia, le principali fonti della risorsa idrica in Lombardia sono i grandi laghi, i nevai, i serbatoi idroelettrici nella fascia montana, l'importante falda freatica e i suoi affioramenti tramite i fontanili nella parte più meridionale della pianura. L'utilizzo irriguo, quello idroelettrico e termoelettrico, la richiesta d'attenzione ai minimi deflussi vitali nei corsi d'acqua e un'utenza irrigua in

evoluzione, esasperano il conflitto tra le svariate utenze, evidenziando periodi d'emergenza idrica in condizioni di scarsa piovosità. Tali situazioni sono soggette ad acuirsi anche in funzione degli ultimi trend e scenari climatici previsti. Recenti studi mostrano che dal punto di vista statistico non ci sia ancora una significativa diminuzione assoluta dei quantitativi di precipitazione, anche se per quanto riguarda l'Italia si è osservata una diminuzione complessiva dei quantitativi di pioggia negli ultimi 20 anni (Salerno et al., 2007). Appare invece evidente una nuova e più frequente distribuzione degli eventi estremi (Maugeri, 2006), legata a una modifica della circolazione atmosferica (Salerno et al. 2007); basti citare, ad esempio, i più recenti casi di siccità del 2003, 2005 e 2006 in Lombardia. Proprio il 2003 ha rappresentato un anno eccezionale per tutti i parametri climatici con poca pioggia e altissime temperature per periodi prolungati in tutto il bacino padano; è stato forse l'evento più recente, in cui la percezione sociale di mancanza di risorsa è stata molto forte (Craveri, 2006). Interessante per l'ambiente lombardo è quanto emerso nel quarto e ultimo rapporto dell'IPCC, in cui si legge che "...l'aumento di periodi secchi, collegati alle alte temperature e alla diminuzione delle precipitazioni, ha contribuito ai cambiamenti nelle siccità. Secondo le proiezioni, nel corso del secolo le riserve di acqua conservate nei ghiacciai e nelle coperture nevose diminuiranno, riducendo la quantità di acqua disponibile nelle regioni (come il Nord Italia - nda) che usufruiscono delle acque di fusione provenienti dalle maggiori catene montuose.". (IPCC, 4AR - II WG, 2007).

In ambito internazionale la letteratura ci fornisce alcuni studi atti a ottimizzare la gestione dell'irrigazione integrando ai modelli idrologici le previsioni del tempo.

Il modello EPIC-PHASE, sviluppato al centro di Tolosa Auzeville INRA, ad esempio è in grado di simulare l'evoluzione del contenuto idrico del suolo, associandola a previsioni meteo in tempo reale ogni 5 giorni.

Inoltre il modello può essere usato come strumento di gestione irrigua non solo per risparmiare l'acqua ma anche per evitare di avere un eccessivo apporto idrico che potrebbe portare alla marcitura della coltura, (Cabelguenne et al., 1997).

Nel Regno Unito i periodi sempre più frequenti di siccità hanno evidenziato la necessità di utilizzare l'acqua in modo sempre più oculato attraverso una

pianificazione adeguata dell'irrigazione. L' approccio proposto è stato quello di pianificare in tempo reale l'irrigazione, attraverso l'uso delle previsioni del tempo a breve termine e di un algoritmo in grado di ottimizzare le decisioni.

Il vantaggio del modello non si avrebbe solo nei periodi di scarsità idrica, in cui si avrebbe una migliore efficienza nell'uso delle risorse idriche limitate, ma anche in periodi piovosi in quanto si avrebbero risparmi sui costi evitando inutili irrigazioni, (Gowing e Ejieji, 2001).

In Cina è stata proposta una gestione dell'irrigazione con previsioni in tempo reale dell'evapotraspirazione (ETo) quotidiano. Adottando l'equazione FAO Penman – Monteith (FAO – PM) per la stima dell'ETo, il modello cerca di prevedere l'evapotraspirazione giornaliera con le previsioni del tempo a disposizione. I risultati di questo studio hanno evidenziato come l'ETo stimata attraverso le previsioni meteo sia adatta ad essere utilizzata in tempo reale nella distribuzione delle risorse idriche e nella gestione dell'irrigazione, (Cai et al., 2007).

Anche negli Stati Uniti d'America in particolare nello stato dell'Oklahoma sono stati determinati dei programmi di irrigazione per il grano, associando le previsioni delle precipitazioni a una procedura di analisi dei costi e delle perdite e a un modello di simulazione di crescita delle colture, (Rogers e Elliott, 1989).

Sempre negli Stati Uniti, in un programma sponsorizzato dalla NASA, chiamato "Use of Earth and Space Science Data Over the Internet," gli scienziati dell'University of Wisconsin-Madison hanno sviluppato un sistema per l'agricoltura che si basa su osservazioni satellitari convenzionali, su modelli di previsione del clima e sul "soil-canopy environment". Il sistema proposto comprende un programma di irrigazione che si basa su stime satellitari quotidiane dell'energia solare, un prodotto di protezione antigelo che si basa su modelli di previsione e stime satellitari delle nuvole, e un prodotto per la previsione dello stato di salute della pianta che si basa sulla radiazione netta stimata da satellite, sulle precipitazioni misurate dalla rete radar NEXRAD, e da un modello dettagliato di "soil-canopy environment". Tale programma di evapotraspirazione/irrigazione utilizza una valutazione via satellite della radiazione netta durante il giorno, più strettamente collegata alla radiazione solare giornaliera, (Diak et al., 1998).

Tornando all'ambito europeo, un supporto online per le decisioni è disponibile in Danimarca dal 1996. Il sistema ha un modello morfologico che stima lo sviluppo della coltura che si basa su somme di dati di temperatura e un modello idrologico per il calcolo del bilancio idrico del terreno associati a dati meteorologici forniti automaticamente dalla base di dati meteo, (Thysen e Detlefsen, 2006).

Sempre in Danimarca è stato sviluppato il sistema di allarme “eWarning” implementato da PlanteInfo (www.planteinfo.dk), in cui è possibile ottenere informazioni locali sull’irrigazione via SMS. Gli agricoltori danesi possono ricevere tramite messaggio o tramite posta elettronica informazioni su previsioni locali per le successive ore di temperatura, precipitazioni, umidità relativa, velocità direzione del vento, osservazioni meteorologiche giornaliere per gli ultimi 5 giorni e previsioni di precipitazione e umidità relativa per i successivi 4 giorni, indici di rischio quotidiano di peronospora della patata stimato attraverso osservazioni e previsioni meteorologiche, registrazioni sul campo di malattie importanti e parassiti nel frumento invernale. (Jensen e Thysen, 2003)

Tornando all’ambito nazionale e più specificatamente al campo regionale, la ricorrenza di periodi di emergenza idrica in Lombardia, in cui si acuiscono i conflitti sull’uso dell’acqua, ha determinato finora progressi nella gestione e nel coordinamento delle fonti tradizionali (laghi, bacini idroelettrici, fiumi) unitamente alla sperimentazione di fonti alternative come il prelievo dai numerosi laghi di cava (Mancini, 2007). Tale attività si riflette anche sulla gestione della distribuzione irrigua, la cui modalità di erogazione idrica è operata dai Consorzi Irrigui in base al periodo della stagione, alla richiesta colturale e allo stato di acqua invasata nei laghi e nel manto nevoso.

In caso di carenze di risorsa idrica i consorzi irrigui possono chiedere di attivare la modalità di “derivazione in contabilità idrica”. Tale modalità permette di tenere in conto dell’acqua effettivamente usata da ciascun consorzio e quindi della portata erogata dal lago di Como. La richiesta di questa particolare modalità distributiva è dettata dalle esigenze idriche differenziate di ciascun utente, dalla tipologia di coltura, dallo stato di sviluppo di questa, dalle caratteristiche della rete di distribuzione e dalla propensione al rischio di ciascun consorzio. Per un consorzio

perseguire una politica prudenziale di distribuzione dell'acqua significa distribuire ai suoi consorziati una percentuale ridotta dell'acqua concessa, riservandosi di usare tale frazione non utilizzata nel periodo successivo che si presuppone più siccioso, garantendo la salvaguardia della produzione agricola. A parità di volume disponibile, infatti, una distribuzione frazionata rispetto a una concentrata nel tempo, permette alla coltura di non rimanere in condizioni di stress per tempi troppo lunghi, penalizzandone o compromettendone la produttività. La possibilità quindi di regolare la percentuale di acqua a fronte di un prelievo, seppur inferiore, nei periodi maggiormente sicciosi della stagione irrigua, è spesso utilizzata dai consorzi al fine di massimizzare la produzione agricola. Queste politiche di gestione sono attualmente basate sulla sensibilità dei gestori, frutto della loro esperienza pregressa. Infatti, una politica di risparmio nel turno irriguo, potrebbe rivelarsi utile se i comprensori fossero successivamente interessati da precipitazioni significative, come estremamente dannosa potrebbe risultare una politica di non risparmio se nel periodo seguente non si verificassero piogge significative.

Risulta chiaro come la complessità delle questioni legate alla risorsa idrica, debba essere studiata con metodo scientifico-ingegneristico al fine di poter prevedere con sufficiente anticipo l'insorgere di eventi sicciosi potenzialmente dannosi e poter mettere in atto i provvedimenti necessari alla riduzione del danno stesso.

In tal senso, una metodologia adottabile, è parte di quella utilizzata per la previsione in tempo reale delle piene lungo i corsi d'acqua (Ceppi et al., 2010, Rabuffetti et al., 2008; Ravazzani et al., 2007; Montaldo et al., 2002). Essa consiste nell'integrare in un unico sistema un modello di previsione meteorologica con un modello idrologico, permettendo quindi di valutare l'effetto che le condizioni meteorologiche previste possono avere sul reticolo idrografico.

1.2 IL PROGETTO PREGI

Il presente lavoro di tesi ha visto l'autore coinvolto nel progetto, finanziato dalla Regione Lombardia, “Previsione meteo idrologica per la Gestione Irrigua”

(“PRE.G.I.”), che propone la realizzazione di un prodotto di previsione dei contenuti idrici dei suoli e dei fabbisogni irrigui utili alla regolazione parsimoniosa dell’acqua per l’irrigazione, unendo la previsione meteorologica di lungo periodo alla simulazione del bilancio idrico del suolo.

Lo strumento PREGI è applicato ai territori della Provincia di Lodi serviti dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana ed è sviluppato da Centro Epson Meteo – Meteo Operations Italia s.r.l., MMI s.r.l., il D.I.I.A.R. del Politecnico di Milano, il Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (MBL).

Il prodotto proposto unendo previsioni meteorologiche di lungo periodo (30 giorni) a simulazioni del bilancio idrico del suolo, fornisce uno strumento innovativo e necessario alla moderna gestione della risorsa idrica.

In particolare il sistema che si vuole mettere a punto per la gestione dell’irrigazione presenta maggiore affidabilità rispetto a un sistema di previsione delle piene, perché caratterizzato da dinamiche più lente e persistenti su aree più estese e quindi più prevedibili. Si pensi solo a titolo di esempio a eventi pluviometrici con intensità che possono raggiungere anche i 100 mm/h su aree di qualche decina di km² ed eventi evapotraspirativi che al massimo raggiungono tassi di 8-9 mm al giorno su aree di qualche migliaio di km². Tale constatazione permette di superare tutta quella serie di problematiche che incidono negativamente sull’affidabilità dei sistemi di previsioni delle piene.

Il modello previsionale utilizza l’output del modello meteorologico, costituito dai campi previsti di temperatura e precipitazione: tali valori vengono utilizzati come dato in ingresso per il modello idrologico per la previsione dell’umidità del suolo che, unita all’informazione sulle caratteristiche agronomiche delle colture presenti sul dominio di calcolo e all’assimilazione di dati di alcune stazioni di monitoraggio al suolo, oltre che da informazioni reperibili mediante telerilevamento da satellite, permette il bilancio idrico del suolo e la stima futura della quantità d’acqua necessaria alla produzione agricola.

Seguendo un’etica di sostenibilità e di risparmio energetico in campo ambientale, il progetto in esame ha come obiettivo cardine il miglioramento della gestione irrigua

nella Pianura Lodigiana e la riduzione dei consumi idrici attraverso l'uso accoppiato di modelli idro-meteorologici.

La sinergia proveniente dai diversi enti e piccole medie imprese operanti nei settori di previsione meteo-idrologica, di gestione e monitoraggio delle risorse sul territorio, contribuisce a promuovere una logica virtuosa nella razionalizzazione dell'acqua.

Le nuove tecnologie e competenze nel campo della modellistica numerica applicata alla meteorologia e idrologia forniscono strumenti necessari e utili al miglioramento nella gestione del territorio in previsione di un deficit o surplus idrico.

Inoltre, la ricaduta sul territorio in termini di riduzione dei costi per la produzione agricola, può favorire la competitività delle aziende agricole lombarde e qualificare il servizio offerto come modello replicabile.

1.3 OBIETTIVI DELLA TESI

Nel corso di questo studio sono stati utilizzati i dati relativi alle forzanti atmosferiche (precipitazioni e temperature), acquisite dalla rete ARPA-Lombardia e informazioni sui valori teorici di irrigazione forniti dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana.

Gli obiettivi principali che questa tesi si è prefissata di raggiungere sono i seguenti:

- 1) analisi dell'andamento del soil moisture relativo al campo “Azienda Agricola Cascina Nuova” situato nel comune di Livraga (LO) e confronto con i dati osservati, nel periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010, misurati dalle TDR (Time Domain Reflectivity), di proprietà del Politecnico di Milano;
- 2) stima del valore di umidità del suolo per cui il terreno Cascina Nuova a Livraga (LO), coltivato a mais, va in stress idrico e confronto con l'andamento di soil moisture con e senza apporto irriguo nel periodo 2009-2010;

3) analisi degli andamenti del soil moisture e della soggiacenza della falda per l'intero comprensorio irriguo gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana per il periodo 2003-2010 in condizioni di irrigazione secondo concessione e in condizione di contabilità idrica.

Nel primo caso è stata elaborata una calibrazione del modello idrologico per il campo Cascina Nuova di Livraga (LO), terreno in cui sono poste le sonde TDR per la misura dell'umidità del suolo. Il confronto tra gli andamenti del soil moisture osservato e quello ottenuto dalle simulazioni mostra come la variabilità del valore di umidità del suolo sia ben rappresentata.

Nel secondo caso, dopo aver stimato il valore di stress idrico della pianta di mais, coltivata nel terreno Cascina Nuova a Livraga, è stata effettuata un'analisi sull'andamento del soil moisture nel periodo di irrigazione (giugno – luglio) degli anni 2009-2010 con lo scopo di mostrare se e in quali giorni il contenuto di umidità del suolo presentasse un valore di criticità.

Nell'ultimo caso sono state effettuate delle simulazioni per il periodo 2003-2010 estrapolando dal modello idrologico le mappe di umidità del suolo del mese di luglio (mese in cui si ha l'irrigazione massima) e analizzando la soggiacenza della falda in condizione di irrigazione secondo concessione. Inoltre, per il periodo considerato, è stata considerata la condizione di irrigazione in contabilità idrica effettuando un confronto tra gli andamenti del valore di soggiacenza della falda ed eseguendo un confronto tra le mappe di umidità del suolo, estrapolate per il mese di luglio 2010, al 100%, al 90%, all'80%, al 70% e al 60% del valore teorico di irrigazione.

CAPITOLO 2

AREA DI STUDIO

In questo capitolo verranno esposte le principali caratteristiche dell'area in esame, caratterizzandola dal punto di vista geografico, morfologico, idrografico e climatico. Il lavoro svolto durante il progetto di tesi ha interessato il territorio gestito dal Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana.

Si riporta in Figura 2.1 il DEM (Digital Elevation Model) alla risoluzione di 40 m (Figura 2.1) della Regione Lombardia che copre l'intero territorio del bacino analizzato.

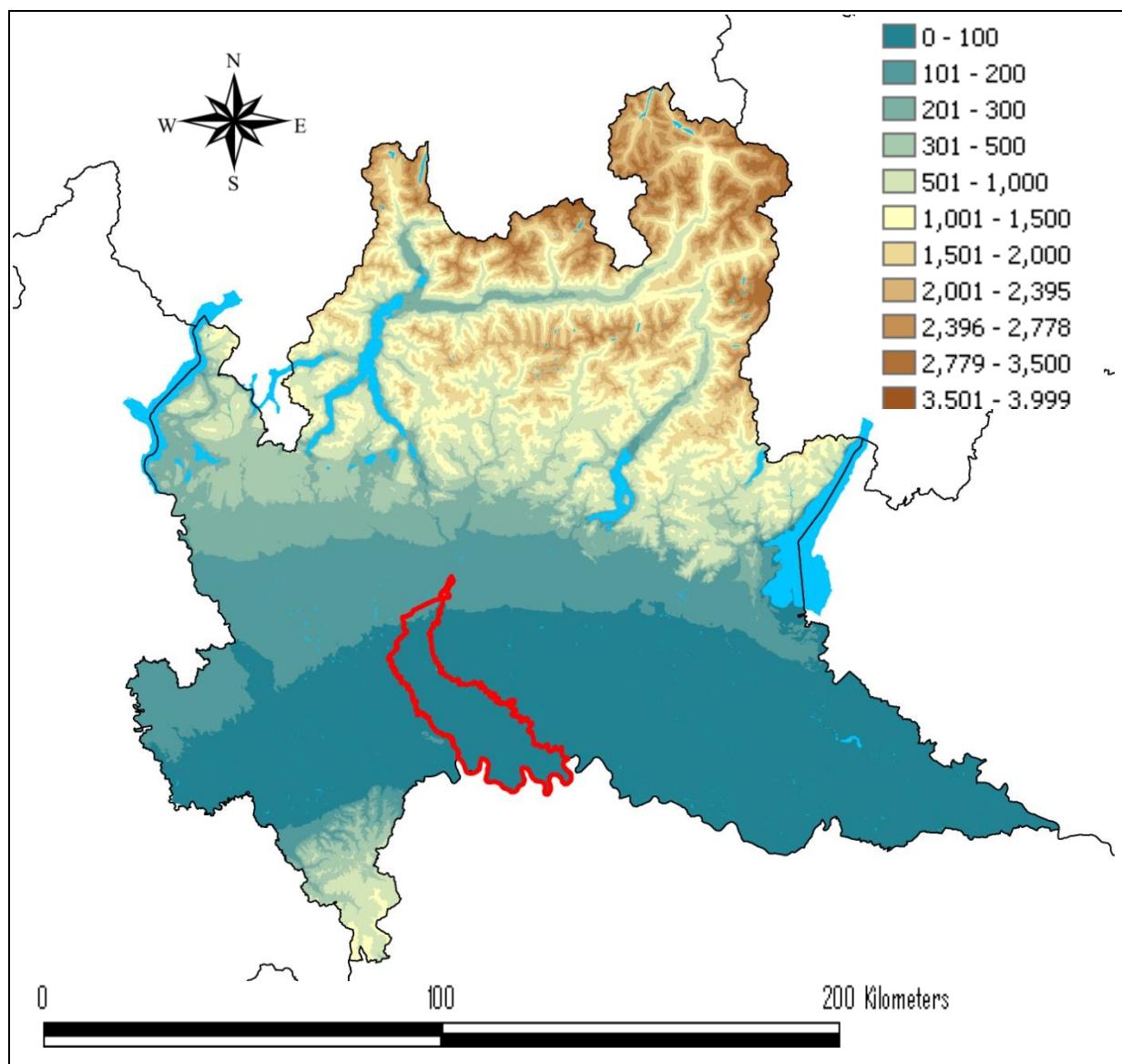


Figura 2.1 Modello digitale delle quote per la Regione Lombardia con risoluzione spaziale pari a 40 m. I confini in rosso evidenziano il Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana (MBL). La legenda in alto a destra esprime le quote altimetriche in metri sul livello del mare.

2.1 CARATTERIZZAZIONE MORFOLOGICA

GEOGRAFICA

E

L'area oggetto di studio è il comprensorio servito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, in Provincia di Lodi.

Il territorio, di circa 74.000 ha, coincide con quel lembo di fertile pianura padana che, a partire da nord nel comune di Cassano d'Adda in provincia di Milano, si estende verso sud sino al fiume Po, insinuandosi tra l'Adda a oriente e il Lambro a occidente. I comuni territorialmente competenti sono 69, di cui 53 in Provincia di Lodi, 3 in Provincia di Cremona e 13 in Provincia di Milano.

La popolazione residente è di circa 290.000 unità; la densità, mediamente pari a circa 390 ab/km², generalmente è sempre inferiore a 1000 ab/km².

La connotazione territoriale è ancora fortemente caratterizzata da una spiccata “ruralità” sia morfologica che paesaggistica, interrotta dal passaggio di alcune grandi vie di comunicazione (A1; Tav Mi-Bo; Tav Ve-To) e da alcuni estesi centri logistici e commerciali di recente costruzione (Figura 2.2).

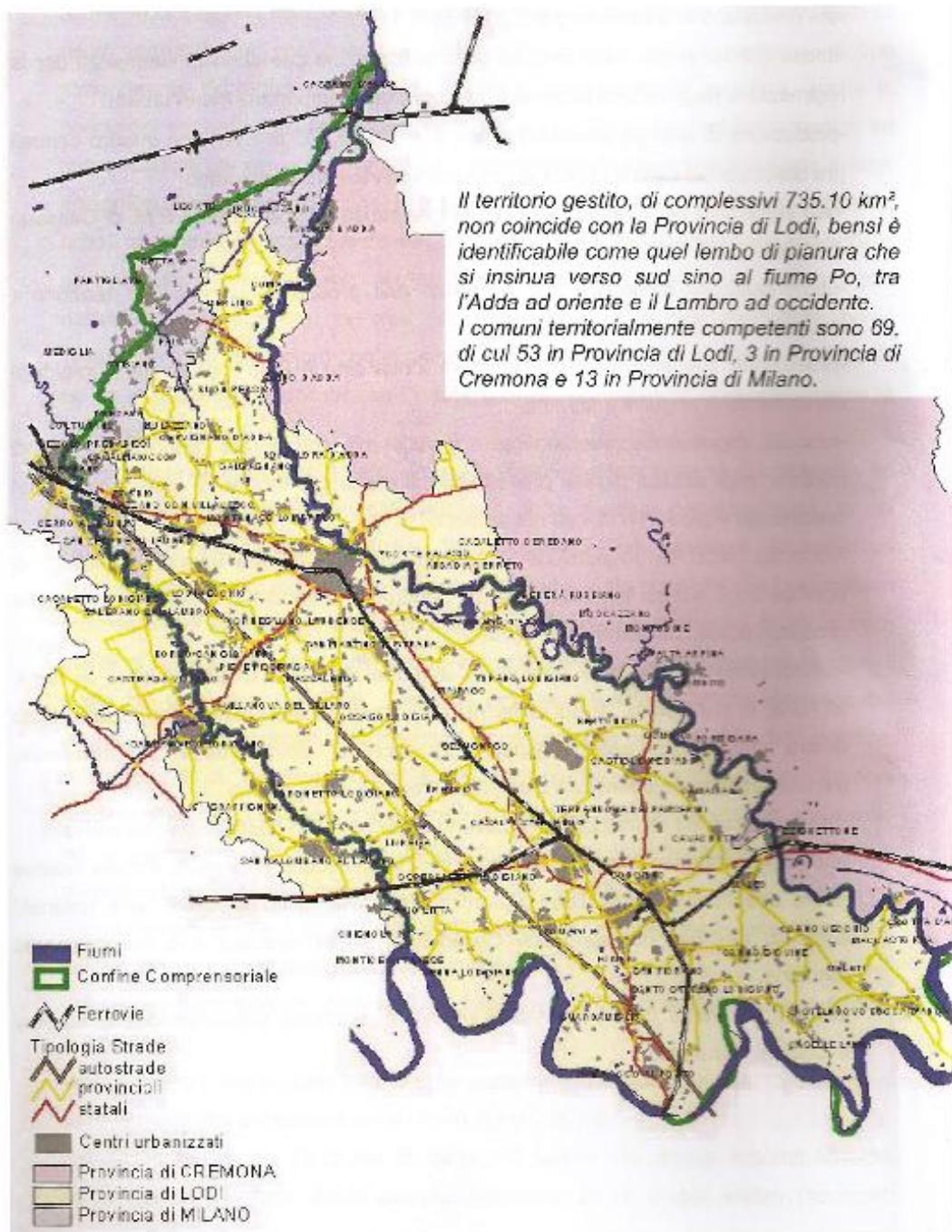


Figura 2.2 Territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, (fonte MBL).

2.2 CARATTERIZZAZIONE IDROGRAFICA

Per diverse caratteristiche, il sistema idrico può essere suddiviso in due zone corrispondenti alla parte medio-alta e bassa del territorio (la suddivisione delle parti considerate è mostrata in Figura 2.3). Le due aree sono comunque strettamente interconnesse e insieme formano il territorio consortile dotato di una fittissima rete irriguo-idraulica che, includendo le ramificazioni poderali e interpoderali, si sviluppa per circa 6000 km, con un numero di manufatti stimato di circa 50.000 (circa 8 al km).

La parte medio-alta, irrigata dal Canale Muzza che dipartendosi dal fiume Adda a Cassano d'Adda, si sviluppa per circa 40 km, distribuendo le acque lungo il suo percorso a 38 derivatori primari, che successivamente a valle della loro presa danno origine a numerosi altri canali (circa 400 tra secondari, terziari e quaternari), costituendo la rete operativa del sistema irriguo. Il territorio del Consorzio della Muzza Bassa Lodigiana copre un'area di 735 km². All'interno dei 75.000 ha vi sono circa 150 bacini irrigui, bagnati dai derivatori che si diramano all'interno del Consorzio; ogni singolo bacino irriguo viene poi suddiviso in comizi, che comprendono a loro volta i singoli campi dei proprietari terrieri.

Il drenaggio superficiale della parte medio-alta del territorio ed il relativo smaltimento avviene a gravità tramite lo stesso reticolo che svolge, infatti, una funzione di tipo promiscuo (irriguo-idraulica), sostituendosi alla rete di scolo. I colatori artificiali e naturali presenti (rari in considerazione della densità idrica del territorio) non sottendono un proprio territorio, ma fungono da recapito di regolazione o di scarico dei colmi di piena provenienti dalle rogge.

Nella parte più meridionale, invece, del Consorzio Muzza, a sud del “gradone” naturale, lungo la depressione geologica che si estende fino al fiume Po, l'irrigazione del basso piano avviene per lo più tramite sollevamento dai fiumi Adda e Po o con riutilizzo delle colature irrigue dell'altopiano, recuperate tramite appositi impianti

posti lungo il collettore generale di bonifica che attraversando trasversalmente il territorio basso, funge da canale di gronda (Figura 2.3).

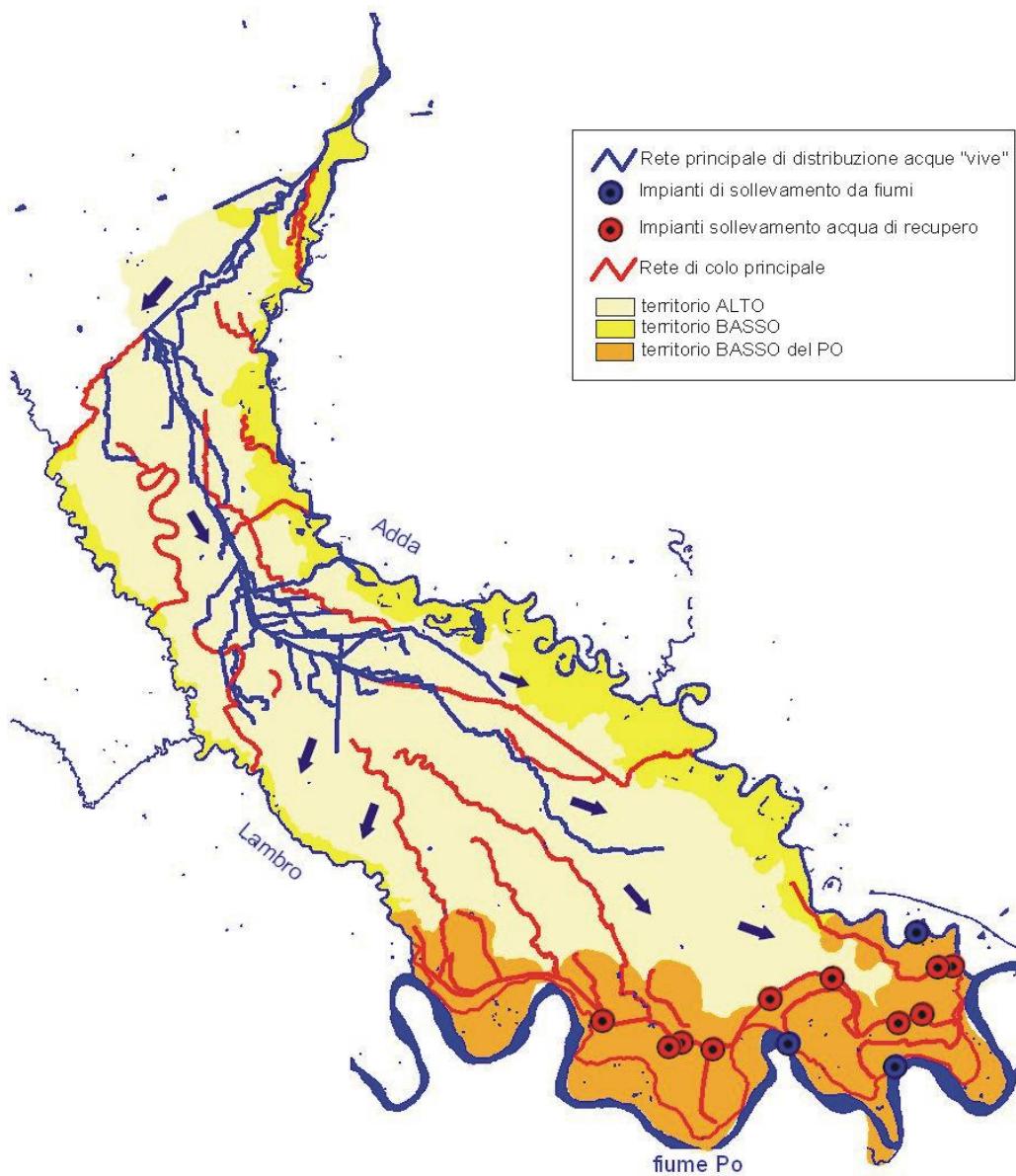


Figura 2.3: Schema generale della distribuzione irrigua consortile, (fonte MBL).

L'importanza strategica di una corretta gestione della risorsa idrica è ancor più evidente per l'uso plurimo che il consorzio fa dell'acqua disponibile. Infatti, l'utilizzo

delle acque per uso termoelettrico è, storicamente, il primo impiego extra agricolo attuato nel comprensorio. Le esperienze pilota applicate a partire dagli anni '70 si sono progressivamente perfezionate e ampliate nell'attuale uso industriale con le acque del canale Muzza per il ciclo di refrigerazione di sei grandi gruppi termoelettrici: due della centrale A2A di Cassano d'Adda (MI) e quattro di quella E.ON di Tavazzano (LO): la potenza complessiva installata delle centrali è pari a circa 3000 MW. La mitigazione delle rigide temperature invernali delle acque dell'Adda, a seguito del passaggio delle portate nei condensatori termoelettrici di Cassano d'Adda e Tavazzano, rende le acque del canale Muzza ideali per l'allevamento ittico. Sono, infatti, due gli impianti che prelevano portate finalizzate al mantenimento idrico di vasche per l'allevamento di anguille e storioni. Il Consorzio ha inoltre sviluppato negli ultimi anni un'importante attività di produzione idroelettrica, attraverso alcune centrali dislocate sia sul canale Muzza che su canali di regolazione idraulica.

2.3 CARATTERIZZAZIONE CLIMATICA

Le precipitazioni medie annue misurate nel comprensorio irriguo del Consorzio MBL sono comprese tra gli 800 e i 1000 mm. Il valore di 800 mm è indicativo della parte meridionale del territorio, in prossimità del fiume Po; mentre il valore di 1000 mm si riferisce alla parte settentrionale, corrispondente ai comuni consorziati nella provincia di Milano. In particolare a Lodi si ha un valore di precipitazione media annua di 874,9 mm, (Ceriani e Carelli, 2000).

L'attività irrigua è strettamente dipendente dagli andamenti climatici, in particolare dalla piovosità, ovvero dalla possibilità di compensare una stagione siccitosa, come in genere è quella estiva, con una appropriata pratica irriga.

Nel grafico riportato in Figura 2.4 è riassunto l'andamento pluviometrico del quarantennio 1961-2003 tra il 15 maggio ed il 31 agosto (periodo clou per l'irrigazione del Consorzio della Muzza) limitando per semplicità la ricognizione alla stazione pluviometrica consortile di Lodi che, in ogni caso, essendo baricentrica al

territorio è mediamente attendibile. Si nota che le piogge estive, complessivamente, sono in diminuzione del 25%, pari ad una riduzione tendenziale di 63 mm da metà maggio alla fine di agosto.

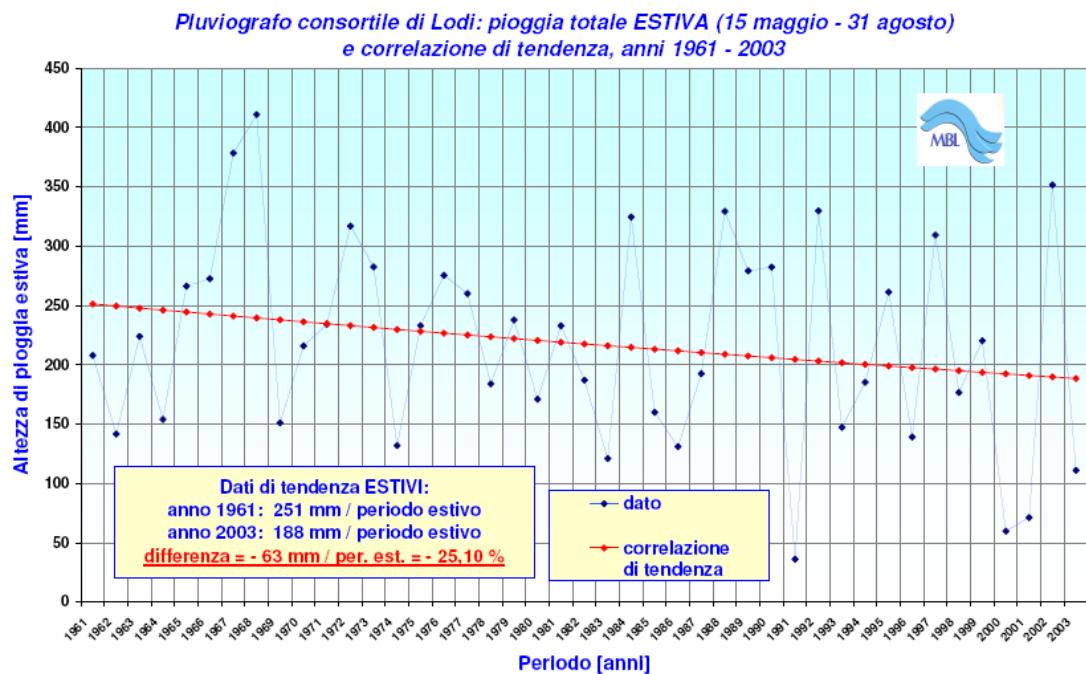


Figura 2.4 Altezze di pioggia a Lodi nel periodo 15 maggio - 31 agosto e correlazione di tendenza, dal 1961 al 2003; fonte MBL

Questi risultati conducono ad una conclusione oggettiva: l'agricoltura è tendenzialmente sempre di più dipendente dalla potenzialità ed organizzazione della propria struttura idrica artificiale e dalla disponibilità delle risorse di superficie del bacino idrografico da cui dipende.

Il problema della consistente differenza tra le portate nominali concesse e quelle che realmente si possono prelevare, generalizzabile a tutti gli usi comprensoriali, si ripropone in modo evidente per quanto riguarda l'acqua irrigua. L'indisponibilità infatti dell'acqua nel periodo estivo, in genere contraddistinta da un concomitante stato siccioso esteso sul bacino fluviale, dà luogo a sofferenze produttive che, contrariamente alle altre attività, non possono essere compensate. Il volume idrico mediamente non derivato in estate corrisponde ad oltre 85 milioni di metri cubi

corrispondenti, ad una portata continua di oltre 14 m³/s; ciò comporta che le portate nominali concesse, informazione su cui spesso si elaborano i piani e le strategie di distribuzione idrica, sono purtroppo entità del tutto teoriche.

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DEL SISTEMA

“IRRIGUO” NELLO STATO

ATTUALE

Volendo integrare in un unico sistema il modello di previsione meteorologica con il modello idrologico, assumono grande importanza i dati provenienti dalle stazione meteoclimatiche e i dati geomorfologici caratterizzanti il bacino irriguo studiato. Nelle varie sottosezioni si mostreranno tutte le tipologie di dati a disposizione utili per lo sviluppo del progetto. Inoltre, verrà descritto il complesso sistema di irrigazione del Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana, il quale è stato costruito e mantenuto nel corso degli ultimi 2/3 secoli per la pratica agraria.

3.1 TOPOGRAFIA, USO DEL SUOLO E LITOLOGIA

In questo paragrafo vengono illustrate le diverse tipologie di dati che sono stati utilizzati durante lo sviluppo del lavoro di tesi.

In Tabella 3.1 vengono riportate le informazioni digitali disponibili per la costruzione del quadro conoscitivo necessario alla realizzazione del progetto.

Tabella 3.1 Dati

Dato	Formato	Fonte
Modello digitale delle quote	Raster (risoluzione 40 m)	Regione Lombardia
Carta delle caratteristiche tessiturali dei suoli	Vettoriale	Regione Lombardia
Limiti comunali	Vettoriale	Regione Lombardia
Limiti provinciali	Vettoriale	Regione Lombardia
Carta Tecnica Regionale	Raster (tif)	Regione Lombardia
Rete Stazioni di Monitoraggio Meteorologico	Vettoriale	ARPA Lombardia
Limiti del consorzio	Vettoriale	Consorzio Muzza
Bacini irrigui	Vettoriale	Consorzio Muzza
Reticolo Irriguo	Vettoriale	Consorzio Muzza
Nodi idraulici	Vettoriale	Consorzio Muzza
Modalità irrigue	Relazione	Consorzio Muzza

Nella prima fase del lavoro sono state reperite ed elaborate le informazioni digitali atte a descrivere il territorio del Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana. L'attività di raccolta dati ha consentito l'impiego delle seguenti carte per le elaborazioni successive:

- DEM (Digital Elevation Model) alla risoluzione di 40 m del bacino irriguo analizzato (Figura 3.1).

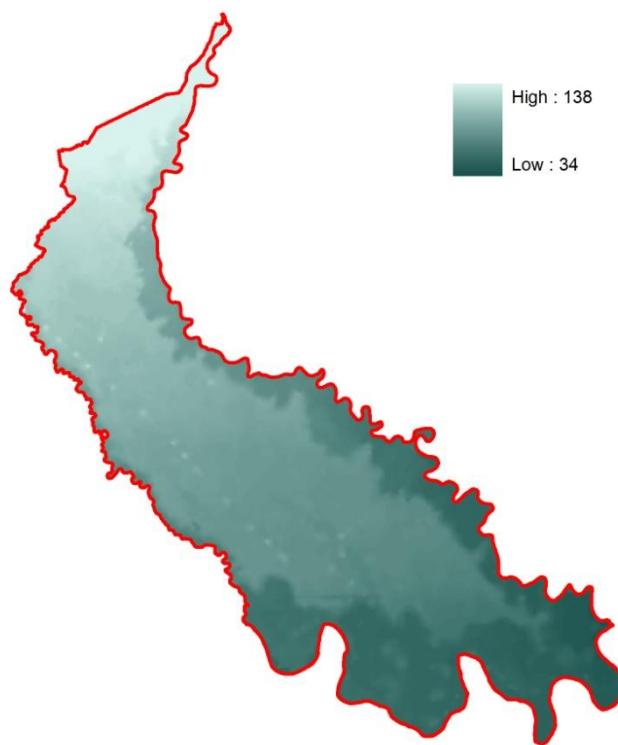


Figura 3.1 Modello digitale delle quote per il Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana (MBL) con risoluzione spaziale pari a 40 m. La legenda in alto a destra esprime le quote altimetriche in metri sul livello del mare.

- Documentazione cartografica digitale e topografica esistente e individuazione del canale principale “Canale della Muzza”.

Nella Figura 3.2 viene riportata la Carta Tecnica Regionale (CTR 1:10000) relativa al territorio considerato.

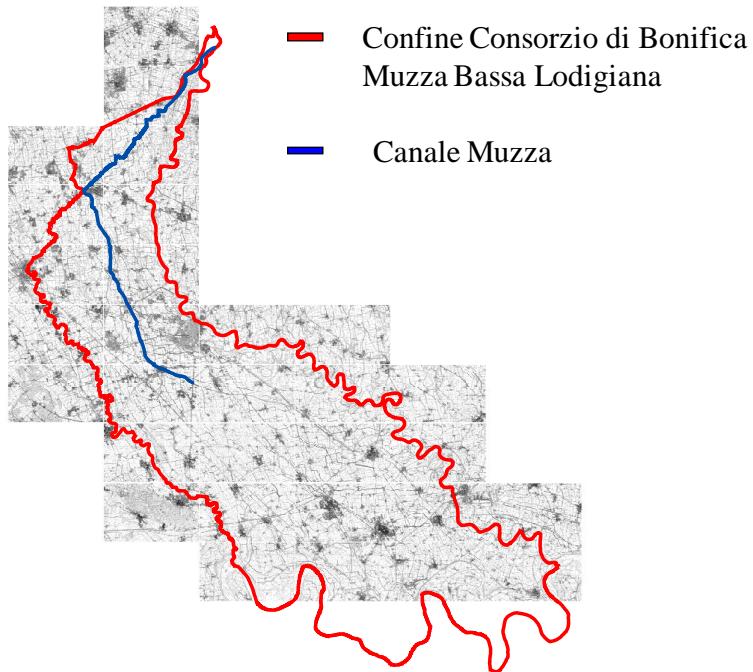


Figura 3.2 Carta Tecnica Regionale relativa al territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana

Un ruolo fondamentale per lo sviluppo di un modello idrologico distribuito è costituito dai Sistemi Informativi Geografici (GIS) che permettono di avere informazioni di carattere distribuito sui parametri del bacino. Sulla base della cartografia disponibile, quindi, sono state create le seguenti mappe raster alla risoluzione spaziale di 40 m, mostrate in dettaglio nel seguito:

- Mappa delle pendenze
- Mappa dell'esposizione dei versanti
- Mappe dei parametri idrologici del suolo: permeabilità a saturazione, indice di Brooks & Corey, capacità di campo, punto di appassimento, contenuto idrico residuo e a saturazione, bubbling pressure
- Mappa delle classi idrologiche del suolo
- Mappa del Curve Number
- Mappa della profondità del suolo

I primi test effettuati dal modello idrologico FEST-EWB hanno mostrato come la risoluzione spaziale di 40 m delle mappe portasse a tempi di calcolo troppo lunghi. Per questo motivo la risoluzione delle mappe GIS e del DEM è stata aumentata a 200 m.

Pendenze

Descrizione: mappa (Figura 3.3) delle pendenze locali

Unità di misura: gradi

Dati di origine: modello digitale delle quote

Metodo: viene calcolata per ogni cella del bacino idrografico lungo la direzione della massima pendenza valutata sulla base della quota delle otto cellette circostanti.

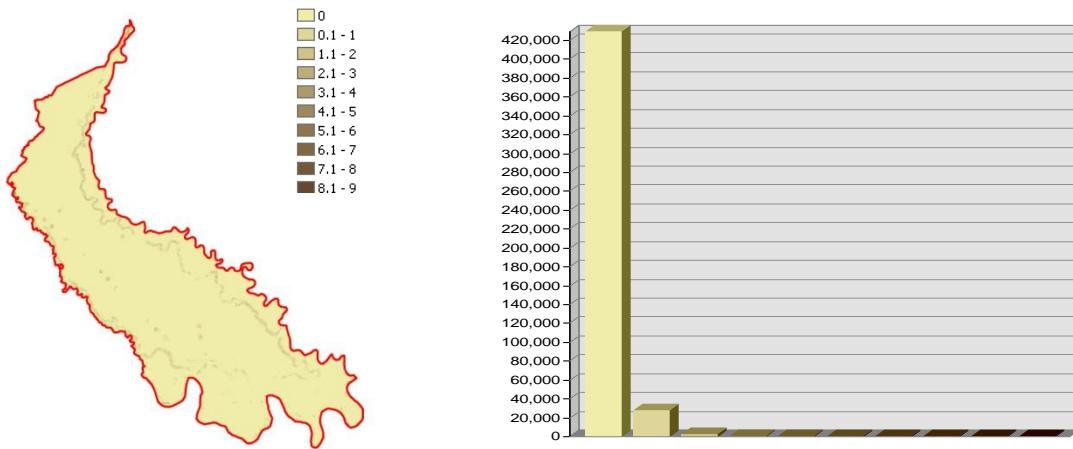


Figura 3.3 Mappa delle pendenze espresse in gradi (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Esposizione

Descrizione: mappa dell'esposizione (Figura 3.4) dei versanti

Unità di misura: gradi misurati in senso orario da nord

Dati di origine: modello digitale delle quote

Metodo: viene calcolata la direzione di massima pendenza da ogni cella verso le otto adiacenti. La mappa risultante contiene i valori espressi in gradi delle 8 direzioni cardinali in senso orario a partire da nord (0 corrisponde al nord, 90 gradi all'est, ecc). Alle celle con pendenza nulla per le quali non è definita l'esposizione, viene attribuito il valore di -1.

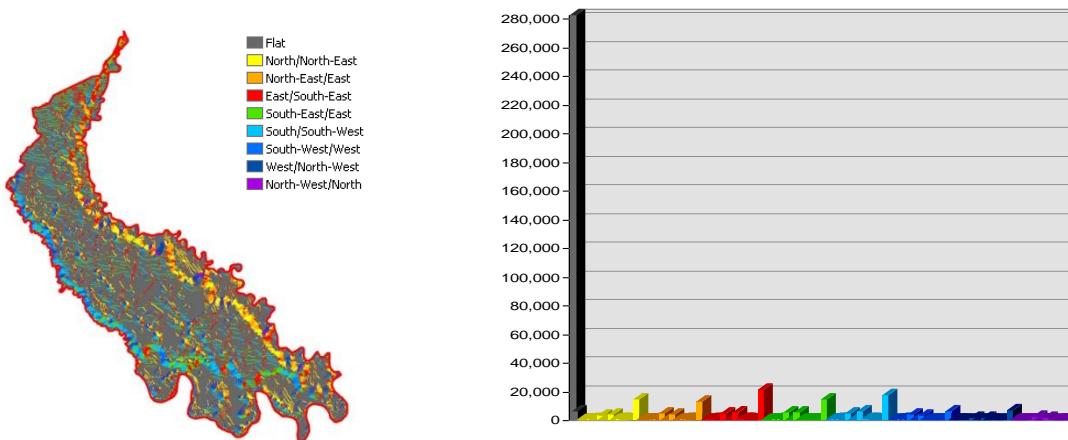


Figura 3.4 Mappa dell'esposizione dei versanti (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Permeabilità satura

Descrizione: mappa della permeabilità del suolo (Figura 3.5) in condizioni di saturazione

Unità di misura: m/s

Dati di origine: tessitura del suolo

Metodo: a partire dalla mappa della litologia del suolo opportunamente digitalizzata, sono state riconosciute sette tipologie di suolo rappresentative. Ad ogni classe di suolo sono stati attribuiti i valori dei parametri indicati nella Tabella 3.2.

Tabella 3.2 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Handbook of Hydrology, 2001)

Classe	Tipo	Ksat [m/s]	θ residuo	θ saturo	Brooks& Corey	wilting point	field capacity	bubbling pressure
G1, G2, G3	Gravel	1.0000E-04	0.006	0.417	1.090	0.007	0.018	0.0136
S1, S2	Sand	6.9444E-05	0.020	0.437	0.694	0.033	0.091	0.0726
S3	Loamy Sand	1.3889E-05	0.035	0.437	0.553	0.055	0.125	0.0869
L5	Sandy Loam	6.9444E-06	0.041	0.453	0.378	0.095	0.207	0.1466
L4	Loam	4.1667E-06	0.027	0.463	0.252	0.117	0.270	0.1115
A4	Clay	1.1111E-07	0.090	0.475	0.165	0.272	0.396	0.3730

La permeabilità a saturazione (Ksat) esprime la velocità di infiltrazione dell'acqua nel suolo quando questo è in condizioni sature.

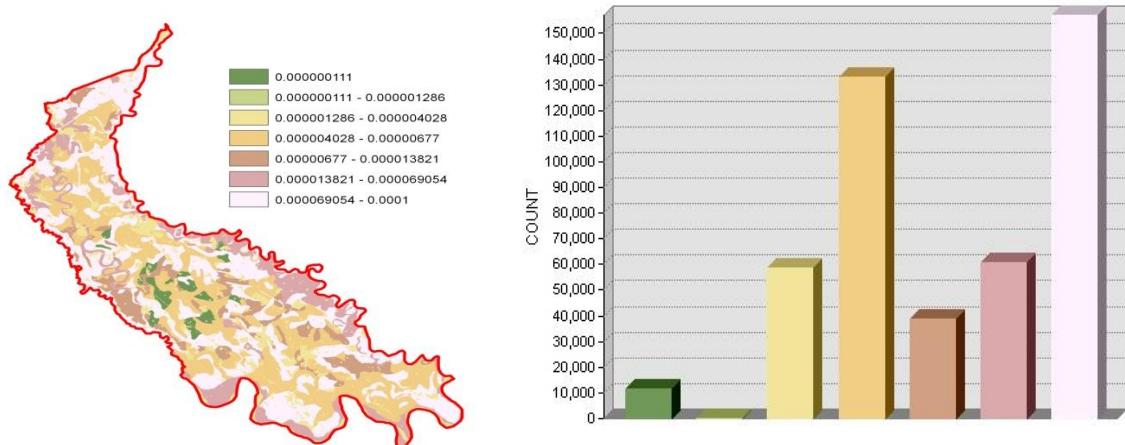


Figura 3.5 Mappa della permeabilità del suolo in condizione di saturazione (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)

Contenuto d'acqua del suolo

Descrizione: mappa del contenuto d'acqua del suolo in condizioni residue (Figura 3.6) e di saturazione (Figura 3.7).

Unità di misura: -

Dati di origine: tessitura del suolo

Teta (θ) residuo e teta (θ) saturo sono utilizzati per calcolare rispettivamente l'umidità residua e a saturazione del suolo. I valori sono ricavati in base alle classi litologiche.

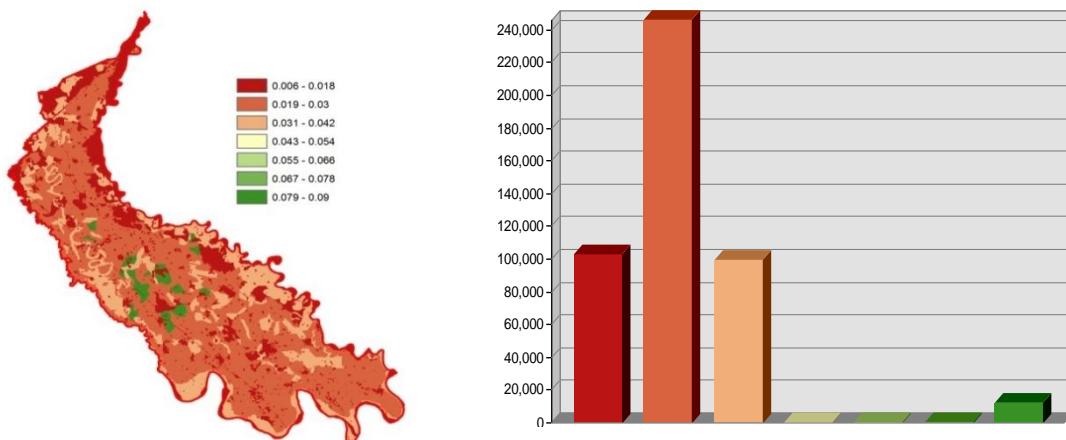


Figura 3.6 Mappa del contenuto d'acqua del suolo in condizione residue (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)

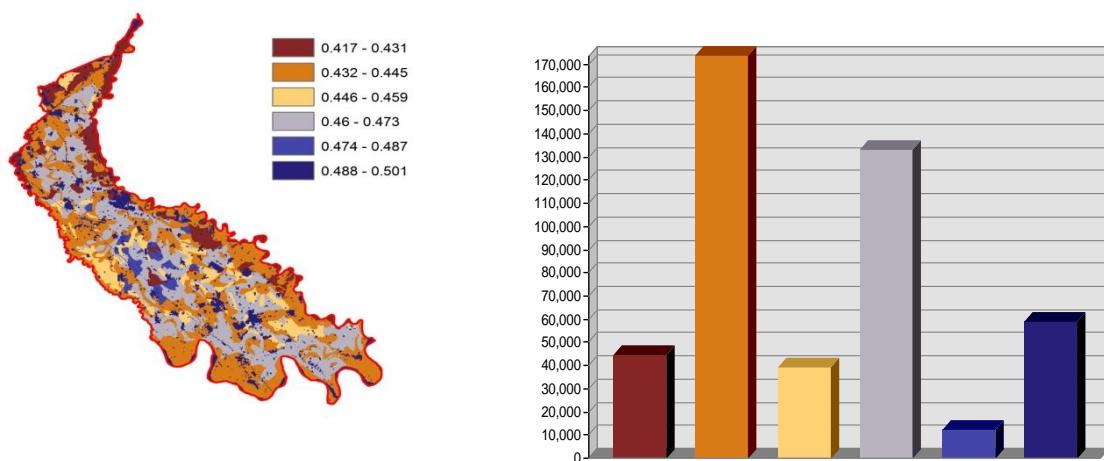


Figura 3.7 Mappa del contenuto d'acqua del suolo in condizione di saturazione (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)

Capacità di campo

Descrizione: mappa della capacità di campo del suolo (Figura 3.8).

Unità di misura: -

Dati di origine: tessitura del suolo

Esprime il contenuto di umidità nel suolo corrispondente al limite superiore dell'acqua disponibile o limite superiore di drenaggio.

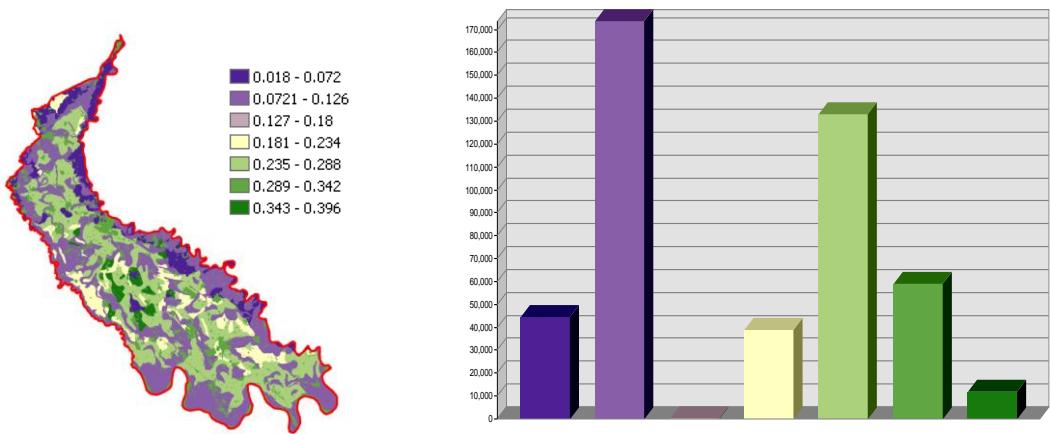


Figura 3.8 Mappa della capacità di campo del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Indice di distribuzione delle dimensioni dei pori di Brooks & Corey

Descrizione: Indice di distribuzione delle dimensioni dei pori di Brooks & Corey (Figura 3.9).

Unità di misura: -

Dati di origine: tessitura del suolo

L'indice di Brooks e Corey è utilizzato per calcolare la condutività idraulica. Questo indice è stato calcolato per ogni classe litologica.

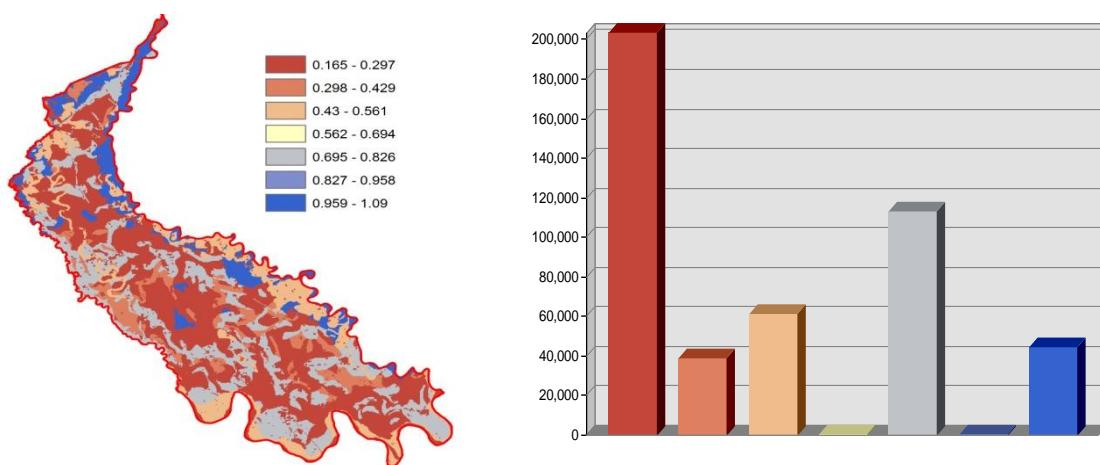


Figura 3.9 Mappa dell'indice di distribuzione delle dimensioni dei pori di Brooks & Corey (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Punto di appassimento

Descrizione: mappa del punto di appassimento del suolo (Figura 3.10).

Unità di misura: -

Dati di origine: tessitura del suolo

Il punto di appassimento (wilting point) corrisponde al contenuto d'acqua al quale la pianta inizia ad appassire a meno che il suolo non sia nuovamente bagnato. Il valore è stato ottenuto in funzione delle classi litologiche.

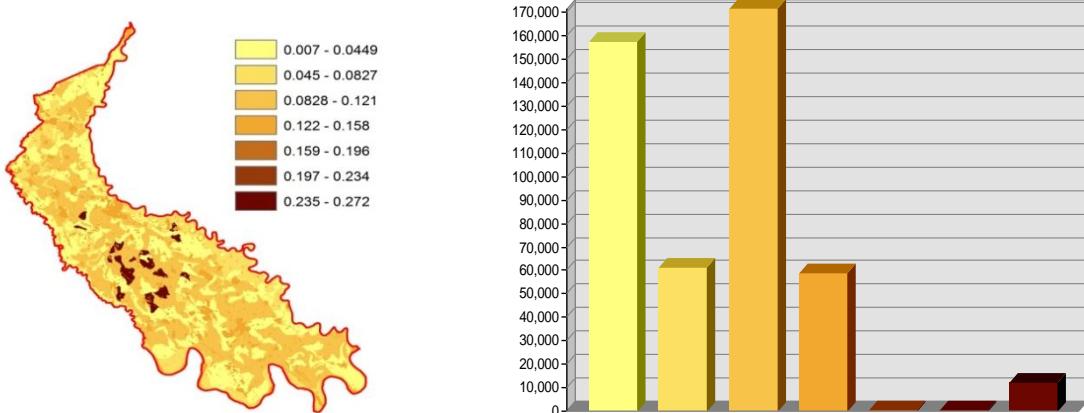


Figura 3.10 Mappa del punto di appassimento del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Bubbling pressure

Descrizione: mappa della frangia capillare (Figura 3.11)

Unità di misura: metri

Dati di origine: tessitura del suolo

Indica il livello (in metri nel nostro caso) del sottosuolo posto nella zona di aerazione, subito al di sopra della superficie piezometrica di una falda acquifera libera, caratterizzato dalla presenza di acqua capillare continua e sospesa.

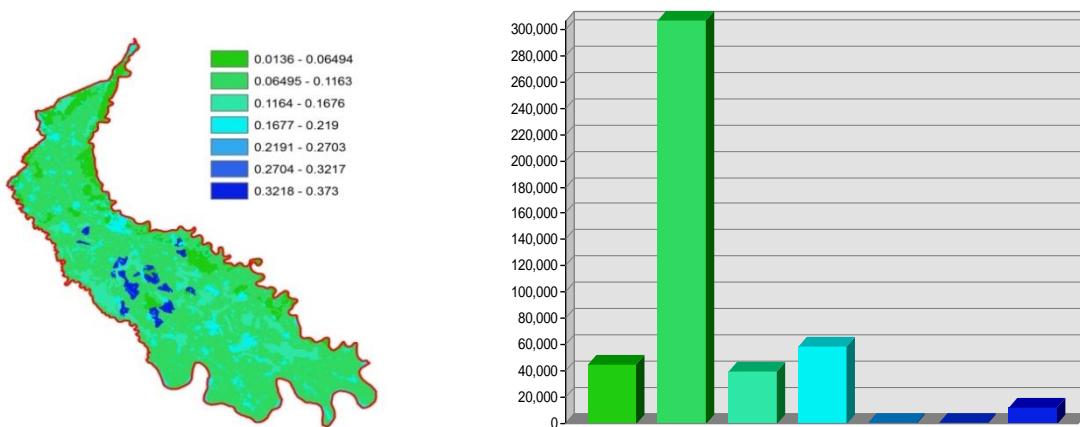


Figura 3.11 Mappa del punto di bubbling pressure (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Classi idrologiche

Descrizione: mappa delle classi idrologiche del suolo (Figura 3.12).

Unità di misura: -

Dati di origine: tessitura del suolo

Metodo: riclassificazione dei tipi di suolo riconosciuti secondo la Tabella 3.3.

Tabella 3.3 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti.

Tipo	Classe Idrologica	Codice mappa
gravel	A	1
sand	A	1
loamy sand	B	2
sandy loam	B	2
loam	C	3
clay	D	4

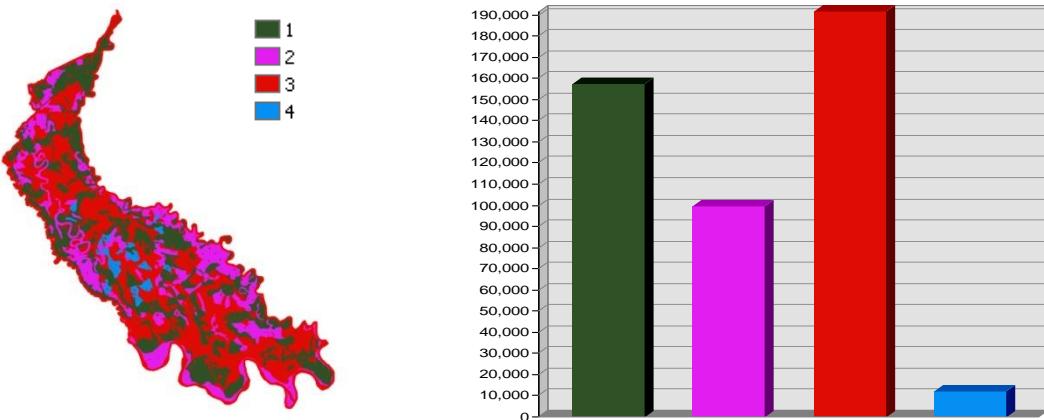


Figura 3.12 Mappa delle classi idrologiche del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Curve Number

Descrizione: mappa del Curve Number (Figura 3.13).

Unità di misura: -

Dati di origine: classi idrologiche, uso del suolo

Metodo: associazione dei valori di uso del suolo e classi idrologiche secondo la

Tabella 3.4

Tabella 3.4 Valori del CN_{II} per diverse tipologie ed uso del suolo (Soil Conservation Service); i valori riportati nella colonna della classificazione DUSAF si riferiscono ai tipi di suolo presenti all’interno del Consorzio Muzza, (Regione Lombardia, 2004).

Classificazione DUSAF	Classificazione Corine	Tipologia Uso suolo	Gruppo idrologico del suolo			
			A	B	C	D
U, UN		1.1.1 Tessuto Urbano continuo	89	92	94	95
		1.1.2 Tessuto urbano discontinuo	77	85	90	92

	1.2.1 Aree industriali o commerciali	81	88	91	93
	1.2.2 Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	98	98	98	98
	1.2.3 Aree portuali	81	88	91	93
	1.2.4 Aeroporti	72	82	87	89
R2	1.3.1 Aree estrattive	72	82	87	89
R3	1.3.2 Discariche	72	82	87	89
R4	1.3.3 Cantieri	72	82	87	89
	1.4.1 Aree verdi urbane	68	79	86	89
	1.4.2 Aree sportive e ricreative	49	69	79	84
S3, S4, S6	2.1.1 Seminativi in aree non irrigue	49	69	79	84
	2.1.2 Seminativi in aree irrigue	49	69	79	84
	2.1.3 Risaie	59	70	78	81
L1	2.2.1 Vigneti	67	77	83	87
L4	2.2.2 Frutteti e frutti minori	65	75	82	86
	2.2.3 Oliveti	65	75	82	86
P1, P2	2.3.1 Prati stabili	49	69	79	84
S1, S2	2.4.1 Colture annuali associate a colture permanenti	62	71	78	81
	2.4.2 Sistemi culturali e particellari complessi	67	78	85	89
	2.4.3 Colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti.	67	78	85	89
	2.4.4 Aree agroforestali	45	66	77	83
L7, B1	3.1.1 Boschi di latifoglie	60	65	70	77
	3.1.2 Boschi di conifere	60	65	70	77
	3.1.3 Boschi misti	60	65	70	77
	3.2.1 Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota	60	65	74	80
	3.2.2 Brughiere e cespuglieti	60	65	74	80
	3.2.3 Aree a vegetazione sclerofilla	60	65	74	80
N5, N8	3.2.4 Aree a vegetazione boschiva in evoluzione	60	65	74	80
R5	3.3.1 Spiagge, dune, sabbie (più larghe di 100 m)	25	55	70	77

	3.3.2 Rocce nude, falesie, rupi, affioramenti	68	79	86	89
	3.3.4 Aree percorse da incendi	68	79	86	89
	3.3.3 Aree con vegetazione rada	68	79	86	89
	3.3.5 Ghiacciai e nevi perenni	36	60	73	79
N1	4.1.1 Paludi interne	98	98	98	98
A2	5.1.1 Corsi d’acqua, canali e idrovie	99	99	99	99
A3	5.1.2 Bacini d’acqua	99	99	99	99
	5.2.1 Lagune	99	99	99	99

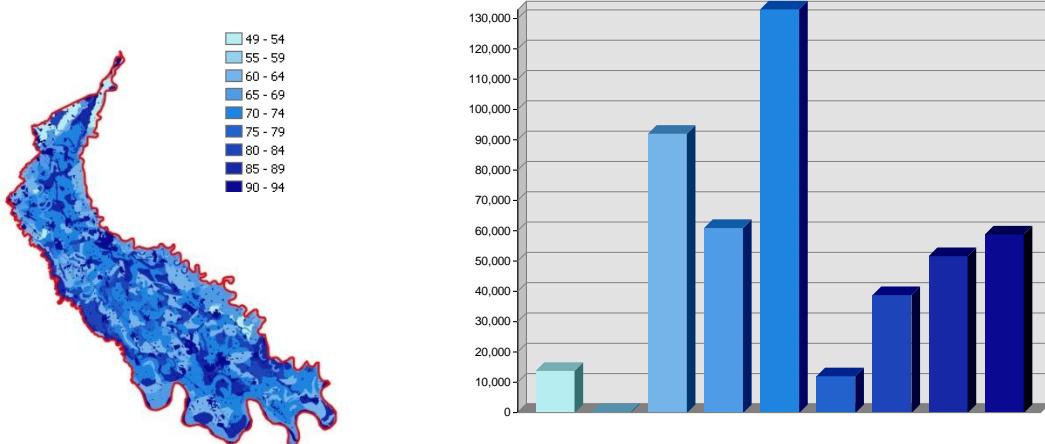


Figura 3.13 Mappa del Curve Number (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra)

Profondità del suolo

Descrizione: mappa della profondità del suolo idrologicamente attivo (Figura 3.14).

Unità di misura: metri

Dati di origine: Curve Number

Metodo: viene valutata come la massima capacità di ritenzione del suolo in condizioni di suolo asciutto (S_1) secondo il metodo del Soil Conservation Service (3.1)

:

$$S_1 = 0.254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (3.1)$$

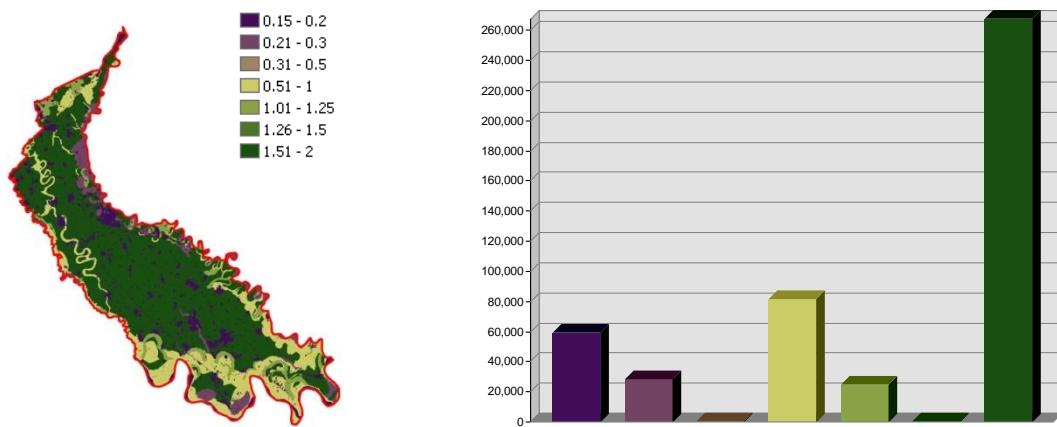


Figura 3.14 Mappa della profondità del suolo (sinistra) ed istogramma di frequenza assoluta (destra).

Inoltre per quanto riguarda i valori dell'albedo è stata creata una mappa con un valore omogeneo di 0.18 che corrisponde a un' albedo per campi di mais (coltivazione prevalente all'interno della Pianura Padana e nel Consorzio Muzza). Per la mappa di fraction vegetation inserita nel modello idrologico è stato scelto un valore di riferimento pari a 0.5.

Infine per quanto riguarda i parametri idrogeologici si è inserito un valore di k_s (conducibilità dell'acquifero) medio su tutto il bacino del Consorzio Muzza pari a 0.001 m/s e un valore di porosità efficace di 0.4, valori coerenti con la letteratura (Facchi et al., 2004). Per quanto riguarda il valore di *top* dell'acquifero si sono usati i valori del DEM, mentre per il *bottom* dell'acquifero si è inserito un valore medio di -25 metri rispetto al piano campagna; valore in cui si incontrano i primi strati argillosi.

Le mappe sopra descritte sono state utilizzate nel modello idrologico FEST-EWB alla risoluzione di 200 m (vedi appendice C).

3.2 IL RETICOLO IRRIGUO E LE TECNICHE DI DISTRIBUZIONE

Nell’assetto dell’irrigazione assume particolare importanza, soprattutto sotto l’aspetto gestionale ed amministrativo “l’utenza irrigua o bacino” che per definizione è la superficie agraria sottesa da un canale che convoglia quindi le acque che competono ai terreni che ne fanno parte. All’utenza si associa in genere la distribuzione a gravità (tipica è quella del canale Muzza); ai bacini vengono invece accomunati gli impianti di sollevamento.

L’utenza o il bacino, che rappresentano l’assetto superficiale dell’irrigazione, sono direttamente associati alla gerarchia dei canali che rappresentano invece l’assetto strutturale distributivo. Ad ogni canale, dal più grande al più piccolo, corrisponde quindi un bacino irriguo, ovvero un territorio sotteso formato dalla somma delle superfici che vengono irrigate dal canale stesso. Tutti gli utenti che irrigano con lo stesso canale formano l’utenza, e oltre al costo dell’acqua, a loro compete il mantenimento e gli oneri di esercizio dei canali lungo il percorso che porta l’acqua alla sua utilizzazione, ossia dal vettore generale (dall’impianto di sollevamento) sino al campo.

In Figura 3.15 sono riportate le mappe riferite al comprensorio irriguo del Canale della Muzza mettendo in evidenza i bacini o utenze primarie e secondarie.

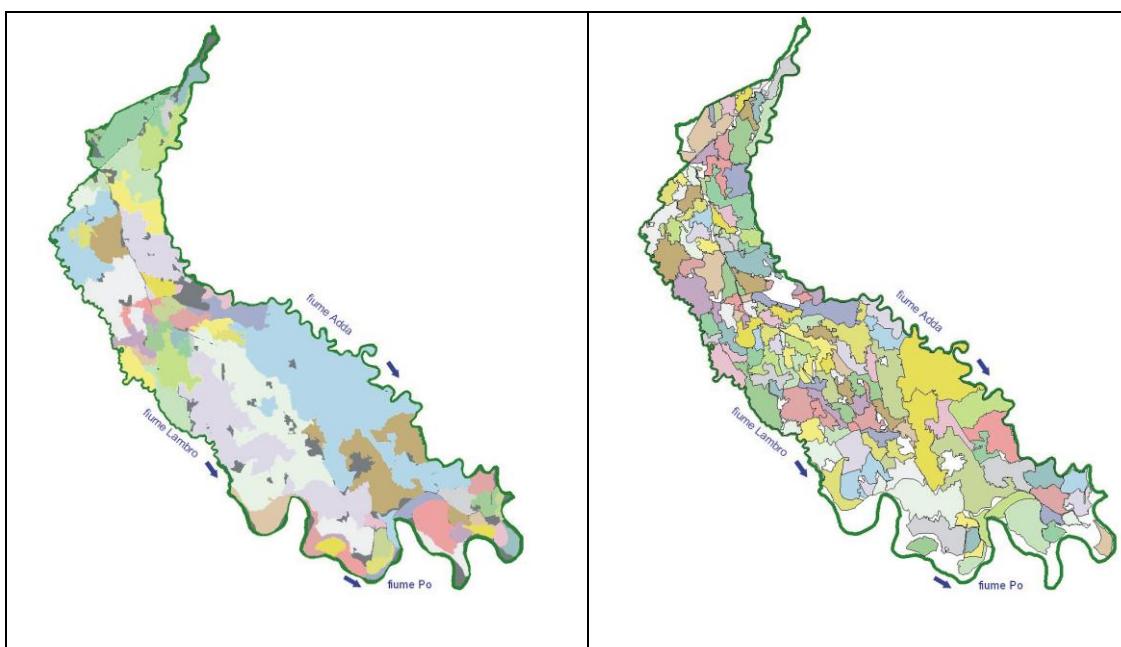


Figura 3.15 Mappa dei bacini o utenze primarie (a sinistra) e mappa dei bacini o utenze secondarie (a destra), (fonte MBL).

Il Canale della Muzza è il canale principale della rete irrigua e i primi canali che derivano da esso sono considerati “derivatori di I ordine”. Analogamente le rogge che derivano dai derivatori di I ordine sono considerate “derivatori di II ordine”, e così fino ad arrivare in certe aree del comprensorio in cui si hanno anche i “derivatori di VI ordine”.

In particolare, la rete irrigua, la cui spina dorsale è costituita dal canale Muzza, comprende attualmente: il Canale Muzza (di lunghezza pari a 40 km), 38 derivatori primari (di circa 272.2 km), rogge o cavi secondari per un totale di 1650 km, rogge o cavi poderali per un totale di 1400.3 km e colatori (235.4 km).

Il Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana ha fornito i dati storici delle derivazioni dell’acqua del I e del II ordine del Canale Muzza con le relative portate in l/s. (Tabella 3.5)

Tabella 3.5 Elenco dei derivatori del primo e del secondo ordine del Canale Muzza con le relative portate Q [l/s].

DERIV. MUZZA	DERIV. ROGGE	DESCRIZIONE	Portata Q [l/s]
-------------------------	-------------------------	--------------------	----------------------------

		COPPA		
1		INCASSATA		1,500.00
2		CORNEGLIANA		
3		BERTOLA		550.00
	1	CATTANEO		
	2	SETTALA		
	3		BRIVIA	300.00
	4		CAVAIONE	300.00
			ROSSATE	300.00
			SETTALA	250.00
				1,150.00
4		REGINA		
	5	CODOGNA ALTA		
	6		BUCO DELLA POLA	50.00
	7		BAGGIA	22.00
	8		COMAZZO	10.00
			MONGATTINO	160.00
				242.00
5		CATTANEO		
	9	COMAZZO		
	10		COMAZZO	2,210.00
			VAIANO	1,800.00
				4,010.00
6		DERIVATORE		
	11	LAVAGNA		
	12		ZELA OSPITALA	1,150.00
	13		FASOLA	700.00
	14		QUARTERA	1,850.00
			CARCASSOLA BRUNORA	900.00
				4,600.00
7		MUZZETTA		
	15		MUZZINO GRANDE	1,279.08
	16		MONTICELLA	1,110.63
	17		MUZZINO DI MIGNETE	742.34
	18		BOCCHELLO REGONA	1,110.63
	19		MUZZETTA VA E VIENI	73.88
	20		ROGGIA CAMPAGNA	1,987.28
	21		BERTONICA DI ZELO	196.16
				6,500.00

8	CRIVELLETTA		500.00
9	S.GERINA		
10	ADDETTA		700.00
	CAVO BOLCA		
	22	BORRA	400.00
	23	CAMOLA FRATA VECCHIA	750.00
	24	LANZANA	450.00
			1,600.00
11	CAVO APOLLO		
	25	S. MARIA	600.00
	26	OSPEDALINO	350.00
	27	LECCAMA MAIOCCA	1,250.00
	28	DRESANA BONDIOLA	1,350.00
	29	VIROLA	900.00
	30	MULAZZANA	800.00
			5,250.00
12	CAVO SATURNO		
	31	VESCA	350.00
	32	CASOLTA	600.00
	33	DOSSA	350.00
	34	GUAZZONA	250.00
	35	RIGOLETTA	1,284.00
	36	MONTANASA	856.00
	37	BOCCONA	850.00
	38	BESANA LUSERANA	900.00
			5,440.00
13	CAVO IRIS		
	39	CAMOLA VECCHIA	800.00
	40	PAGANA	700.00
	41	ISOLA BALBA	600.00
	42	BOLENZANA	800.00
			2,900.00
14	CAVO TRIS		
	43	S.MARCO	650.00
	44	VIRTUANA	650.00
		MUZZINO S. PIETRO	
	45	(BADIA)	1,200.00
		MUZZINO S. PIETRO	
	46	(ASRESANA)	800.00
	47	TRIULZA	300.00

			MUZZINO S. BASSIANO (ANTEGNATICA)	513.00
	48		MUZZINO S. BASSIANO (COMUNE)	616.00
	49		MUZZINO S. BASSIANO (BAGNOLO)	1,102.00
	50		MUZZINO S. BASSIANO (S. BASSANO)	719.00
	51			6,550.00
15		MARCONA DENTINA		
	52		MARCONA	829.00
	53		DENTINA	471.00
				1,300.00
16		PADERNA CESARINA		
	54		BOTTEDO	550.00
	55		DENTINA	550.00
				1,100.00
17		CODOGNA BASSA		
	56		CASALA	548.06
	57		NUOVA	689.40
	58		BAGOLA	251.25
	59		GUARDALOBBIA	376.14
	60		ZUCCHETTA	94.46
	61		CANCELLIERA	665.74
	62		TRECCHINO	157.41
	63		CAVACURTA VECCHIA	250.34
	64		MOLINA	203.96
	65		MOIENTINA	250.34
	66		ABADESSA	423.88
	67		S. FIORANA	751.77
	68		CODOGNINA	422.64
	69		CODOGNA	10.00
	70		TRIULZA	1,800.00
	71		PRIORA	411.36
	105		CAVALLERA CRIVELLA (TRECCO)	252.84
	72		BOZZA GAZZANIGA	501.25

				8,060.84
18		BOTTEDO		100.00
19		BALZARINA		
	73		CA' DE' L'ACQUA	375.00
	74		COLOMBERA	375.00
				750.00
20		CAVO NISO		
	75		URBANA	500.00
	76		FERMA MASCARINA	350.00
	77		VITALONA	1,000.00
	78		GAVAZZA	700.00
				2,550.00
		CAVO BARDO		
21		PAN		
	79		DENTINA ORTOLANA	1,000.00
	80		S.SIMONE E GIUDA	850.00
	81		CAMPOLUNGA	450.00
				2,300.00
22		CAVO BARCAS		
	82		BARGANA FILIPPINA	550.00
	83		CASSINETTA	700.00
				1,250.00
23		SANDONA		800.00
24		BARBAVARA		
	84		BONORA MICOLLI	247.57
	85		CINQUE ONCE	144.66
	86		SOLA	2,107.77
				2,500.00
		CAMOLA		
25		NUOVA		500.00
26		CAVO ALMOS		
			BOLLETTA OSPITALA	
	87		RAMI VARI	1,000.00
	88		ALBARONE	400.00
	89		MAIRAGHINO	400.00
				1,800.00
		DERIVATORE		
27		CODOGNINO		
	90		IMPIANTO ITTICO	8,000.00
	91		QUARESIMINA	700.00

28	92	CORNEGLIANA	600.00
			9,300.00
29		CAVALLONA	700.00
30		CAVO MARTE	
	93	FRATA VILLANOVA (S.MARIA)	1,333.00
	94	FRATA VILLANOVA (VILLANOVA)	667.00
	95	MONGIARDINA	700.00
	96	MALGUZZANA	400.00
	97	BELTRAMA S.OMARA	800.00
			3,900.00
31		PADERNINO	400.00
32		MASSALENGA	650.00
33		CA' DE' BOLLI	
	98	CAVALLERA CRIVELLA (MONASTEROLO)	505.68
	99	CAVALLERA CRIVELLA (GRAZZANELLO)	284.46
	100	CAVALLERA CRIVELLA (ROMETTA)	379.11
	101	CAVALLERA CRIVELLA (TERENZANO)	189.81
	102	CAVALLERA CRIVELLA (TERRANOVA)	916.52
	103	CAVALLERA CRIVELLA (TESORO)	1,005.06
	104	CAVALLERA CRIVELLA (FARUFFINO) BERTONICA	916.52
	106	BERTONICA (MONTICELLA)	1,110.63
	107	BERTONICA (CAMPAGNA)	1,987.28
	108	BERTONICA (REGONA)	1,110.63
	109	TURANA (NEGROLI)	347.52
	110	TURANA (ROVEDARO)	382.27
	111	TURANA (BERNARDINA)	625.54
	112	TURANA (PAGANINA)	556.03
	113	TURANA (VITTADONE)	991.82
	114	TURANINA	973.06

	115	MOLGORA-MOLGORINO	173.76
	116	COTTA BAGGIA (VITALIANA)	2,000.00
	117	COTTA BAGGIA (MORARA)	2,000.00
	118	REBECCO-REBECCHINO	800.00
			17,255.70
34		CAVO CAMPA	
	119	PANDINA	400.00
	120	CAMPAGNOLA	750.00
			1,150.00
35		PRIORA	400.00
36		CAVO CARPANO	550.00
37		VIGANA	
	121	BRUSEDÀ	400.00
	122	VISTARINO MODIGNANO	250.00
	124	VIGANONA	350.00
	125	OGNISSANTI	500.00
	126	COMUNE	953.03
	127	PANISACCO	358.97
	129	COMUNETTA	788.00
	130	FRATA OSPOEDALETTA	1,500.00
	131	GRANATA	750.00
		ROGGIONE D'ORIO	
	132	(BRODA)	141.00
		ROGGIONE D'ORIO	
	133	(MARMORA)	468.00
		ROGGIONE D'ORIO	
	134	(GAMBALOITA)	291.00
			6,750.00
		CA' DEL PARTO	
	135	BIRGA	259.00
	136	VISTARINA (BREMbio)	95.30
	137	VISTARINA (TORELLO)	445.00
		VISTARINA	
	138	(COLOMBARONE)	296.00
	139	VISTARINA (DOTTORA)	274.00
		VISTARINA (GAVAZZA	
	140	SOMAGLIA)	430.00
	141	VISTARINA (BELVEDERE	196.00

		O MOLGONERA)	
	142	PORRA NUOVA	650.00
		ROGGIONE	
	143	SOMAGLIA(MORGANA)	373.00
		ROGGIONE	
	144	SOMAGLIA(MIRABELLO)	532.00
		ROGGIONE	
	145	SOMAGLIA(SENNNA)	295.00
	123	POPOLA POZZA	500.00
	155	CAREGGIA	800.00
	128	FILIPPESSA	1,600.00
			6,745.30
38	LANFROIÀ		
		VISTAR. ZORL.(OLZA	
	146	MAGNAGHINO)	185.20
		VISTARARINA	
	147	ZORLESCO(ZORLESCO)	719.50
	148	BONONA	800.00
	149	POVERA(SECUGNAGO)	304.00
	150	POVERA (OLZA)	646.00
	151	LANFROIÀ	250.00
	152	OSSAGA	538.00
	153	GRAZZANA	450.00
	154	POPOLA CORSA	500.00
	156	VAGHINDARNA	512.00
			4,904.70

Si è cercato di semplificare quanto più possibile la descrizione dell'assetto irriguo, con il fine di produrre un'identificazione del comprensorio, tralasciando quindi alcune circostanze di utilizzo che comunque non sono rappresentative della situazione generale.

La complessità resta tuttavia oggettivamente elevata e ciò dipende dalla stessa natura del sistema.

Come già detto nel paragrafo 2.2, il sistema idrico può essere, per le diverse caratteristiche, suddiviso in due zone corrispondenti alla parte alta e bassa del comprensorio.

In Figura 3.16 è rappresentato il territorio gestito dal Consorzio di Bonifica MBL con la rete irrigua; circondato a sud dal fiume Po, a est dal fiume Adda e a ovest dal fiume Lambro.

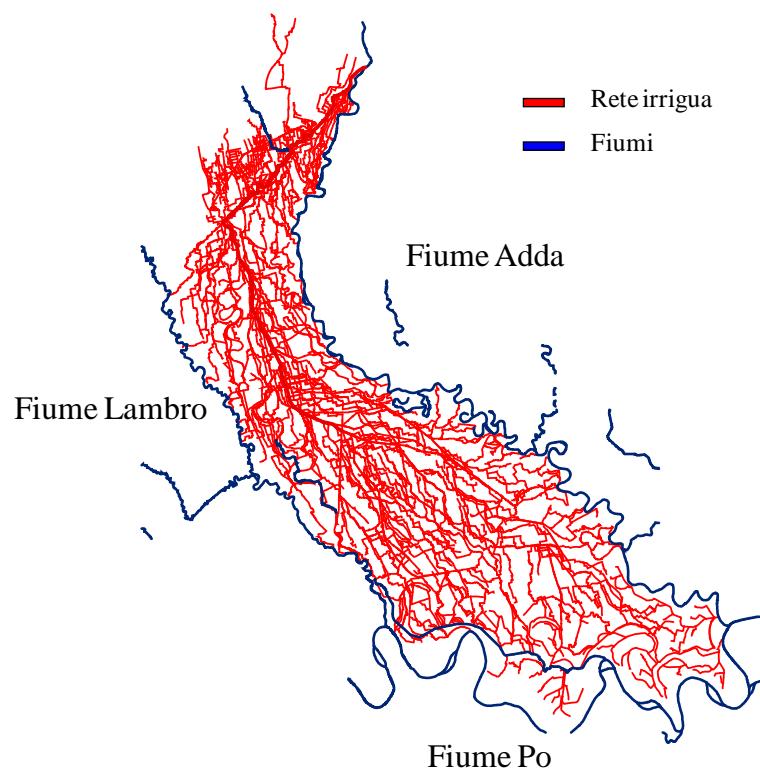


Figura 3.16 In rosso è riportata la rete irrigua all'interno del consorzio Muzza; in blu sono raffigurati i fiumi principali.

Nella Figura 3.17 è riportata la mappa dei bacini irrigui con il reticolo irriguo principale, formato dal canale principale della Muzza e dai derivatori primari e secondari.

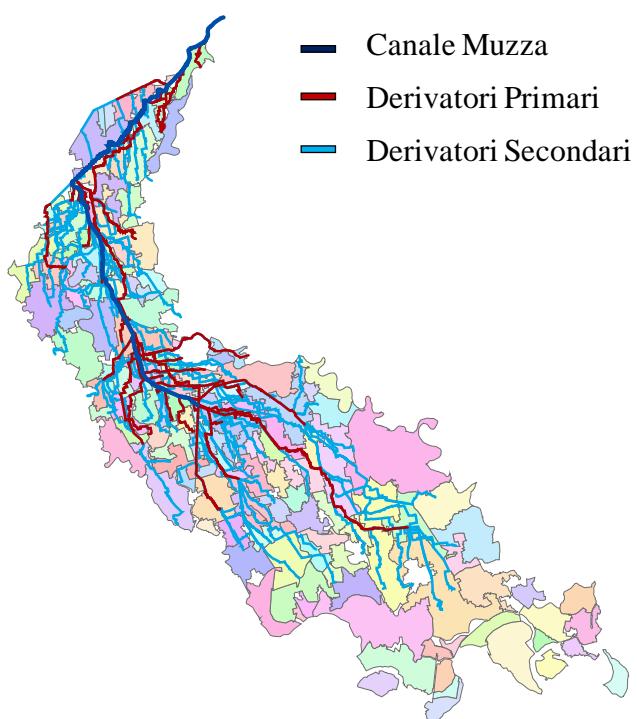


Figura 3.17 Comprensorio irriguo del Canale Muzza con le relative derivazioni

Alla frazione di Tripoli nel comune di Massalengo (LO) termina il Canale Muzza, dando luogo con un salto di fondo di circa 2 m all’omonimo colatore, il quale a sua volta dopo un percorso di quasi 20 km defluisce in Adda nei pressi del comune di Castiglione d’Adda.

Della quantità di acqua derivata dalla fonte di alimentazione ed immessa nella rete di irrigazione, una parte si perde nei canali di diverso ordine per infiltrazione profonda (nei canali in terra), per porre a regime il sistema, per manovre di regolazione e per evaporazione (nelle condotte o nei canali rivestiti), un’altra parte si perde durante la somministrazione dell’acqua sul campo per infiltrazione profonda o per scorrimento superficiale. Inoltre vi sono le “perdite indirette” rappresentate dai volumi d’acqua che vengono prelevati dal fiume senza essere distribuiti al campo e che sono utilizzati per riparare rotte d’argine, rimuovere alberi caduti, riparare danni provocati da animali selvatici, ripristinare frane, pulire gli alvei etc.. Le perdite lungo le reti dipendono oltre che dalla natura delle opere irrigue dall’esperienza del personale

incaricato di manovrare le apparecchiature di distribuzione dell'acqua irrigua, secondo il programma dell'irrigazione collettiva.

Le perdite sul campo interessano più da vicino la tecnica irrigua, in quanto esse sono condizionate prima di tutto dal metodo di irrigazione adottato e, per ogni metodo, dalla correlazione più o meno razionale fra i parametri della somministrazione dell'acqua sul campo (caratteristiche fisico - meccaniche del terreno, dimensioni e pendenza longitudinale della parcella, corpo d'acqua, altezza d'acqua somministrata con ogni adacquamento, ecc.).

Le perdite che si verificano dalla presa principale fino alle aziende e durante le somministrazioni sul campo, danno luogo all'indice di efficienza dell'irrigazione. Nel comprensorio però l'efficienza dell'irrigazione risulta condizionata non solo dalla corrispondenza dei parametri applicativi, ma in modo determinante, da tutto ciò che sta al contorno. E' accertato che il sistema irriguo del territorio lodigiano è scarsamente efficiente, per una ragione generale assoluta: non è e non può essere classificato come un sistema esclusivo di irrigazione, bensì di distribuzione idrica superficiale e di mantenimento territoriale. I benefici dell'irrigazione, che in una distribuzione "classica" vengono destinati esclusivamente alle coltivazioni sono, nella fattispecie, condivisi con altre attività produttive. E' la relativa disponibilità di risorsa idrica che storicamente ha determinato le condizioni per la nascita dell'equilibrio e che è tuttora il presupposto fondamentale per il suo mantenimento.

La superficie comprensoriale agraria utile (S.A.U.) di complessivi 64.845 ha (pari a circa l'88% della territoriale di 73.509) è irrigabile ed irrigata.

L'irrigazione nel suo complesso è rappresentabile in uno scenario estremamente eterogeneo, distinguibile per:

- a) *provenienza* delle acque primarie (fonte naturale di prelievo): il 94,7% proviene dalle acque di Adda, il 3,4% dalle acque di Po e l'1,9% dalle altre acque.
- b) *natura* delle risorse utilizzate, distinguendo tra irrigazione con acque "vive" o primarie (84%) e acque secondarie o di colatura (16%)

- c) *modalità* di derivazione e distribuzione dell’acqua in ordine al tipo di prelievo primario, ovvero con prelievo primario a gravità ($\approx 91\%$ pari a 58.768 ha) e prelievo primario per sollevamento ($\approx 0,9\%$ pari a ha 6.097 di cui 5.499 ha con impianti irrigui tradizionali e ≈ 600 ha con altre modalità in gran parte tramite pozzi).

Le modalità di adduzione e di distribuzione irrigua, si distinguono in quattro momenti fondamentali: *la derivazione, il trasporto, la distribuzione, la restituzione*.

Il quadro generale è distinto tra il territorio alto e quello basso. L’altopiano è totalmente sotteso dal canale Muzza, la derivazione primaria avviene a gravità come pure i deflussi lungo la rete di distribuzione, l’irrigazione invece viene effettuata immettendo le acque sul campo a gravità o per sollevamento secondario. Il basso piano è anch’esso in buona parte sotteso dal Canale Muzza, con acque di recupero la cui distribuzione può avvenire a gravità con sollevamento secondario oppure con sollevamento primario ed irrigazione a gravità. La parte restante provvede all’acqua tramite prelievo per sollevamento diretto dai fiumi Po ed Adda. (Figura 3.18)

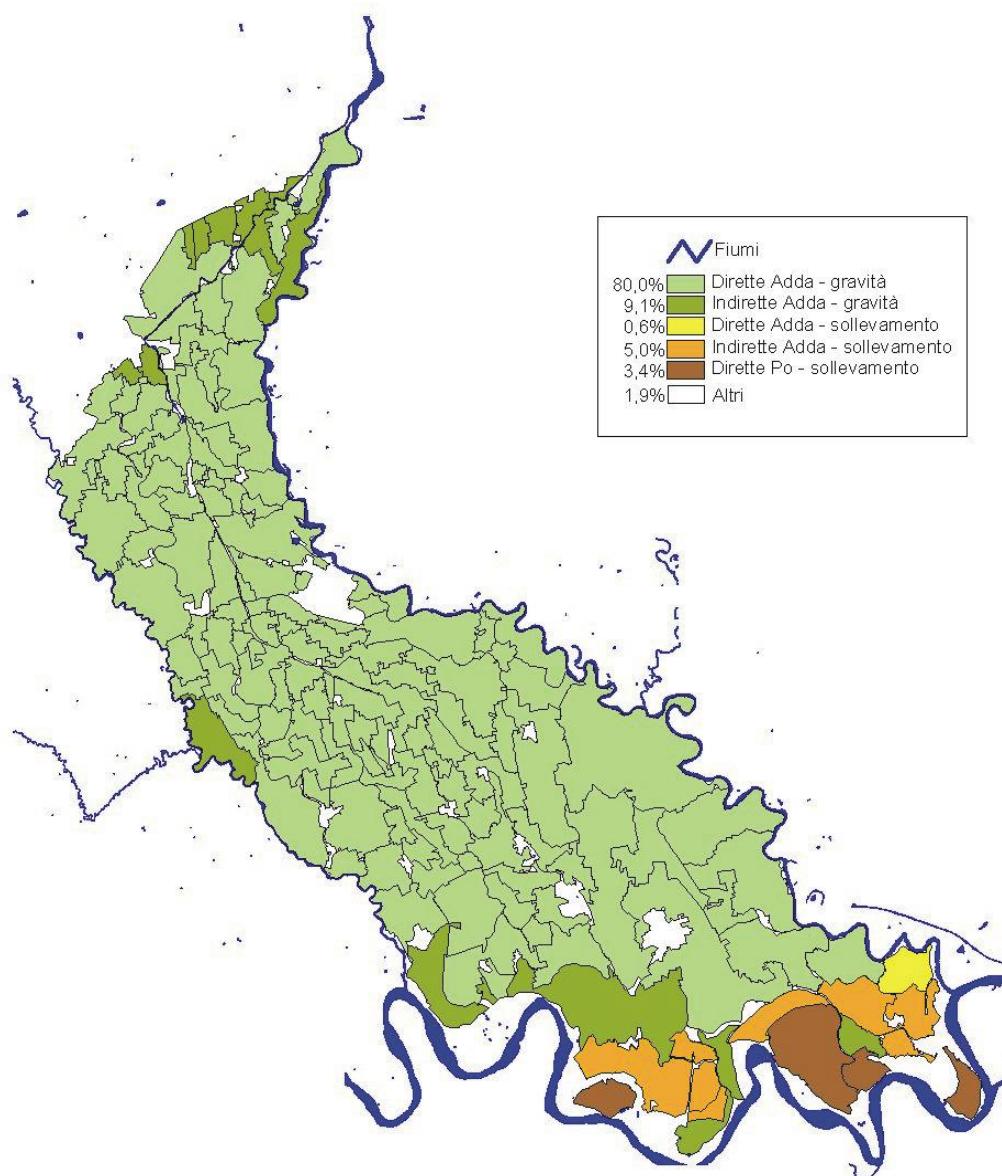


Figura 3.18 Provenienza delle acque irrigue: acque dirette, di recupero e modalità di derivazione primaria, (fonte MBL).

Le tecniche di irrigazione si distinguono in :

- *a scorrimento temporaneo ciclico o turnato*, sistema di gran lunga il più usato appartenente ai classici raccolti estivi (mais, erbai e prati);
- *a scorrimento continuo stagionale*, sistema storico tipico dei raccolti foraggeri “jemali” (i prati marcitori) oggi giorno è limitato;

- *per sommersione prolungata stagionale* che appartiene tradizionalmente alla risicoltura;
- *per aspersione meccanica* che, dopo il sistema a scorrimento è, pur in proporzioni nettamente più contenute, quello più comune;
- altre *tecniche minori*, circoscrivibili a particolari zone di superficie trascurabile.

La tecnica dello scorrimento copre il 92,5% del comprensorio, quella dell’aspersione l’1,5%, la restante parte viene irrigata con sistemi misti.

La tecnica di irrigazione che è stata presa in considerazione nel lavoro di tesi è la tecnica a scorrimento, in quanto risulta essere quella che più rappresenta il sistema irriguo (Figura 3.19)



Figura 3.19 Irrigazione a scorrimento con sollevamento meccanico secondario di un campo di grano turco e di un prato stabile, (fonte MBL)

Per quanto riguarda gli orari e i turni irrigui, questi sono associati alle diverse tecniche di distribuzione. Tra i più comunemente utilizzati nel comprensorio si distinguono:

- *turno ciclico con portata di diritto*, caratteristico del territorio direttamente sotteso dal canale Muzza¹;
- *portata continua di acqua jemale*, che consente una derivazione continua durante l'inverno, in genere connessa al sottendimento dei prati marcitori;
- *portata continua estiva di diritto* che consente una derivazione continua indipendente quindi dalla ruota;
- *portata turnata su prenotazione in diritto di superficie* che viene assegnata all'azienda consorziata in funzione della superficie;
- *portata su prenotazione per orario di utilizzo*, tipico sistema applicato alle irrigazioni con sollevamento primario, che viene assegnata all'azienda consorziata, con portata costante, in funzione del tempo richiesto;
- *portata su prenotazione d'orario ed in diritto di superficie* che rappresenta una combinazione tra i due sistemi precedenti.

Uno degli obiettivi principali del progetto di tesi è stato quello di raccogliere le informazioni riguardanti la turnazione irrigua che vige all'interno del Consorzio Muzza della Bassa Lodigiana, reperendo tutte le documentazioni (per lo più cartacee) a disposizione. Tali informazioni risultano fondamentali per la creazione (in formato digitale) della ruota all'interno dei numerosi bacini irrigui. L'acqua, infatti, che proviene dalle pratiche di irrigazione insieme alle piogge meteoriche determina gli apporti idrici all'interno del Consorzio, variando di conseguenza il contenuto di umidità del suolo.

¹ L'origine del "diritto d'acqua" è antichissima, il metodo è stato tramandato dagli atti di trasferimento dei fondi; la somministrazione avviene concentrando, in un determinato orario ripetitivo, detto ruota, tutta la portata del canale d'utenza. Il turno, di durata variabile in funzione della dotazione aziendale, si ripete in genere ogni 14 giorni.

La modellistica idrologica, accoppiata alle previsioni meteorologiche permette poi di creare un prodotto per la previsione dei contenuti idrici dei suoli e dei fabbisogni utili alla regolazione parsimoniosa dell’acqua per l’irrigazione.

Per ogni singolo campo, appartenente a un’azienda agricola o a un privato cittadino, vi è una turnazione irrigua già predefinita con apposite tabelle, in cui è riportato l’orario di inizio di irrigazione, la durata concessa e i giorni dell’anno in cui è possibile irrigare.

Per spiegare meglio questo concetto della turnazione irrigua, che dura da secoli nei territori della Pianura Padana, riportiamo a titolo di esempio l’inizio, la durata e i giorni in cui all’Azienda Agricola Cascina Nuova nel Comune di Livraga (LO) spetta l’irrigazione del suo terreno (Figura 3.20); terreno in cui è posizionata la stazione eddy-covariance di proprietà del Politecnico di Milano per lo studio e monitoraggio dei flussi di massa e di energia per il calcolo dell’evapotraspirazione e dei bilanci idrici nell’area seminata a mais.

Nella Tabella 3.6 vengono evidenziati i mesi e i giorni in cui compete l’irrigazione al podere “Cascina Nuova”. La durata del turno irriguo è di 14 giorni all’interno del bacino che preleva l’acqua dalla roggia chiamata “Porra Nuova”. Poiché il campo è coltivato a mais, i cui fabbisogni idrici sono maggiori durante il periodo estivo, i principali apporti di irrigazione vengono forniti nei soli mesi di giugno, luglio e agosto (evidenziati in rosso nella Tabella 3.6). A titolo di esempio si riportano i giorni di irrigazione dei campi all’interno del bacino irriguo “Porra Nuova”, la durata e l’ora d’inizio.

Tabella 3.6 Turnazione irrigua nel campo di “Cascina Nuova” nel Comune di Livraga

Proprietà	Podere	Durata	Ora di inizio	Mesi e giorni in cui compete l'irrigazione
Sig. Grecchi Ettore	Cascina Nuova	30 ore	05:00	15 aprile, 30 aprile, 15 maggio, 30 maggio, 14 giugno, 29 giugno, 14 luglio, 29 luglio, 13 agosto, 28 agosto , 12 settembre, 27 settembre

Consorzio Bonifica Muzza Bassa Lodigiana

↓

ROGGIA PORRA NUOVA L'orario ha inizio il 3 di aprile alle ore 04,00 Ruota di giorni 14 per un totale di ore 360 ANNO 2009

PROPRIETA'	PODERE	MESE E GIORNI IN CUI COMPETE L'IRRIGAZIONE													
		DURATA	INIZIO	ORARIO	1-apr	2-apr	3-mag	18-mag	2-giu	17-giu	2-lug	17-lug	1-agosto	16-agosto	31-agosto
FERRARI PIETRO E TERESA		02.30	4.00	3-apr	18-apr	3-mag	18-mag	2-giu	17-giu	2-lug	17-lug	1-agosto	16-agosto	31-agosto	15-set
BOSONI PIERO EREDI	RAMPINA	15.00	6.30	3-apr	18-apr	3-mag	18-mag	2-giu	17-giu	2-lug	17-lug	1-agosto	16-agosto	31-agosto	15-set
SCOTTI UMBERTO	ROSA DEL PROPRIO	06.00	21.30	3-apr	18-apr	3-mag	18-mag	2-giu	17-giu	2-lug	17-lug	1-agosto	16-agosto	31-agosto	15-set
SCOTTI BRUNO	ROSA DEL PROPRIO	02.00	3.30	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
FASOLI GIACOMO	CAMPO LOCATO	00.30	5.30	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
VIRTUANI LUIGI E ANGELO		01.05	6.00	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
GIAPERI MARIO		00.24	7.06	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
GIAPERI PIETRO	CAMPO PERSIA II*	00.45	7.30	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
CATTIVELLI C.	CAMPANZO	00.45	8.15	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
BOSONI PIERO EREDI	RAMPINA	03.30	9.00	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
GIAPERI MARIO	CAMPPI PERSIA/LOCATO	01.00	12.30	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
FASOLI GIACOMO	CAMPO LOCATO	00.30	13.30	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
CHIODA EREDI	CASCINA VECCHIA	20.00	14.00	4-apr	19-apr	4-mag	19-mag	3-giu	18-giu	3-lug	18-lug	2-agosto	17-agosto	1-set	16-set
DEDE' ALBERTO E CARLA	ROSA DEL PROPRIO	22.00	10.00	5-apr	20-apr	5-mag	20-mag	4-giu	19-giu	4-lug	19-lug	3-agosto	18-agosto	2-set	17-set
CATTIVELLI C.	CAMPANZO / PERSIA	07.00	8.00	6-apr	21-apr	6-mag	21-mag	5-giu	20-giu	5-lug	20-lug	4-agosto	19-agosto	3-set	18-set
VALENTI G. CESARE	CAMPANZO	04.00	15.00	6-apr	21-apr	6-mag	21-mag	5-giu	20-giu	5-lug	20-lug	4-agosto	19-agosto	3-set	18-set
IST. MILAN. MARTINIT E STEL	CAMPANZO	16.00	19.00	6-apr	21-apr	6-mag	21-mag	5-giu	20-giu	5-lug	20-lug	4-agosto	19-agosto	3-set	18-set
IST. MILAN. MARTINIT E STEL	RAMPINA	07.00	11.00	7-apr	22-apr	7-mag	22-mag	6-giu	21-giu	6-lug	21-lug	5-agosto	20-agosto	4-set	19-set
IST. MILAN. MARTINIT E STEL	SAN GIOVANNI	09.00	18.00	7-apr	22-apr	7-mag	22-mag	6-giu	21-giu	6-lug	21-lug	5-agosto	20-agosto	4-set	19-set
VALENTI G. CESARE	CAMPANZO	03.00	3.00	8-apr	23-apr	8-mag	23-mag	7-giu	22-giu	7-lug	22-lug	6-agosto	21-agosto	5-set	20-set
IST. MILAN. MARTINIT E STEL	SAN GIOVANNI	03.00	6.00	8-apr	23-apr	8-mag	23-mag	7-giu	22-giu	7-lug	22-lug	6-agosto	21-agosto	5-set	20-set
SCANDELLI FRATELLI	LIVRAGA	05.00	9.00	8-apr	23-apr	8-mag	23-mag	7-giu	22-giu	7-lug	22-lug	6-agosto	21-agosto	5-set	20-set
FONDAZIONE VITTADINI	LIVRAGA	06.00	14.00	8-apr	23-apr	8-mag	23-mag	7-giu	22-giu	7-lug	22-lug	6-agosto	21-agosto	5-set	20-set
FONDAZIONE VITTADINI	CANTONE	06.00	20.00	8-apr	23-apr	8-mag	23-mag	7-giu	22-giu	7-lug	22-lug	6-agosto	21-agosto	5-set	20-set
FONDAZIONE VITTADINI	DOSSINO	08.00	2.00	9-apr	24-apr	9-mag	24-mag	8-giu	23-giu	8-lug	23-lug	7-agosto	22-agosto	6-set	21-set
IST. MILAN. MARTINIT E STEL	LUOGO NUOVO	09.00	10.00	9-apr	24-apr	9-mag	24-mag	8-giu	23-giu	8-lug	23-lug	7-agosto	22-agosto	6-set	21-set
PASSARINI GIULIO	CAMPO DI CASA	01.00	19.00	9-apr	24-apr	9-mag	24-mag	8-giu	23-giu	8-lug	23-lug	7-agosto	22-agosto	6-set	21-set
CHIODA EREDI	CASCINA VECCHIA	52.00	20.00	9-apr	24-apr	9-mag	24-mag	8-giu	23-giu	8-lug	23-lug	7-agosto	22-agosto	6-set	21-set
DEDE' ALBERTO E CARLA	ROSA DEL PROPRIO	20.00	0.00	12-apr	27-apr	12-mag	27-mag	11-giu	26-giu	11-lug	26-lug	10-agosto	25-agosto	9-set	24-set
CHIODA EREDI (SCOTTI)		02.30	20.00	12-apr	27-apr	12-mag	27-mag	11-giu	26-giu	11-lug	26-lug	10-agosto	25-agosto	9-set	24-set
CHIODA EREDI (FERRARI)		00.30	22.30	12-apr	27-apr	12-mag	27-mag	11-giu	26-giu	11-lug	26-lug	10-agosto	25-agosto	9-set	24-set
CHIODA EREDI (SPAGLIARDI)		07.00	23.00	12-apr	27-apr	12-mag	27-mag	11-giu	26-giu	11-lug	26-lug	10-agosto	25-agosto	9-set	24-set
CHIODA EREDI (ROSSI)		05.00	6.00	13-apr	28-apr	13-mag	28-mag	12-giu	27-giu	12-lug	27-lug	11-agosto	26-agosto	10-set	25-set
CHIODA EREDI	CASCINA VECCHIA	32.00	11.00	13-apr	28-apr	13-mag	28-mag	12-giu	27-giu	12-lug	27-lug	11-agosto	26-agosto	10-set	25-set
ROSSI FRATELLI		08.00	19.00	14-apr	29-apr	14-mag	29-mag	13-giu	28-giu	13-lug	28-lug	12-agosto	27-agosto	11-set	26-set
UTENZA ROG. PORRA NUOVA		02.00	3.00	15-apr	30-apr	15-mag	30-mag	14-giu	29-giu	14-lug	29-lug	13-agosto	28-agosto	12-set	27-set
GRECCHI ETTORE	CASCINA NUOVA	30.00	5.00	15-apr	30-apr	15-mag	30-mag	14-giu	29-giu	14-lug	29-lug	13-agosto	28-agosto	12-set	27-set
A.G. PACCHIARINI DANIELA	RONCHI	04.00	11.00	16-apr	1-mag	16-mag	31-mag	15-giu	30-giu	15-lug	30-lug	14-agosto	29-agosto	13-set	28-set
SPAGLIARDI GIANBATTISTA		09.00	15.00	15-apr	1-mag	16-mag	31-mag	15-giu	30-giu	15-lug	30-lug	14-agosto	29-agosto	13-set	28-set
Az. Ag. SARCHIO s.s.	CA' DEL PARTO	08.00	0.00	17-apr	2-mag	17-mag	1-lug	16-giu	1-lug	16-lug	31-lug	15-agosto	30-agosto	14-set	29-set
DEDE' ALBERTO E CARLA	ROSA DEL PROPRIO	20.00	8.00	17-apr	2-mag	17-mag	1-lug	16-giu	1-lug	16-lug	31-lug	15-agosto	30-agosto	14-set	29-set
SOMMARIO HH.MM.		360,00													

Figura 3.20 Ruota irrigua all'interno del bacino “Porra Nuova”. Si noti la durata della ruota di 14 giorni, la suddivisione all'interno dei singoli campi (poderi), (fonte MBL)

3.3 DATI METEO – IDROLOGICI OSSERVATI

Il periodo complessivo di simulazione idrologica è compreso tra l’1 Gennaio 2003 e il 31 Dicembre 2010; le forzanti atmosferiche considerate in questi otto anni sono state le precipitazioni e le temperature, acquisite dalla rete ARPA-Lombardia.

Nella Tabella 3.7 si riporta un elenco delle stazioni utilizzate: sia quelle che ricadono all’interno del Consorzio di Bonifica della Muzza Bassa Lodigiana e sia quelle nelle vicinanze, usate per una migliore interpolazione (Figura 3.21).

Tabella 3.7. Stazione pluviometriche e termometriche

stazione	codice stazione	X (longitudine)	Y (latitudine)	Z (altitudine)
Cavenago_d_Adda	2336	1544093	5013099	67
Capralba	2395	1550510	5032590	96
Rivolta_d_Adda	2502	1540748	5032437	102
Filago_via_Don_Milani	5856	1543370	5053540	190
Osio_Sotto	5858	1547702	5052177	182
Tavazzano_Enel_suolo	5887	1532447	5019546	80
Cassano_d_Adda_AEM_suolo	5892	1539615	5039648	133
Trezzo_d_Adda	5918	1539500	5051750	187
Crema_via_Camporelle	8188	1552618	5022800	103
Lodi_Ponte_Adda_SP23	8193	1540154	5018122	64
Codogno (solo pluviometro)	8221	1556680	5001213	68
Casalbuttano	9120	1575627	5011856	56
Cremona_libertà	9325	1581200	4998750	61
Crema_febbraio	9329	1555155	5023905	79
Milano_Lambrate	2006	1520147	5038191	120
San_Colombano_al_Lambro	2046	1538227	5003859	80
Rodano	5916	1527660	5035575	114
Agrate	5894	1527597	5047039	162
Landriano	2195	1520741	5018638	88
San_Angelo_Lodigiano	2129	1529815	5011998	60

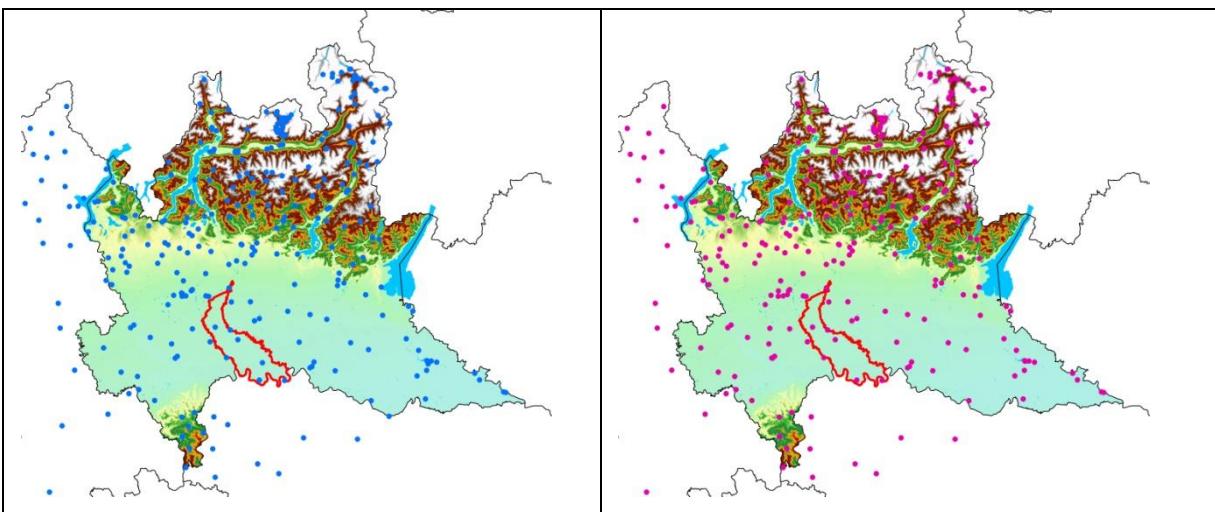


Figura 3.21 Stazioni pluviometriche e termometriche (fonte ARPA Lombardia).

Per ulteriori dettagli il lettore può far riferimento all'Appendice C.

3.3.1 La stazione di Livraga (LO)

La stazione *eddy-covariance* è stata collocata nel maggio del 2010 in un campo coltivato a mais, sito nel Comune di Livraga (Lodi). In Figura 3.22 si riporta un'immagine da satellite del campo, in rosso è illustrata la posizione della stazione.

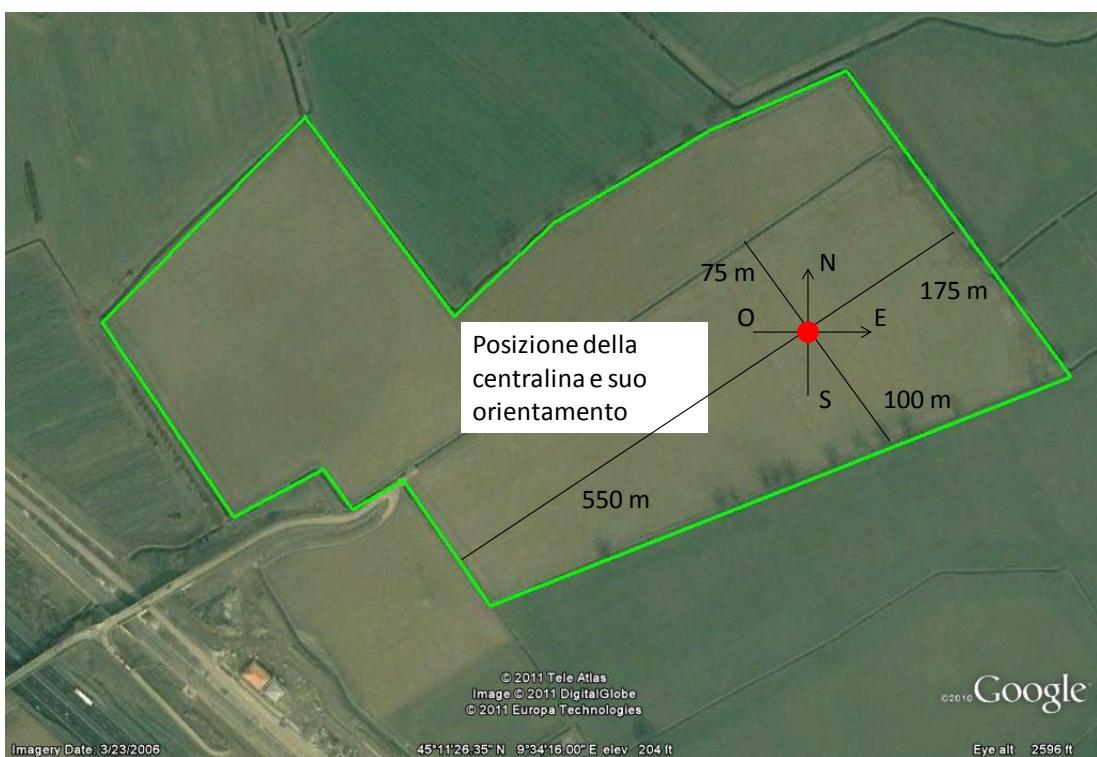


Figura 3.22 Posizione della stazione micro-meteorologica eddy-covariance di Livraga (LO) le cui coordinate geografiche sono: latitudine 45.11 Nord, longitudine 9.34 Est, altitudine 60 m s.l.m. La dimensione del campo è di circa 500 m x 300 m.

Il compito principale della stazione è la misura dei flussi evapotraspirativi su superfici vegetate attraverso l’ausilio di sensori dedicati in grado di misurare tutte le variabili caratteristiche dell’atmosfera e del suolo alle varie profondità. La presenza, sulla stazione, di strumenti altamente sofisticati consente un più accurato studio della chiusura del bilancio di massa e di energia, anche nell’ottica di una gestione più sostenibile della risorsa idrica. I sensori d’aria presenti sulla stazione sono il gas analyser, l’anemometro sonico tridimensionale, il radiometro, il termoigrometro, la PAR e l’IRTS. Nel terreno sono collocate 3 sonde di umidità a 60, 35,10 cm, 1 misuratore di flusso nel terreno (heat flux plate) e 2 termocoppie.

Le tre sonde di umidità Campbell (Figura 3.23) installate alle diverse profondità misurano l’umidità del suolo tramite la tecnica *TDR - Time Domain Reflectivity* [μsec].



Figura 3.23 Sonde Cambell per la misura dell’umidità del suolo

Le tre sonde forniscono dei valori di risposta all’impulso in microsecondi.

La Tabella 3.8 riporta i coefficienti derivati dal “Campbell Scientific soils laboratory” per una conduttività elettrica a saturazione pari a 0.5 dS m^{-1} e una densità apparente pari a 1.55 g/cm^3 :

Tabella 3.8 Coefficienti utilizzati per la conversione delle misure di umidità, osservate tramite le sonde Campbell

$C_0 = -0.0663$	$C_1 = -0.0063$	$C_2 = 0.0007$
-----------------	-----------------	----------------

L’equazione quadratica (3.2) utilizzata per la conversione delle misure di umidità osservate sul campo Cascina Nuova a Livraga (LO) è basata su una calibrazione standard dei coefficienti riportati nella Tabella 3.8:

$$\theta = -0.0663 - 0.0063 \cdot t + 0.0007 \cdot t^2 \quad (3.2)$$

dove θ è il contenuto volumetrico di acqua e t è il periodo, in microsecondi, rilevato dalle sonde di umidità.

E’ stato quindi possibile elaborare i dati provenienti dalla stazione eddy-covariance per il periodo che va dall’8 giugno 2010 al 26 luglio 2010, periodo in cui si ha il 100% di irrigazione. In particolare è stato analizzato l’andamento del soil moisture

osservato dalle tre sonde di umidità collocate nel terreno e della soggiacenza della falda, misurata con freatimetro (Figura 3.24).

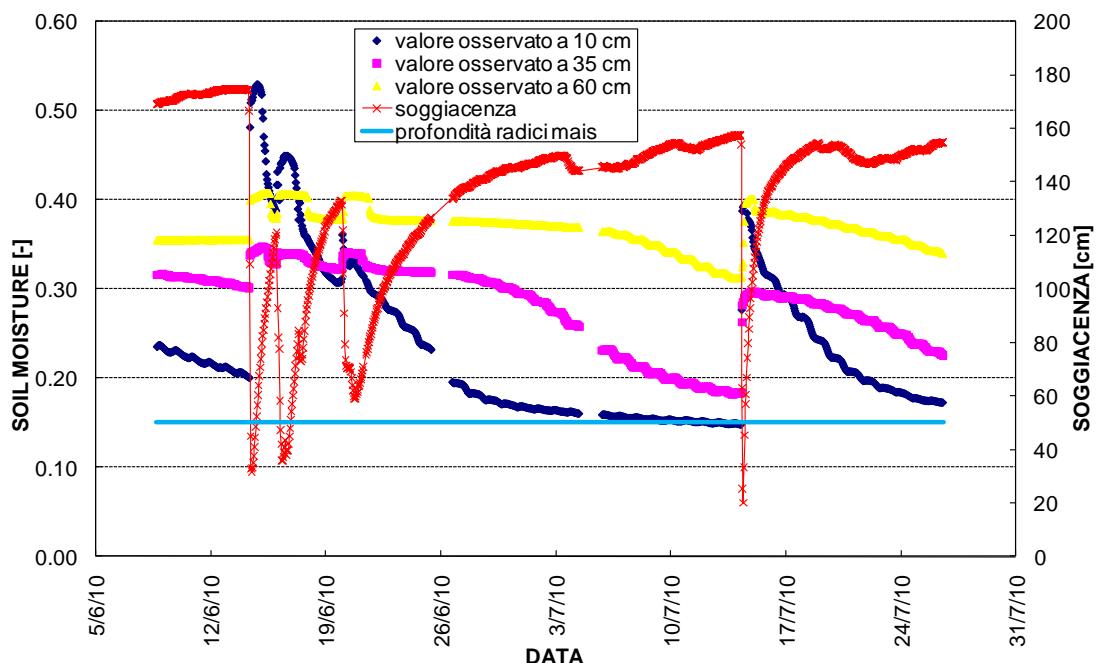


Figura 3.24 Confronto tra gli andamenti del valore di soil moisture rilevato dalle sonde Campbell a 10, 35, 60 cm di profondità, con l'andamento del valore di soggiacenza della falda misurata tramite freatimetro e con la profondità delle radici di mais

In Figura 3.24 si nota come nei periodi in cui si ha un apporto idrico, dato dall’irrigazione o dalle precipitazioni, il tasso di umidità cresca e di conseguenza la soggiacenza della falda diminuisca. Infatti nei periodi in cui la falda si avvicina al piano campagna, le radici di mais poste a una profondità di 50 cm (rappresentate dalla linea azzurra in Figura 3.24) riescono a beneficiare del contributo d’acqua dovuto all’irrigazione.

3.4 DATI METEO PREVISTI

Per i dati di previsione meteorologica è stato utilizzato il modello probabilistico non-idrostatico WRF. Tale modello ha una risoluzione spaziale di 17 km, una risoluzione temporale di 12 ore. Gli output elaborati si riferiscono ai campi di temperatura e precipitazione per 20 ensemble di previsione, i quali a loro volta diventano una forzante di input nel modello idrologico, permettendo di elaborare una previsione di probabilità del contenuto idrico del suolo. Il periodo di analisi è stato dal 4 aprile 2007 al 6 maggio 2007. Il range di previsione è di 30 giorni. Per ulteriori dettagli sul modello si veda l'appendice B.

CAPITOLO 4

LA MODELLAZIONE

DEL SISTEMA

“IRRIGUO”

In questo capitolo verranno descritti i passi necessari alla costruzione dei comizi che si trovano all'interno di ogni bacino irriguo e le modalità usate per informatizzare il sistema di distribuzione dell'acqua irrigua al singolo campo. Le schematizzazioni adottate saranno utili per ottenere i valori delle condizioni di umidità del suolo calcolate dal modello idrologico FEST-EWB.

4.1 SCHEMATIZZAZIONE DEL SISTEMA DI “COMIZI”

All'interno del Consorzio della Muzza Bassa Lodigiana sono stati codificati 147 bacini irrigui (Tabella 4.1) che a loro volta vengono suddivisi in tanti comizi a seconda della turnazione irrigua al loro interno.

Uno dei lavori più complessi all'interno del progetto di tesi è stato quello di digitalizzare le informazioni presenti su materiale cartaceo, reperite presso il Consorzio della Muzza di Lodi. Ad oggi, infatti, non esistono informazioni digitali di dettaglio che ricostruiscono i confini dei diversi comizi e dei singoli appezzamenti di terreno, ma

l'unica informazione digitale disponibile è la mappa dei bacini irrigui illustrata nella Figura 4.1.

Pertanto il primo passo è stato quello di ricavare i valori di turnazione irrigua per ogni bacino irriguo; tali valori sono stati ricostruiti tramite i dati cartacei, forniti dal Consorzio Muzza Bassa Lodigiana, riguardanti i turni delle singole rogge che bagnano i diversi bacini irrigui. Ad ogni roggia è associato un bacino irriguo omonimo, per cui conoscendo la turnazione irrigua delle rogge si è ricavato il valore di turnazione per i corrispondenti bacini irrigui. Alcuni bacini irrigui, però, non seguono questa regola in quanto fanno riferimento a più rogge; per cui il valore della ruota irrigua è stato ottenuto tramite una media dei valori di turnazione delle rogge che ricadono nel bacino irriguo considerato. E' stato così possibile ricostruire la ruota irrigua riportata in Tabella 4.1. Per alcuni bacini non è stato possibile assegnare un valore di turnazione irrigua, in quanto l'irrigazione non avviene per gravità, come per la maggior parte del territorio, ma con altre tecniche (sollevamento, acqua di recupero, fontanili, ecc.).

Tabella 4.1 Ricostruzione della ruota irrigua per ogni bacino appartenente al Consorzio della Muzza Bassa Lodigiana.

CODICE BACINO IRRIGUO	NOME BACINO IRRIGUO	RICOSTRUZIONE RUOTA
BI001	COPPA INCASSATA	13
BI002	CORNELIANA BERTARIA	7
BI003	CATTANEO SETTALA	13
BI005	CATTANEO COMAZZO	12
BI006	QUARTERA	13
BI007	CARCASSOLA	13
BI008	ZELA OSPITALA	13
BI009	FASOLA	12
BI010	CRIVELLETTA	7
BI011	BESANA LUSERANA	13
BI012	BOCCONA	12
BI013	LANZANA	12
BI014	VIROLA	11
BI015	MULAZZANA	8
BI016	PAGANA	14
BI017	ISOLA BALBA	14
BI018	CAMOLA VECCHIA	13
BI019	BOLENZANA	14
BI020	GUAZZONA	12
BI021	GERINA ADDETTA	12

BI022	MUZZETTA	8
BI023	CASOLTA	13
BI024	MONTANASA	14
BI025	MUZZINO S.BASSANO	14
BI026	S.MARCO VIRTUANA	14
BI027	BOLLETTA OSPITALA 1	15
BI028	MUZZINO S.PIETRO	15
BI029	MARCONA DENTINA 1	14
BI030	DENTINA ORTOLANA	14
BI031	CAMPOLUNGA	14
BI032	CORNEGLIANA	14
BI033	QUARESIMINA	14
BI034	S.SIMONE E GIUDA	14
BI035	PADERNA CESARINA	14
BI036	PADERNA SOMAGLIA	14
BI037	MALGUZZANA	13
BI038	MASSALENGA	14
BI039	PRIORA	7
BI040	OSSAGA	14
BI041	CAVALLONA 1	14
BI042	POPOLA CORSA GUARNERA	15
BI043	TRIULZA	15
BI044	FRATA VILLANOVA	14
BI045	VITALONA	14
BI046	FRATA VILLANOVA	14
BI047	BARBAVARA	13
BI048	COMUNA	13
BI049	FILIPPESSA	15
BI050	PORRA NUOVA	15
BI051	POPOLA POZZA BRUSED A 1	10
BI052	BARNA BONONA	15
BI053	BALZARINA	14
BI054	CAMOLA NUOVA	14
BI055	MUZZINO S.BASSANO	14
BI056	PANDINA	15
BI057	BOLLETTA OSPITALA 2	14
BI058	TIBERA DEI CANI 1	14
BI059	TIBERA DEI CANI 2	15
BI060	PADERNA SOMAGLIA IS. 2	14
BI061	CAVALLONA 2	28
BI062	POPOLA POZZA BRUSED A 2	10
BI062	VIGANONA	11
BI063	BELTRAMA S.OMARA	14
BI064	MONGIARDINA VILLANOVA	13
BI065	FRATA VILLANOVA	14
BI066	POPOLA CORSA GUARNERA	14
BI067	CAVALLERA CRIVELLA 1	16
BI068	POVERA VISTARINA 1	17

BI069	VISTARINA CADAMOSTA	16
BI070	CAVALLERA CRIVELLA 2	11
BI071	BARNA BONONA	15
BI072	POVERA VISTARINA 2	9
BI073	TURANA	16
BI074	CAVALLERA CRIVELLA 3	7
BI075	CAVALLERA CRIVELLA 4	16
BI076	POVERA VISTARINA	14
BI077	VISTARINA CADAMOSTA	22
BI078	FILIPPESSA	9
BI079	VISTARINA CADAMOSTA	16
BI080	FRATA OSPEDALETTA	15
BI081	PADERNA SOMAGLIA ISIMBALDA	14
BI082	GRANATA	14
BI083	PORRA NUOVA	15
BI084	COTTA BAGGIA	21
BI085	COTTA BAGGIA	11
BI086	TRECCO	18
BI087	COTTA BAGGIA	11
BI088	REGINA CODOGNA	16
BI089	POPOLA POZZA BRUSEDÀ	18
BI090	GRANATA	15
BI091	MARCONA DENTINA	14
BI092	REGINA CODOGNA	13
BI093	ACQUE DI RECUPERO	/
BI094	REGINA CODOGNA	15
BI095	CAVALLERA CRIVELLA	16
BI096	BERTONICA	7
BI097	DRESANA BONDIOLA	12
BI098	LECCAMA MAIOCCHA	9
BI099	BORRA	12
BI101	MACCASTORNA	/
BI102	BONDIOPCA	/
BI103	S.ANTONIO-ALTOPIANO	/
BI104	RESMINA	/
BI105	CASELLE LANDI	/
BI106	MEZZANO VECCHIO	/
BI107	MEZZANONE	/
BI108	S.ROCCO-GUARDAMIGLIO	/
BI109	MEZZANA CASATI	/
BI110	BALLOTTINO	/
BI111	ISOLONE	/
BI112	IMPIANTO CANCELLIERA	/
BI200	SANDONA	14
BI201	CASSINETTA CAMPAGNA	14
BI202	BARGANA FILIPPINA	14
BI203	CAREGGIA	14
BI204	ROGGIA DONNA	/

BI205	POPOLA CORSA GUARNERA	15
BI206	OSSAGA	15
BI207	ROGGIA RUBINA	/
BI208	ROGGIA CAREGGIA	15
BI209	MOLGORA	4
BI210	TIBERA DEI CANI	15
BI211	TRIBIANA	12
BI212	CALCHERA - GHIRINGHELLA	12
BI213	ACQUE DI RECUPERO	/
BI214	VESCA	28
BI215	RIGOLETTINO	14
BI216	DOSSA	14
BI217	DOSSA	14
BI218	MARCONA DENTINA	14
BI219	RIGOLETTA MONTANASA	/
BI220	SANDONA	14
BI221	GAVAZZA	14
BI222	MARCONA DENTINA	14
BI223	FONTANILE LISCATE	/
BI224	FONTANILE CASTELLAZZO	/
BI225	MOLGORA	13
BI226	BRIVIA	7
BI227	FONTANILE TRUCCAZZANO	/
BI228	ACQUE MISTE	/
BI229	ACQUE DI RECUPERO	/
BI230	ACQUE DI RECUPERO	/
BI231	GUARDALOBBINO	/
BI232	ACQUE DI RECUPERO	/
BI233	MEZZANA CASATI	/
BI234	ACQUE DI RECUPERO	/
BI235	ACQUE DI RECUPERO	/

4.2 LA DIGITALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI IRRIGAZIONE

Dopo aver schematizzato la ruota irrigua per ogni bacino irriguo, si è passati a ricostruire le aree che rappresentassero i 1722 comizi presenti all'interno del Consorzio Muzza. Per ottenere questa elaborazione si sono considerate le informazioni riguardanti i turni delle singole rogge che bagnano i diversi bacini irrigui (riportati in Tabella 4.1) e successivamente si sono ritagliati, tramite alcuni *tools* di ArcGis, tanti poligoni di Thiessen quanti sono i giorni corrispondenti ai turni di irrigazione all'interno di un

singolo bacino. In Figura 4.1 si riportano i diversi poligoni (di Thyssen) che delimitano i comizi all’interno dei 147 bacini irrigui.

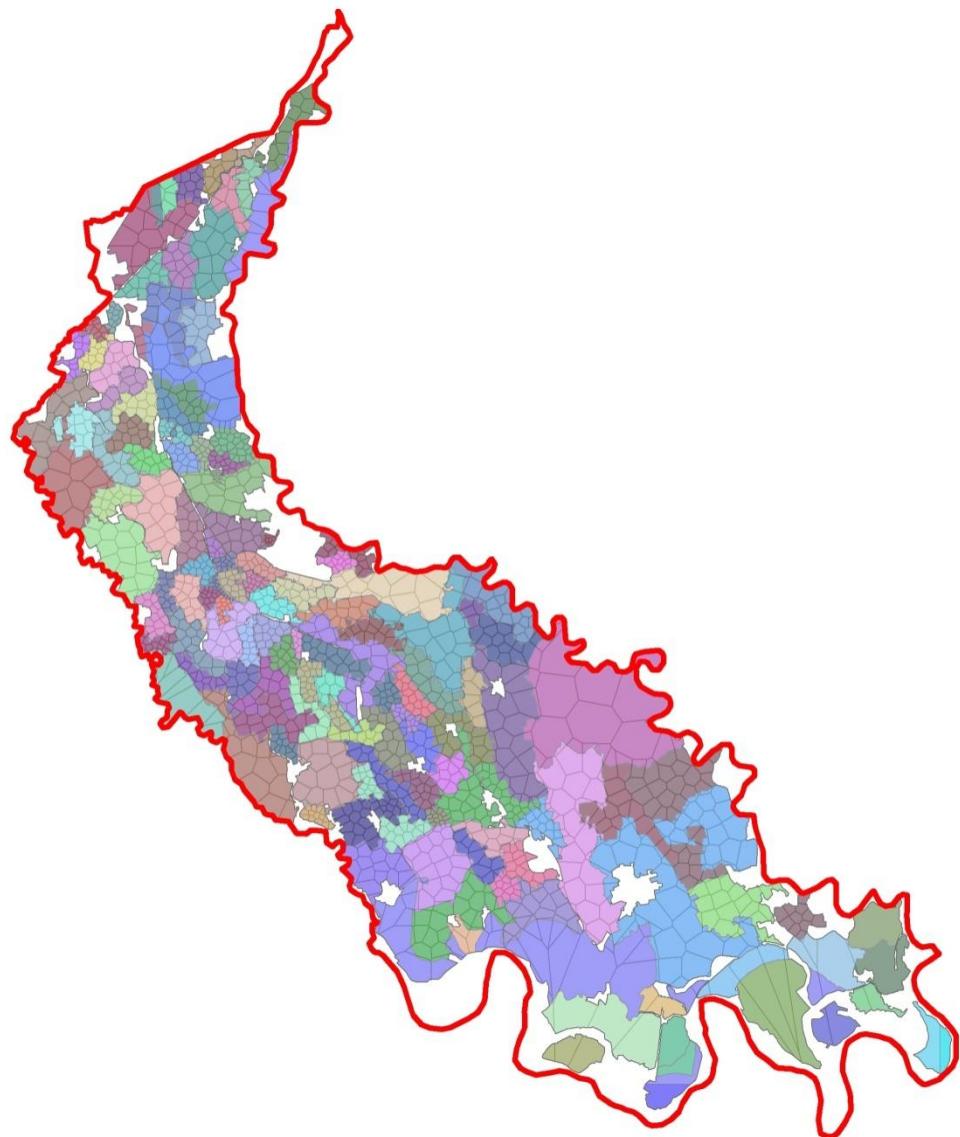


Figura 4.1 Bacini irrigui suddivisi in comizi.

In particolare il metodo seguito è stato il seguente: si sono prima disposti su ArcGis tanti punti quanti sono i giorni di turnazione all’interno del bacino irriguo (calcolati precedentemente, vedi paragrafo 4.1) e successivamente si è suddiviso il bacino in comizi di ugual numero.

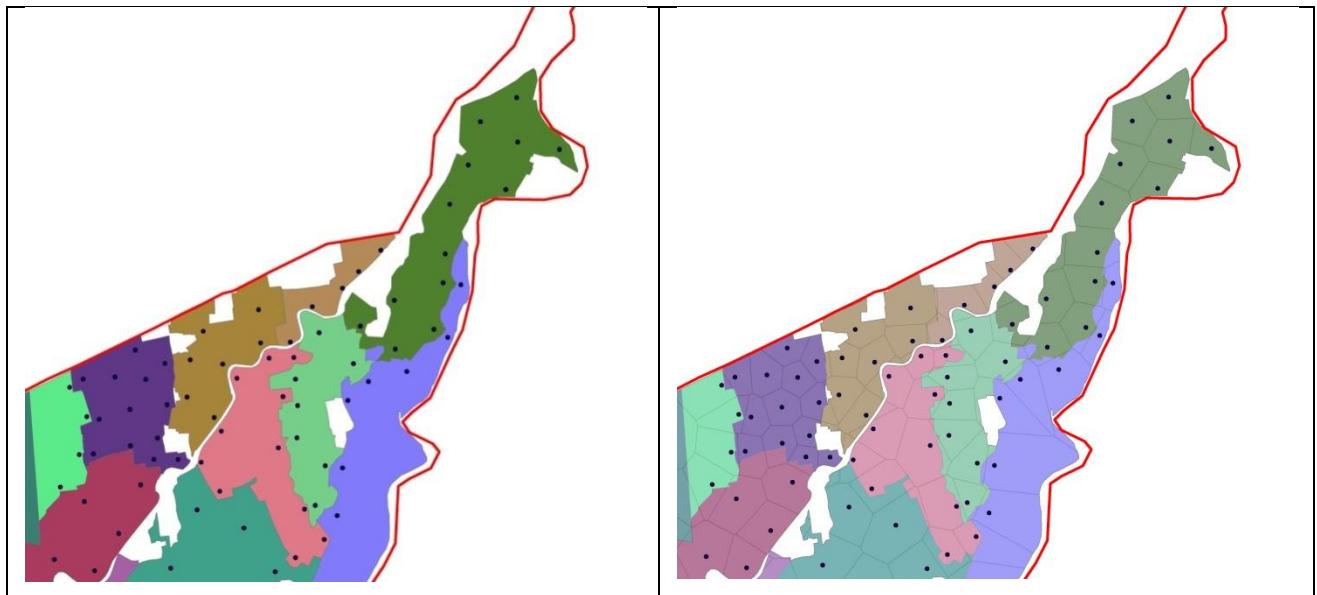


Figura 4.2. Disposizione dei punti all'interno dei bacini irrigui (sinistra) e successiva suddivisione in comizi con poligoni di Thiessen (destra).

La Figura 4.2 mostra un esempio nella parte più settentrionale del Consorzio Muzza: i colori indicano i diversi bacini irrigui, suddivisi in diversi comizi, rappresentati dai poligoni di Thiessen. Considerando il bacino irriguo più settentrionale denominato “Coppa Incassata” (di colore verde scuro), sono stati prima raccolti tramite registri cartacei i dati necessari per ricostruire la turnazione irrigua che è risultata essere di 13 giorni e successivamente sono stati disposti i 13 punti per ritagliare i 13 poligoni.

Su ArcGis, tramite ArcCatalog, si sono dislocati tali punti all'interno del bacino tanti quanti sono i giorni di turnazione, successivamente si è attivata una funzione di ArcToolBox che permette la suddivisione in egual numeri di poligoni (aree) di Thiessen che corrispondono ai comizi in questione; la dislocazione dei punti non è stata del tutto casuale, ma si è tenuto conto di ottenere poligoni con aree simili.

Come si può notare dalla Figura 4.2, i confini dei comizi non seguono perfettamente i confini dei bacini irrigui, tuttavia l'errore commesso risulta trascurabile ai fini della simulazione per il calcolo delle condizioni di umidità del suolo.

Ad ogni comizio è stato poi assegnato un codice identificativo che consente al modello idrologico FEST-EWB di assegnare a quella parte di territorio una determinata quantità di acqua come fonte di irrigazione.

L’ultimo passaggio chiave è stato quello di digitalizzare la ruota irrigua in modo che il modello idrologico fosse in grado di leggere i valori acquisiti. Laddove la ruota fosse di 13 giorni, come nel caso del bacino “Coppa Incassata”, citato precedentemente nell’esempio, l’acqua viene ridistribuita al comizio numero 1 nel primo giorno, al comizio numero 2 nel secondo giorno, al comizio numero 3 nel terzo giorno e così via, fino ad arrivare al giorno 13 in cui viene irrigato il tredicesimo comizio; al quattordicesimo giorno si riprende poi a “ri-bagnare” il comizio numero 1. Viene così creata la ruota (o turnazione) irrigua (in formato digitale) del Consorzio Muzza Bassa Bassa Lodigiana.

Per quanto riguarda l’ordine in cui vengono irrigati i comizi si è tenuto conto di procedere prevalentemente da Nord verso Sud, seguendo il percorso del derivatore di riferimento all’interno del bacino.

Questo concetto è mostrato nelle mappe di irrigazione relative al bacino irriguo “Coppa Incassata” (di colore viola scuro in Figura 4.3) che presenta una ruota irrigua di 13 giorni (vedi Tabella 4.1). Infatti secondo il procedimento sopra spiegato, il quattordicesimo giorno (ultima immagine di Figura 4.3) si rincomincia la turnazione irrigua e quindi il comizio che viene irrigato è lo stesso del primo giorno (Figura 4.3a).

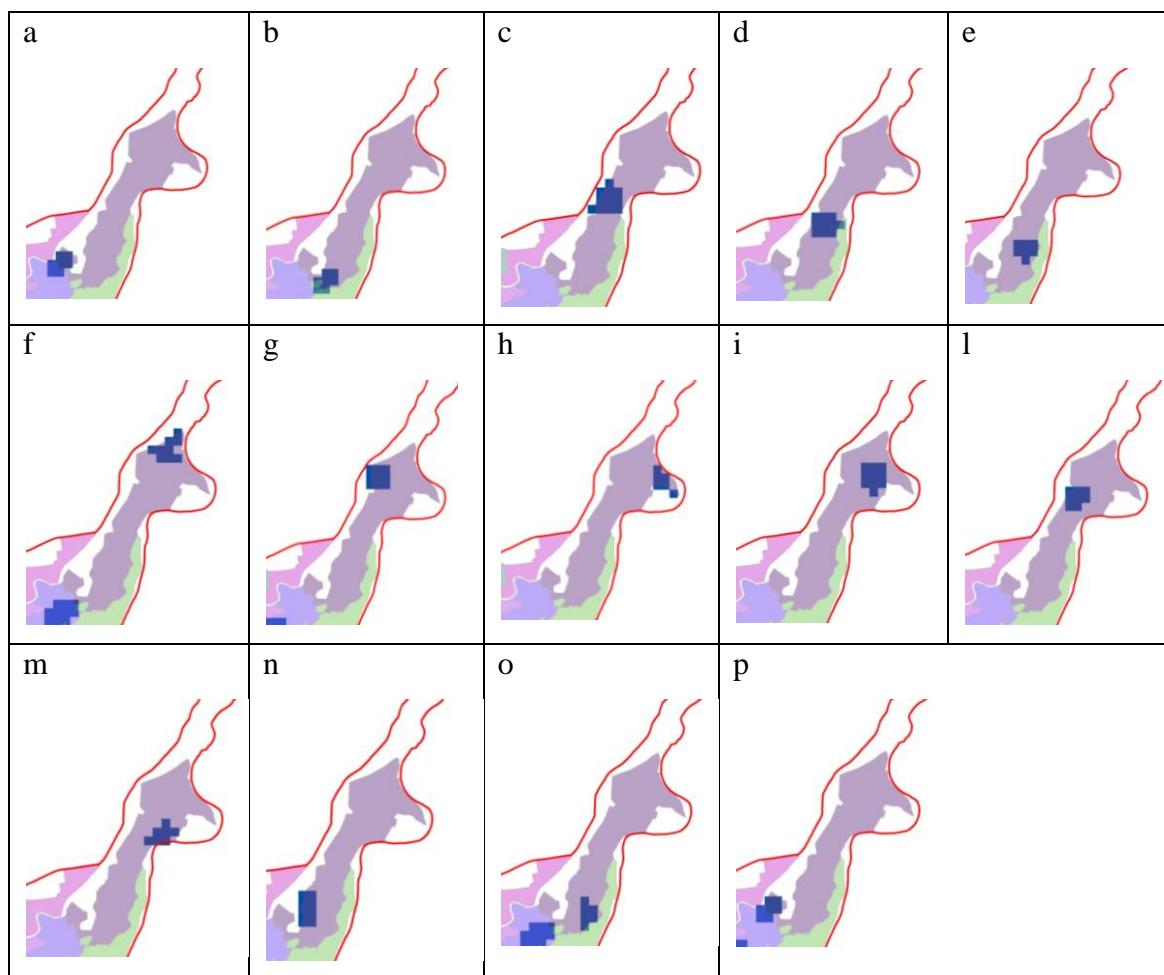


Figura 4.3 Turnazione irrigua del bacino irriguo “Coppa Incassata” situato nella parte settentrionale del comprensorio irriguo, gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana

4.3 SOGLIE DI RIFERIMENTO: θ_{RESIDUO} E $\theta_{\text{SATURAZIONE}}$

Uno degli obiettivi di questo studio è quello di effettuare una simulazione durante il periodo 2003-2010, avendo a disposizione sia i dati meteorologici registrati dalle stazioni meteo-climatiche selezionate, sia i dati di irrigazione durante i diversi anni, cercando di ricostruire attraverso il modello idrologico FEST-EWB i valori di umidità del suolo con soglie di riferimento (θ_{residuo} e $\theta_{\text{saturazione}}$) che consentono di valutare lo stato di salute del terreno e quindi della coltivazione (Figura 4.4).

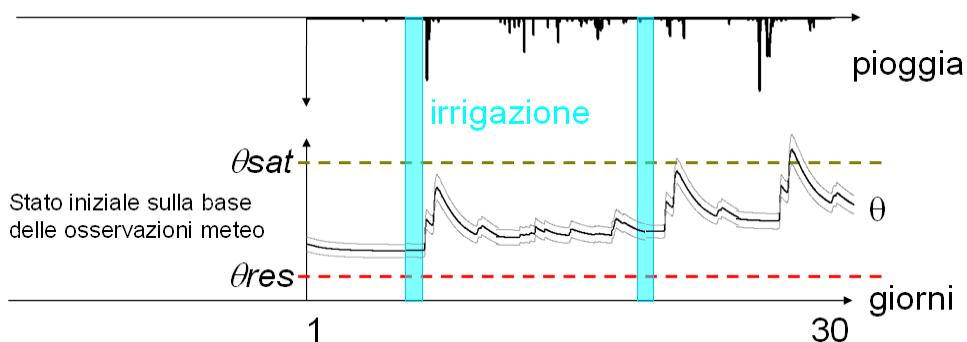


Figura 4.4 Esempi di valori del contenuto d’acqua in base alle precipitazioni (previste e/o osservate) e dei turni irrigui

La scala di dettaglio scelta è quella di comizio: vengono forniti, infatti, valori di umidità del suolo minimi e massimi all’interno dei singoli comizi, assegnando poi un valore minimo e massimo assoluto su tutto il bacino irriguo.

Nell’ottica di inserimento delle previsioni provenienti dal modello meteorologico (ad ensemble), accoppiate alla modellistica di bilancio idrologico, si è cercato di avere una previsione probabilistica sul futuro stato di umidità del suolo in base alla litologia esistente. Poiché le turnazioni irrigue possono essere paragonabili a piogge fittizie che rimangono fisse nel tempo, il singolo agricoltore potrà conoscere in anticipo la previsione delle condizioni di umidità del terreno, gestendo in maniera più parsimoniosa la quantità di acqua, sulla base dell’informazione idro-meteorologica, valutando la possibilità di irrigare il suo terreno oppure di saltare il turno, nell’ipotesi che il Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana voglia modificare la ruota irrigua, valutando in sede decisionale quali bacini necessitino maggiormente di essere irrigati. Inoltre conoscendo il tempo di trasferimento dell’acqua al campo calcolato tramite il modello idraulico (vedi Appendice D), è possibile creare una stima di un tempo di autonomia per ogni singolo terreno definito come la somma del $\theta_{residuo}$ del campo e del tempo di trasferimento dell’acqua che arriva al campo. I “tempi di autonomia” sono variabili in un range compreso tra un valore minimo e massimo a scala di bacino irriguo.

Come detto precedentemente, non si è scesi alla scala di comizio e/o di singolo campo, in quanto dividendo il bacino irriguo in modo “geometrico”, il singolo campo nella

realtà non corrisponde con quello del modello idrologico, diviso a celle di 200 m x 200 m. Solo nel campo dove ricade la stazione micro-meteorologica di Livraga si hanno informazioni più dettagliate, e quindi è stato possibile confrontare i dati realmente misurati dalla stazione con quelli simulati dal modello idrologico FEST-EWB.

4.4 LE GRANDEZZE DI MONITORAGGIO: VOLUMI IRRIGUI E TEMPI DI AUTONOMIA

I valori e i tempi di irrigazione inseriti nella matrice di input del modello idrologico FEST-EWB seguono regole ben predefinite. Infatti, il periodo in cui può avvenire l’irrigazione dura circa cinque mesi, in particolare la data di inizio è fissata nella prima settimana di aprile di ogni anno, mentre il termine è il 30 settembre, come riportato in Figura 4.5 e in Figura 4.6, in cui si evidenziano i periodi di concessione delle portate massime prelevabili dal fiume Adda tramite il Canale Muzza nei diversi mesi dell’anno.

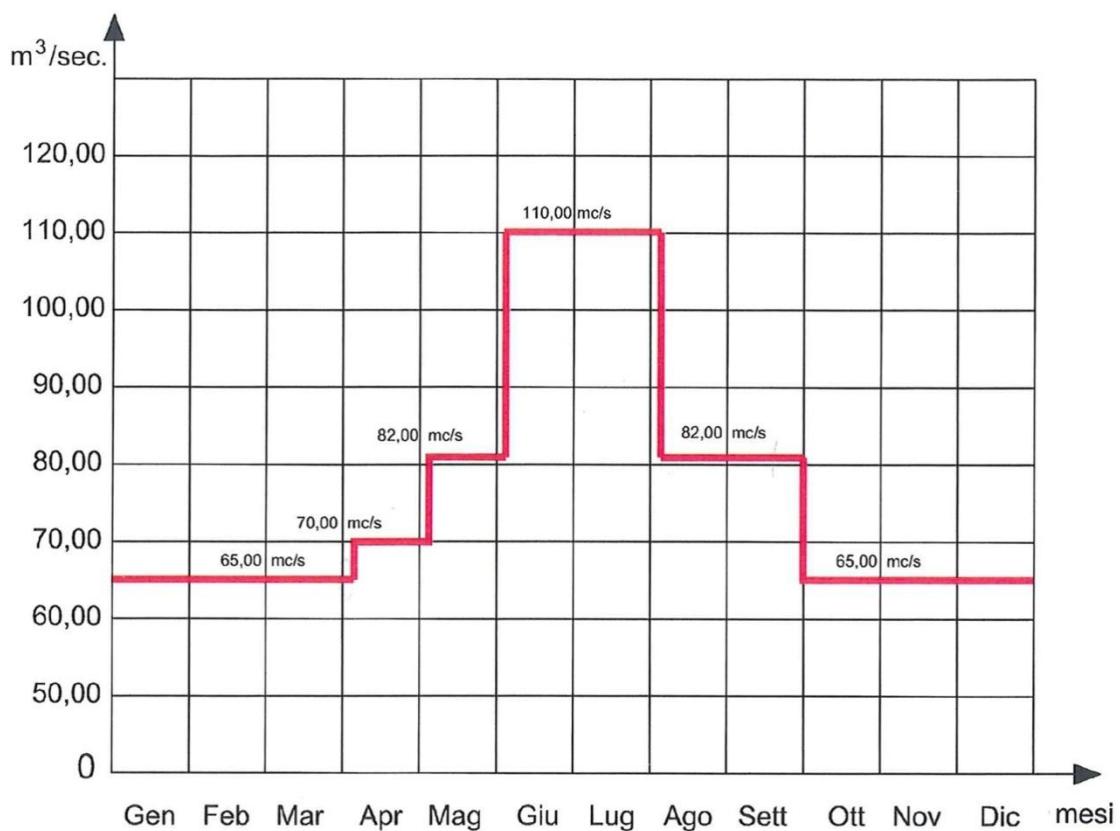


Figura 4.5 Diagrammazione delle portate massime prelevabili nei diversi periodi dell'anno dal fiume Adda tramite il Canale Muzza



Figura 4.6 Valori teorici (in blu) e valori reali (in rosso) come media giornaliera nel decennio 2001-2010 delle portate di concessione del Canale Muzza.

Tuttavia nel corso della stagione vegetativa non si ha la possibilità di avere sempre il 100% di acqua disponibile dal Canale Muzza verso i vari canali derivatori, ma come si nota in Figura 4.5 e in Figura 4.6 si ottiene circa il 65% nel mese di aprile, il 75% nei mesi di maggio, agosto e settembre, e solamente a giugno e luglio si ha a disposizione il 100%.² Questo dato è però soggetto alle condizioni meteo-idrologiche della stagione: nel periodo estivo degli anni più secchi (2003, 2005, 2006), si aveva una riduzione della portata concessa, a causa della scarsità idrica e della siccità che colpì la Lombardia; si arrivò così a una situazione definita di “contabilità” che corrisponde a una riduzione di portata (e quindi) di acqua disponibile per l’irrigazione dei campi (si veda paragrafo 2.1).

² È noto che i campi di mais non vengono irrigati nei mesi di aprile e settembre. Ciò nonostante non avendo informazioni precise sul tipo di colture, presenti nel comprensorio irriguo, e sulla loro spazializzazione, si è attenuti ai dati teorici forniti dal Consorzio MBL

Per quanto riguarda poi la quantità d'acqua che viene normalmente somministrata al campo durante le irrigazioni e il tempo necessario per irrigare il terreno, si è considerato una durata media di irrigazione pari a 24 ore per comizio. La quantità di acqua che viene solitamente somministrata è pari a una precipitazione di circa 40-50 mm. Di conseguenza si è deciso di attribuire un valore di 48 mm (ossia 2 mm ogni ora) nel periodo giugno e luglio, quando si è al 100% di disponibilità idrica, mentre un valore di 36 mm (pari a 1.5 mm/h) nel periodo maggio, agosto e settembre e di 31 mm (ossia 1.3 mm/h) per il mese di aprile.

CAPITOLO 5

RISULTATI E

DISCUSSIONI

Nel corso del seguente capitolo verranno proposti e discussi i risultati ottenuti a seguito delle elaborazioni svolte durante questo lavoro di tesi.

Grazie ai dati di umidità osservati, relativi al periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010 forniti dai sensori TDR posti nel podere Cascina Nuova a Livraga (LO), è stato possibile effettuare una calibrazione del modello idrologico FEST-EWB sulla sola cella elementare di grandezza finita corrispondente al campo considerato.

Sono stati analizzati gli andamenti dell'umidità del suolo ottenuti dalle simulazioni effettuate tramite il modello idrologico per gli anni 2009 e 2010 con e senza il contributo idrico. I risultati delle due simulazioni sono stati confrontati con il valore di soil moisture per cui la pianta non muore, ma si trova in stress idrico e quindi inizia a produrre meno del suo potenziale (per dettagli si veda il paragrafo 5.2.1).

Nel periodo 2003-2010 sono state effettuate simulazioni avendo a disposizione sia i dati meteorologici registrati dalle stazioni meteo-climatiche selezionate, sia i dati di irrigazione teorica durante i diversi anni, con lo scopo di ricostruire i valori di umidità del suolo del comprensorio irriguo. In un'ottica di gestione irrigua e di risparmio della risorsa idrica sono stati elaborati diversi scenari, per gli anni compresi tra il 2003 e il 2010, in modo da fornire i valori di soil moisture in condizione di “contabilità idrica”.

5.1 CALIBRAZIONE DEL MODELLO IDROLOGICO PER LA CELLA DI LIVRAGA

Dopo aver convertito le misure rilevate dalle tre sonde Campbell poste nel terreno del podere Cascina Nuova a Livraga (paragrafo 3.3), è stata calcolata una media pesata dei contenuti volumetrici d'acqua corrispondenti alle profondità di 10, 35 e 60 cm da poter confrontare con il valore di soil moisture ottenuto dalle simulazioni effettuate con il modello idrologico FEST-EWB.

Il contenuto volumetrico d'acqua medio è dato dalla relazione (5.1):

$$\theta_{MEDIUM} = \alpha_1 \cdot \theta_{10} + \alpha_2 \cdot \theta_{35} + \alpha_3 \cdot \theta_{60} \quad (5.1)$$

dove:

$$\alpha_i = \frac{\Delta h_i}{h_{tot}}$$

Δh rappresenta la profondità a cui sono installate le sonde di umidità, pari a 10 cm, 35 cm, 60 cm;

h_{tot} rappresenta la profondità totale che è data da:

$$h_{tot} = (10 + 35 + 60 + 10) \text{ cm} = 70 \text{ cm}$$

Oltre alle tre profondità delle sonde di umidità, sono stati aggiunti 10 cm alla profondità totale in quanto, da come si nota in Figura 5.1, le sonde presentano due estremità, la cui distanza è appunto di 10 cm.

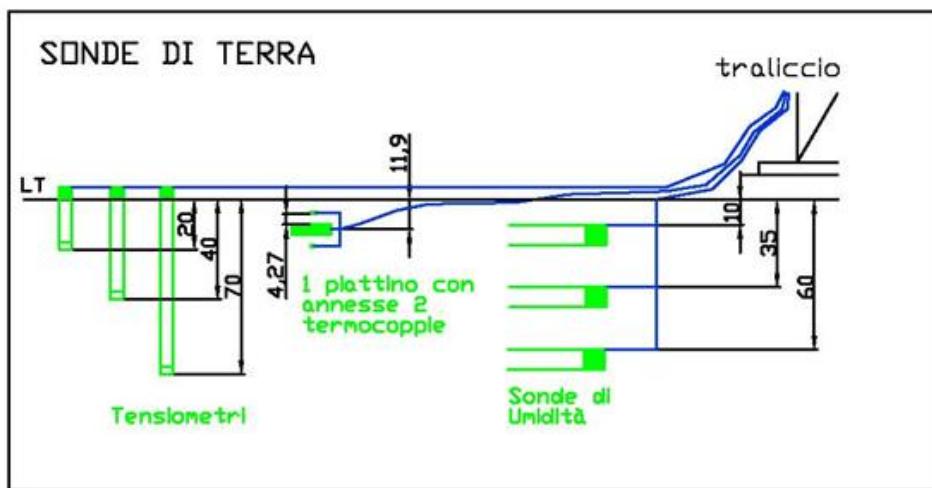


Figura 5.1 Posizionamento delle sonde di umidità alle varie profondità del suolo

In Figura 5.2 sono riportati gli andamenti del soil moisture misurati dalle tre sonde di umidità e l'andamento della loro media pesata, calcolata tramite la relazione (5.1).

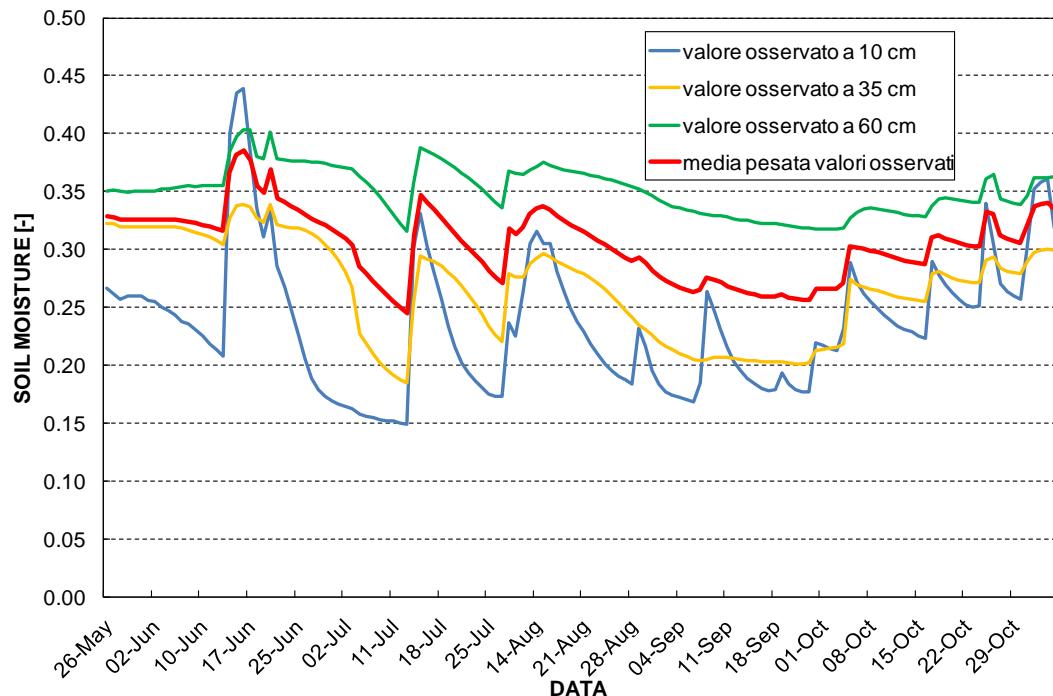


Figura 5.2 Andamento dei valori osservati di umidità del suolo alle profondità 10, 35 e 60 cm e relativa media pesata

Avendo a disposizione le misure osservate di soil moisture, si è cercato di calibrare il modello idrologico FEST-EWB per la sola cella 200 m x 200 m che comprende l'area dove è posizionata la stazione ddy-covariance e le sonde TDR, confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con la media pesata dei valori osservati.

Per questo motivo sono state effettuate numerose simulazioni per il periodo 2009-2010 cercando di avvicinarsi il più possibile all'andamento della media pesata, rappresentato in colore rosso in Figura 5.2.

Per la cella di Livraga è stato assegnato un valore di profondità del suolo di 0.7 m, valore coerente con la profondità totale delle tre sonde di umidità Campbell situate nel campo Cascina Nuova.

Dai primi test effettuati con il modello idrologico FEST-EWB si è notato come la variabilità del valore simulato di soil moisture fosse ben rappresentata e come gli andamenti di umidità del suolo (simulato e osservato) differissero per quanto riguarda l'intensità dei picchi dovuti all'irrigazione, in particolare l'andamento del soil moisture ricavato dalle simulazioni presentava picchi di minore intensità.

Non avendo a disposizione analisi tessiturali di laboratorio ma solo informazioni generali cartografiche riguardanti la classe litologica del suolo presente a Livraga, si è pensato di modificare i valori precedentemente assegnati che corrispondevano alla classe litologica “Loam”. Sono state così eseguite delle simulazioni di calibrazione per le diverse classi litologiche riportate in Tabella 5.1:

Tabella 5.1 Classi di suolo rappresentative e valori dei parametri corrispondenti (Handbook of Hydrology, 2001)

Tipo	Ksat [m/s]	θ residuo	θ saturop	Brooks& Corey	wilting point	field capacity	bubbling pressure
Silt Loam	1.3889E-06	0.015	0.501	0.234	0.133	0.33	0.2076
Sandy Clay Loam	9.7222E-07	0.068	0.398	0.319	0.148	0.255	0.2808
Clay Loam	5E-07	0.075	0.464	0.242	0.197	0.318	0.2589

La classe litologica “Silt Loam” è risultata essere quella che meglio rappresentasse l’andamento del soil moisture; tuttavia confrontando il valore simulato con la media pesata dei valori osservati non si otteneva la stessa intensità dei picchi dovuti al contributo irriguo, sebbene l’intensità di pioggia fosse ben rappresentata. Pertanto si sono modificati i valori del contributo di irrigazione, risultati essere sottostimati.

Il campo, infatti, viene irrigato dalla roggia “Porra Nuova” che presenta un valore di portata di concessione teorica di 650 l/s (vedi Tabella 3.5). Considerando che le rogge in genere non dispongano mai di tutta la portata teorica e che il campo del Sig. Grecchi si trova in prossimità della fine della roggia “Porra Nuova” (e quindi soggetta alle perdite di infiltrazione lungo tutto il tratto) il contributo d’acqua effettivo considerato è stato di circa 300 l/s. Tale portata viene somministrata in 8 ore il campo che ha un’estensione “S” di 8 ettari.

Quindi, il volume relativo è dato dalla (5.2):

$$W = Q \cdot t = 0.3 \text{ } m^3/s \cdot 8h \cdot \frac{3600 \text{ } s}{ore} = 8640 \text{ } m^3 \quad (5.2)$$

e l’altezza d’acqua corrispondente è dato dalla relazione:

$$h = \frac{W}{S} = \frac{8640 \text{ } m^3}{80000 \text{ } m^2} = 0.108 \text{ } m = 108 \text{ } mm \quad (5.3)$$

Dopo aver inserito nel modello idrologico per la cella di Livraga il valore di altezza d’acqua irrigua di 108 mm è stata effettuata una simulazione per il periodo 2009-2010 mantenendo la classe litologica “Silt Loam”.

In Figura 5.3 si riporta il risultato ottenuto confrontandolo con la media pesata dei valori osservati nel periodo compreso tra il 26 maggio 2010 e il 4 novembre 2010, periodo in cui si hanno i dati osservati.

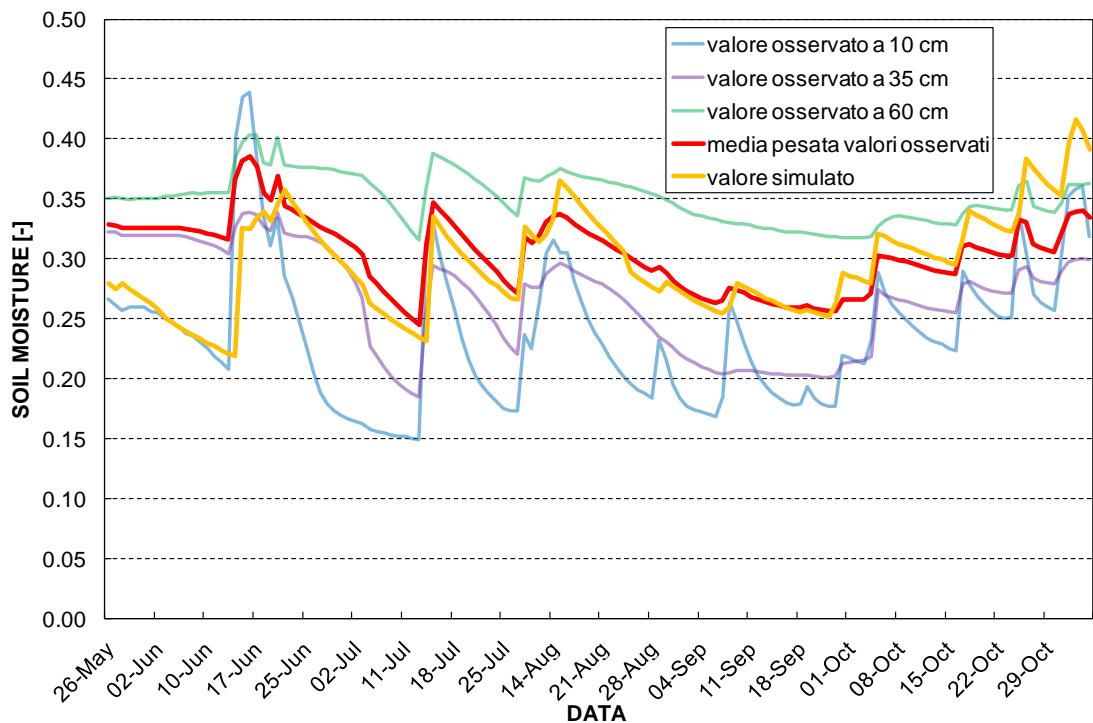


Figura 5.3 Confronto tra il valore di soil moisture simulato e la media mesata dei valori di soil moisture osservati per il periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010

Dal grafico di Figura 5.3 si nota che la variabilità del valore simulato di soil moisture è ben rappresentata. Infatti, i picchi corrispondenti a un aumento del tasso di umidità del suolo si verificano sia nell’andamento dei valori reali osservati che in quelli simulati. I risultati ottenuti sono soddisfacenti, soprattutto considerando che sono stati confrontati i valori di un punto misurato rispetto ai valori di una cella di grandezza finita.

5.2 L’IRRIGAZIONE SUL CAMPO CASCINA NUOVA A LIVRAGA (LO)

Dopo aver calibrato il modello idrologico FEST-EWB per la cella elementare di Livraga, sono stati analizzati i risultati ottenuti confrontandoli con gli apporti idrici dovuti alle precipitazioni e all’irrigazione avvenuti tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010. In Figura 5.4 si riportano sull’asse verticale principale il confronto tra l’andamento di soil moisture ottenuto dalle simulazioni (evidenziata con il color

arancione) e l'andamento della media pesata dei valori di umidità del suolo misurati dalle sonde poste nel campo Cascina Nuova a Livraga (LO) (evidenziata con il colore rosso). Sull'asse verticale secondario, invece, si hanno gli histogrammi che rappresentano l'altezza di pioggia caduta realmente a Livraga nel periodo compreso tra il 26 maggio 2010 e il 4 novembre 2010 (evidenziata con il colore blu) e l'altezza d'acqua di 108 mm (evidenziata con il colore verde scuro), dovuta alla reale irrigazione avvenuta nei giorni 14 giugno, 29 giugno, 29 luglio 2010.

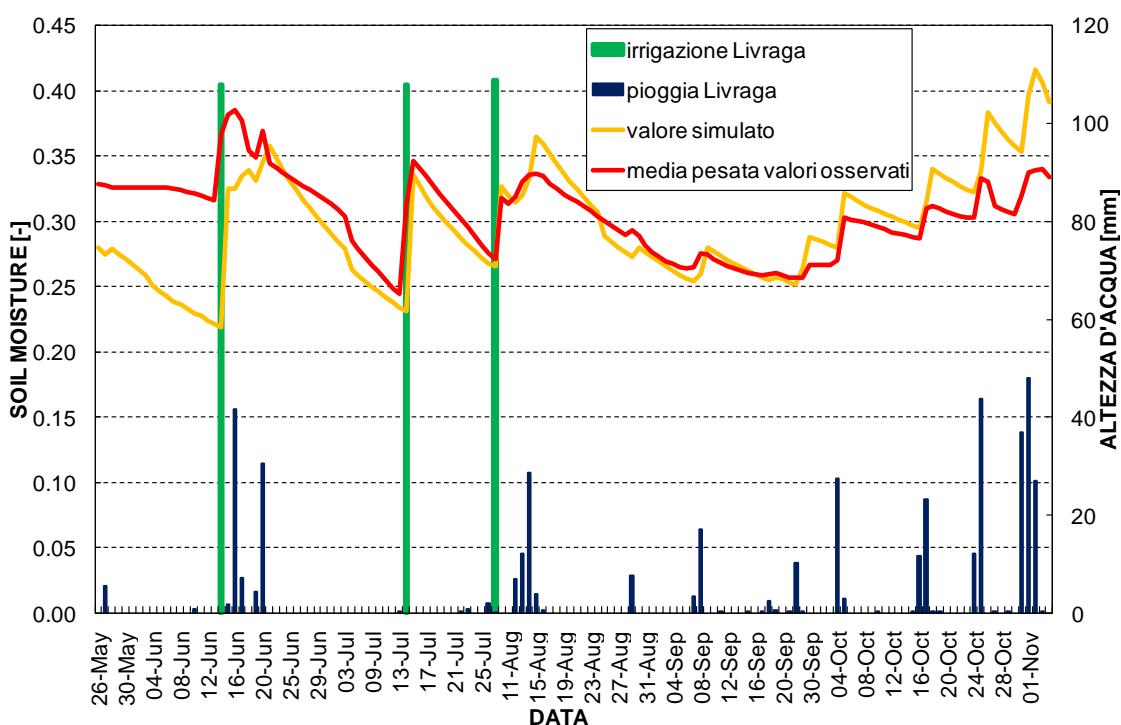


Figura 5.4 Confronto tra gli andamenti di soil moisture simulato e media pesata dei valori osservati e altezza d'acqua dovuta all'irrigazione e alle precipitazioni realmente cadute a Livraga nel periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010.

Si nota dal grafico in Figura 5.4 che ai picchi di umidità del suolo sono associati apporti idrici dovuti sia alle piogge che all'irrigazione. Inoltre è ben visibile come la prima irrigazione della stagione irrigua, avvenuta il 14 giugno 2010, si potesse evitare sapendo in anticipo le previsioni meteorologiche dei giorni successivi. Infatti successivamente dal 15 giugno al 20 giugno 2010 si sono avute precipitazioni per un totale di circa 85 mm di pioggia, con un picco massimo di circa 40 mm il 15 giugno (giorno successivo

all’irrigazione). Probabilmente a causa di queste precipitazioni si è deciso di non effettuare l’irrigazione il 29 giugno 2010, giorno in cui teoricamente al campo Cascina Nuova spetta l’irrigazione.

5.2.1 Stress idrico e soil moisture

In seguito, è stata fatta un’analisi con lo scopo di confrontare il valore di umidità critica e i valori di soil moisture che sono stati ottenuti dalle simulazioni nel periodo 2009-2010 con e senza irrigazione.

Al di sotto del valore di umidità critica l’ET inizia ad essere minore dell’ETpotenziale, ossia la pianta non muore ma inizia ad essere in stress

Lo stress è sempre più elevato andando verso umidità più basse fino alla morte della pianta (ossia quando l’umidità è pari al punto di appassimento).

Il valore di umidità critica si ottiene sottraendo dalla *TAW* (Total Available Water, tra field capacity e wilting point) la *RAW* (Readily Available Water).

Il documento FAO-56 fornisce la seguente relazione (5.4):

$$RAW = p TAW, \quad (5.4)$$

dove p varia in funzione della coltura ma anche delle condizioni climatiche. In prima battuta p per il mais (pianta che viene coltivata nel terreno Cascina Nuova a Livraga) può essere considerato 0.5; anche se in realtà bisognerebbe poi correggere tale valore giorno per giorno sulla base dei dati climatici (e dunque del potere evaporante dell’atmosfera). Se si considera il p di prima battuta, allora (Baroni et al, 2010):

$$\text{umidità critica} = \text{wilting point} + 0.5 (\text{field capacity} - \text{wilting point}) \quad (5.5)$$

Inserendo nella relazione (5.5) I valori di wilting point e field capacity che si hanno a Livraga (Tabella 5.1) si ottiene:

$$\text{umidità critica} = 0.133 + 0.5 (0.33 - 0.133) = 0.2315$$

Quindi è stato considerato un valore di umidità critica pari a circa 0.23, che nel grafico di Figura 5.5 è stato evidenziato con il colore rosso. Gli andamenti del soil moisture ottenuti dalle simulazioni con e senza irrigazione sono stati indicati rispettivamente con il colore blu e con il colore verde.

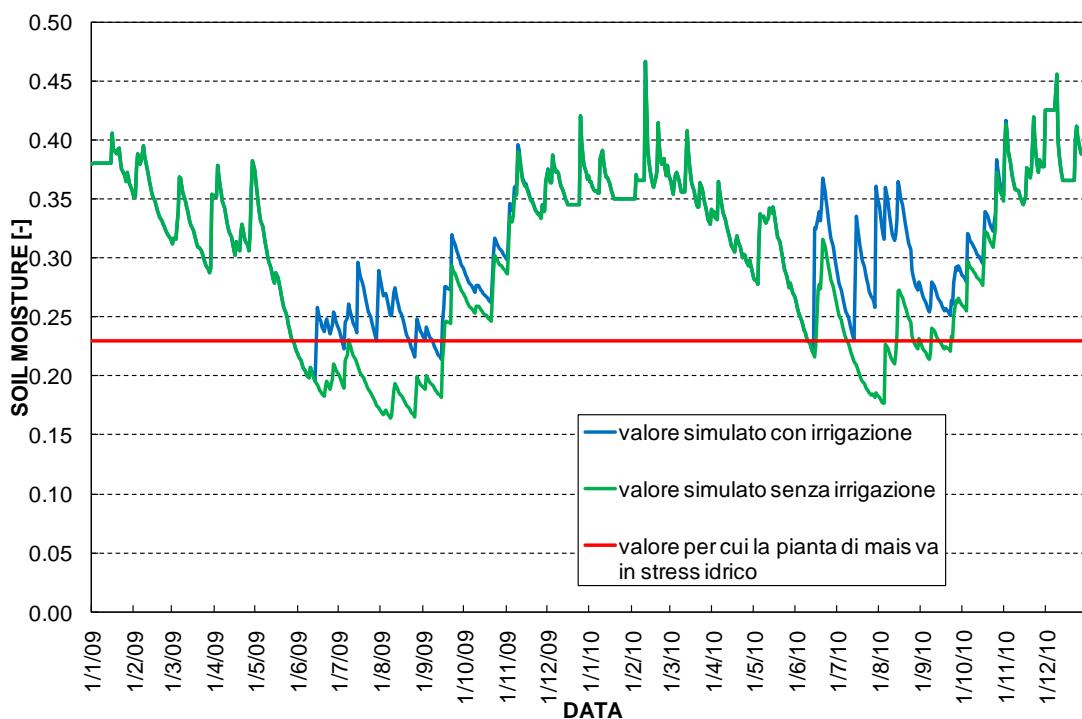


Figura 5.5 Confronto tra gli andamenti di soil moisture simulati per la cella Livraga con e senza irrigazione e il valore di umidità critica stimato per la pianta di mais

Si osserva in Figura 5.5 come senza un apporto idrico dovuto all'irrigazione, la pianta di mais vada in stress idrico durante il periodo estivo, assumendo valori di umidità del suolo minori di 0.23. Con l'irrigazione, invece, si nota come nel 2010 ci siano valori al di sotto della soglia critica solo dal 12 al 14 giugno con un valore di 0.22, mentre nel 2009 il soil moisture presenta un valore di circa 0.20 per la prima metà del mese di giugno e un valore intorno allo 0.23 nei primi cinque giorni di luglio. Anche a settembre

2009 si nota un valore di umidità del suolo al di sotto del valore critico, ma non è rilevante in quanto già a fine agosto di solito si effettua il raccolto del mais.

5.3 SIMULAZIONI 2003-2010 IN CONDIZIONI DI IRRIGAZIONE SECONDO CONCESSIONE

Uno degli obiettivi di questo studio è stato quello di effettuare una simulazione durante il periodo 2003-2010, avendo a disposizione sia i dati meteorologici registrati dalle stazioni meteo-climatiche selezionate, sia i dati di irrigazione teorica durante i diversi anni, ricostruendo attraverso il modello idrologico FEST-EWB i valori di umidità del suolo.

Dal bilancio idrologico sono stati ricavati per l'intero bacino del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana i valori di soil moisture (umidità del suolo) e di soggiacenza della falda, che rappresenta la posizione in profondità della falda rispetto al piano campagna (Figura 5.6).

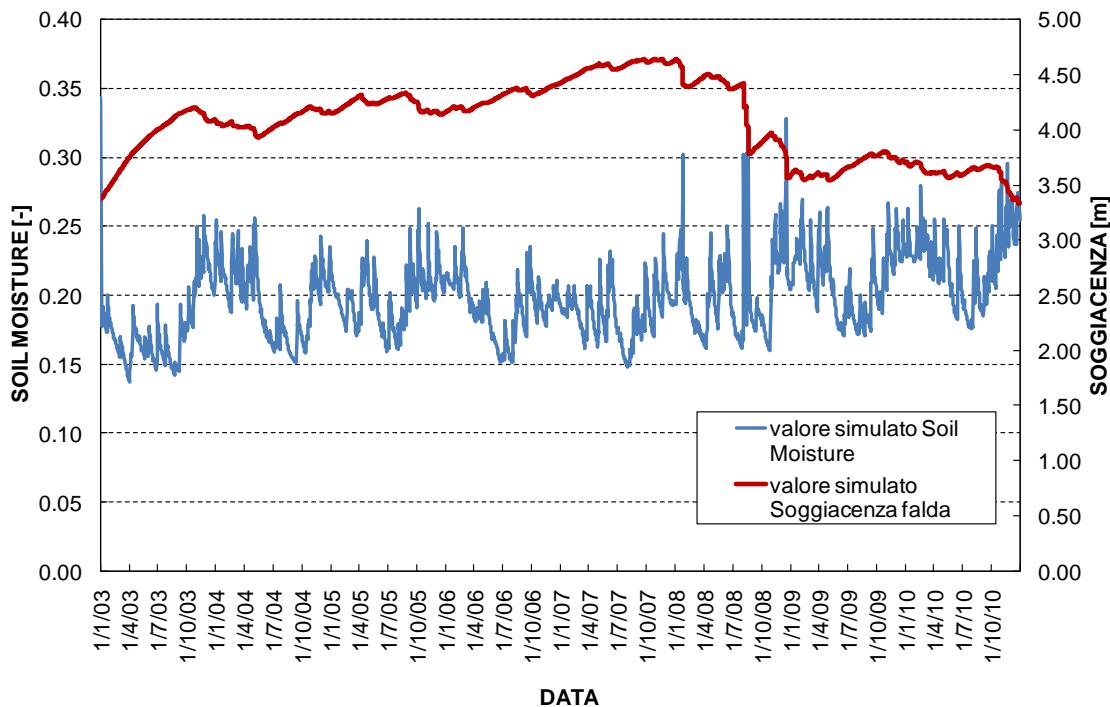


Figura 5.6 Andamento del valore di soil moisture e della soggiacenza della falda per il bacino irriguo del Consorzio MBL

E' possibile notare dal grafico come a una diminuzione della profondità della falda corrisponda un aumento del soil moisture. Il risultato ottenuto è una media dei valori simulati su tutto il bacino irriguo della Muzza, formato da 1722 comizi.

Tramite il modello idrologico FEST-EWB, inoltre, sono stati estrapolati i file in formato ASCII relativi al contenuto di umidità del suolo, che dopo essere stati importati in GIS, sono stati convertiti in formato raster. permettendo così la costruzione di mappe di umidità del suolo.

Si riportano in Figura 5.7 le mappe di umidità del suolo relative ai giorni di luglio, che insieme a giugno, è il periodo che dà luogo alla stagione irrigua vera e propria.

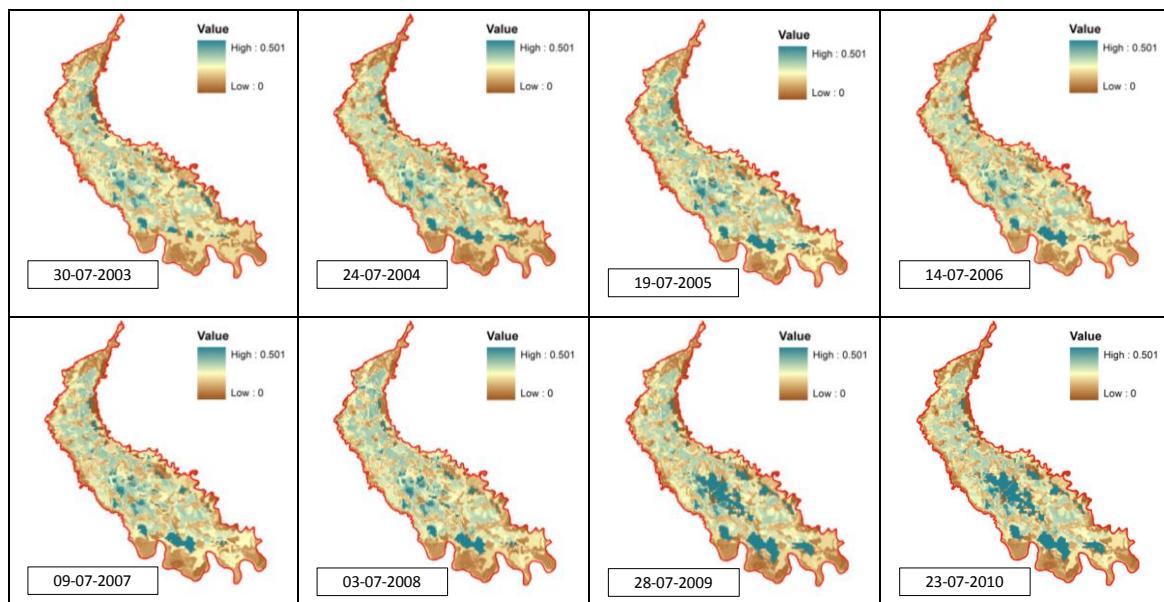


Figura 5.7 Mappe di umidità del suolo in diversi giorni del mese di luglio per il periodo 2003-2010³

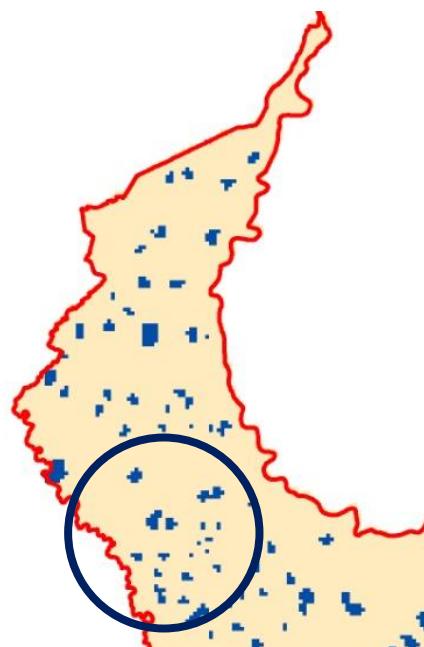
³ Sono stati estrapolati i risultati del soil moisture ogni 30 giorni per il periodo 2003-2010. Ecco perché non si ha lo stesso giorno di luglio nei diversi anni.

Le mappe mostrano l'andamento del soil moisture, con una legenda che va dal marrone scuro (colore che identifica il suolo secco), a gradazioni di marrone più chiaro e di azzurro fino al blu scuro (colore che identifica il suolo umido). Dalle mappe di Figura 5.7, si nota come il contenuto di umidità del suolo cambi a seconda della stagione irrigua considerata. È evidente come per il 2009 e per il 2010, anni in cui si sono avute copiose precipitazioni durante il mese di luglio, il contenuto di umidità del suolo assuma valori maggiori rispetto a stagioni irrigue caratterizzate da periodi di siccità come nel caso degli anni 2003, 2005 e 2006.

Per rendere più chiaro come vari il contenuto di umidità del terreno a seguito dell'irrigazione, si riportano le mappe di soil moisture del 14 giugno e del 15 giugno 2010 per il bacino irriguo del Consorzio MBL e per la cella 200 m x 200 m di Livraga.

5.3.1 Mappe di soil moisture relative al Consorzio MBL

In Figura 5.8 sono riportati i comizi a cui spetta l'irrigazione il 14 giugno 2010.



14-06-2010

Figura 5.8 Mappa di turnazione irrigua relativa al 14 giugno 2010 per la parte settentrionale del territorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana. In blu scuro è cerchiata la zona presa in considerazione

Per i comizi che beneficiano dell’irrigazione il 14 giugno 2010, evidenziati con il colore blu scuro in Figura 5.8, ci si aspetta che il soil moisture assuma valori maggiori il giorno successivo.

Per questo, sono riportate in Figura 5.9 le mappe di umidità del suolo relative ai giorni 14 giugno e 15 giugno 2010.

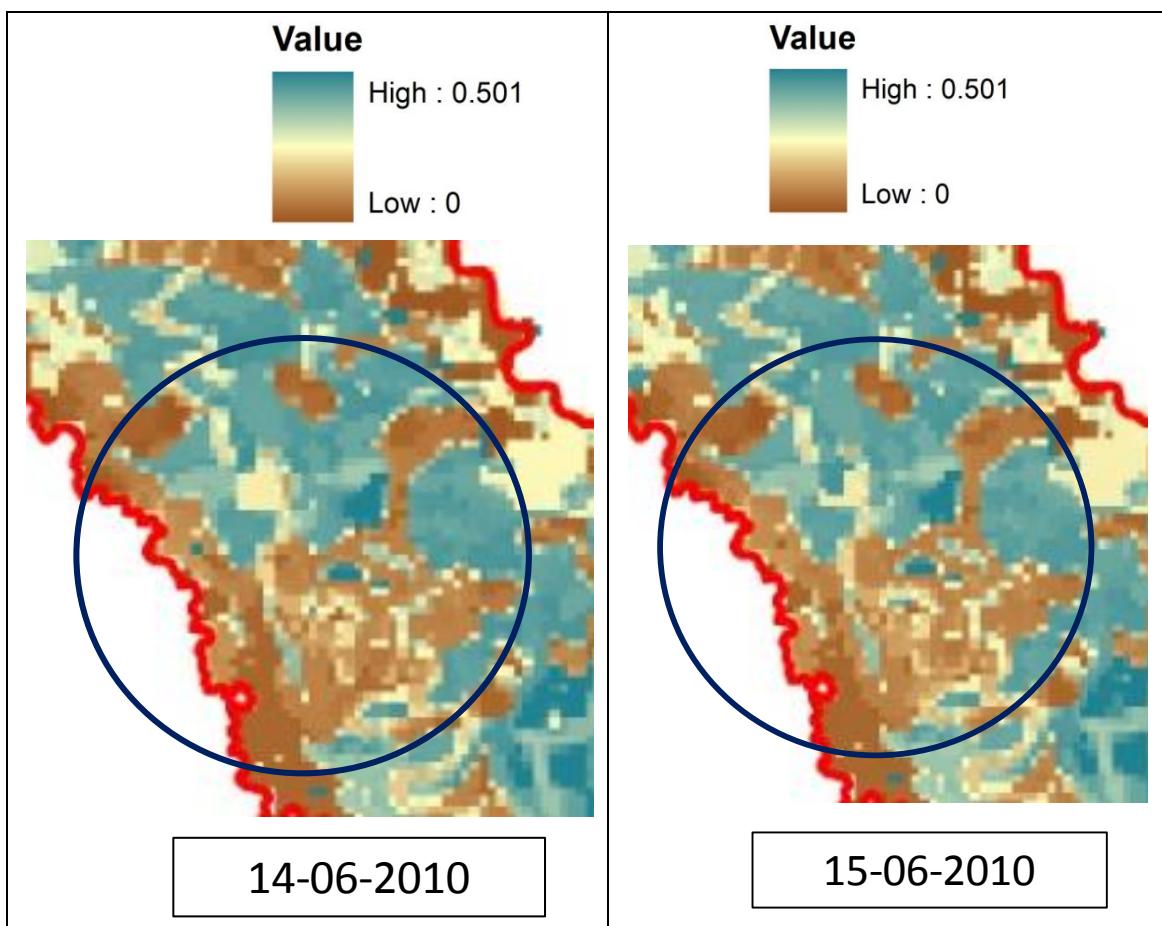


Figura 5.9 Mappe di soil moisture relative al 14 giugno 2010 (sopra) e al 15 giugno 2010 (sotto). In blu è cerchiata la zona del bacino irriguo del Canale Muzza analizzata.

Come esempio è riportato il confronto tra le mappe di umidità del suolo relative al 14 giugno e al 15 giugno 2010, prendendo in considerazione la zona cerchiata in blu nelle mappe di Figura 5.9.

Si nota come i comizi di colore marrone scuro (suolo secco) e comizi di color panna (suolo meno secco) relativi al 14 giugno 2010 assumano rispettivamente il giorno successivo un colore marrone più chiaro (suolo meno secco) e un colore azzurro (suolo umido). Pertanto si nota come a seguito di un contributo idrico dovuto all’irrigazione il valore di umidità del suolo aumenti.

5.3.2 Mappe di soil moisture relative al campo Cascina Nuova di Livraga

Con lo scopo di mostrare gli effetti che si hanno sui valori di umidità del suolo a seguito del contributo irriguo è stata presa in considerazione la giornata del 14 giugno 2010, giorno in cui al podere Cascina Nuova spetta l’irrigazione, e del 15 giugno.

In Figura 5.10 si riporta la mappa dei bacini irrigui gestiti dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana con evidenziata la posizione del campo Cascina Nuova a Livraga (LO).

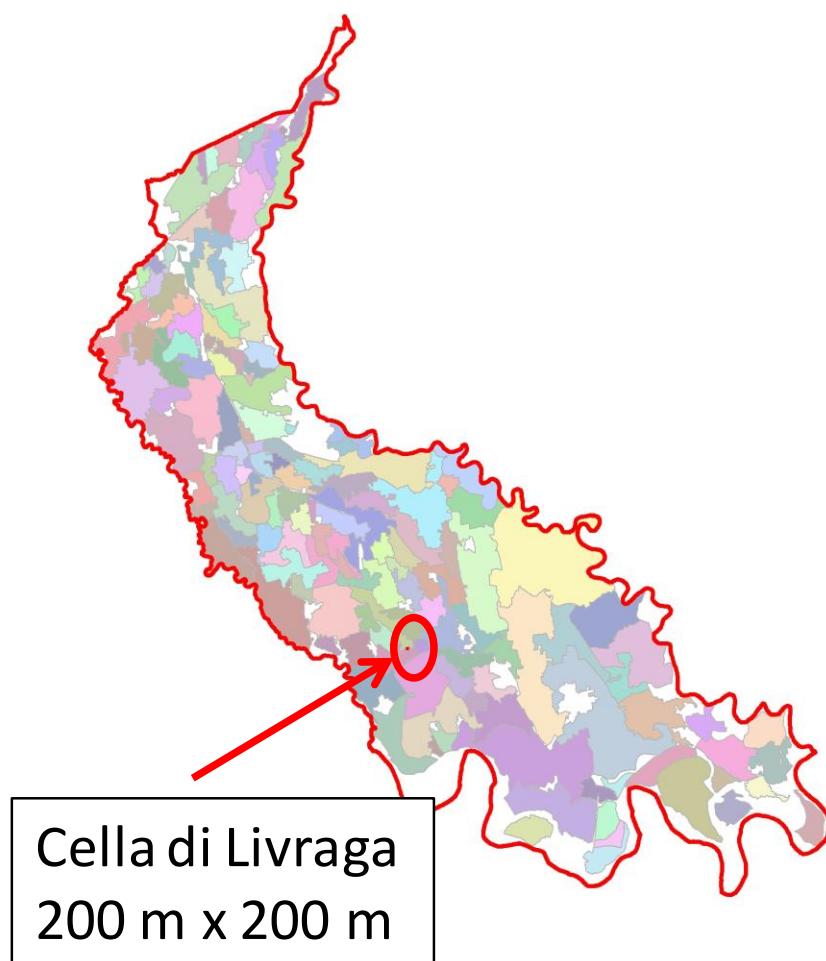


Figura 5.10 Mappa dei bacini irrigui del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana. In rosso è evidenziato il campo Cascina Nuova nel comune di Livraga (LO).

Il campo di Livraga è stato digitalizzato nel modello come una cella di dimensioni 200 m x 200 m, per questo motivo è stato fatto un ingrandimento sulle mappe di umidità del suolo relative al 14 giugno e al 15 giugno 2010. (Figura 5.11)

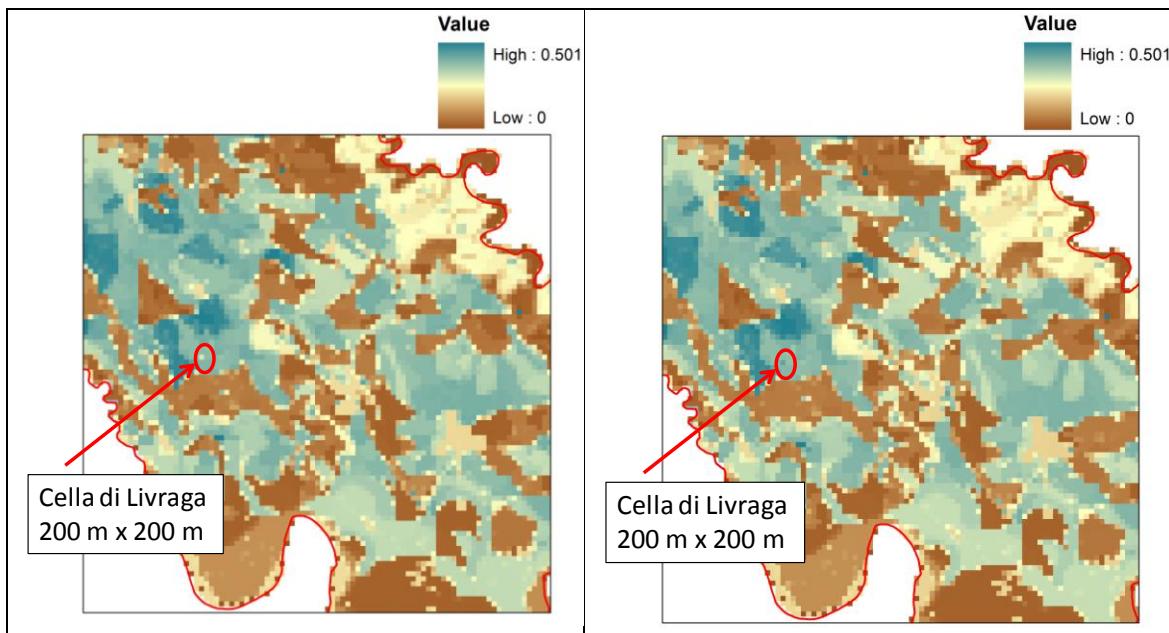


Figura 5.11 Mappa del soil moisture relativa al 14 giugno 2010 (a sinistra) e al 15 giugno 2010 (a destra). In rosso è cerchiata la cella corrispondente al campo Cascina Nuova, situata a Livraga (LO)

Dalle mappe di Figura 5.11 si può notare come il 15 giugno 2010 il terreno relativo alla cella di Livraga (LO) assuma un valore maggiore di soil moisture in quanto ha beneficiato dell’irrigazione che gli è spettata il giorno prima. Infatti la cella che identifica il campo Cascina Nuova di Livraga, il 14 giugno 2010 presenta un colore panna (terreno che tende a essere secco) mentre il giorno successivo è di colore azzurro (terreno umido).

5.4 SIMULAZIONI IN CONDIZIONI DI “CONTABILITÀ IDRICA”

In caso di carenze di risorsa idrica il Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana può chiedere di attivare la modalità di “derivazione in contabilità idrica”, distribuendo ai suoi consorziati una percentuale ridotta dell’acqua concessa. In questo modo il Consorzio si riserva di usare la frazione non utilizzata nel periodo successivo che si presuppone più siccioso, garantendo la salvaguardia della produzione agricola.

Purtroppo non sono state fornite indicazioni precise di quando e con quale modalità sia stata attivata la contabilità idrica nel periodo compreso tra il 2003 e il 2010; l'unica informazione che è stata reperita dal Consorzio MBL riguarda la riduzione dell'acqua concessa: essa può variare tra il 90% e il 70%. Per questo motivo sono stati effettuati dei test con il modello idrologico utilizzando il 90%, l'80%, il 70% della portata di concessione teorica. Volendo ridurre al massimo la percentuale si è arrivati fino al 60% dell'irrigazione teorica.

In particolare, sono state effettuate quattro simulazioni con il modello idrologico FEST-EWB, creando quattro rispettive matrici di irrigazione con i valori di irrigazione teorica, forniti dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (si veda paragrafo 4.4), al 90%, all'80%, al 70% e al 60%.

Si riporta in Figura 5.12 l'andamento della falda per l'intero bacino irriguo della Muzza ottenuto dalle simulazioni effettuate. Si nota come diminuendo l'apporto idrico al terreno la profondità della falda aumenti sempre di più.

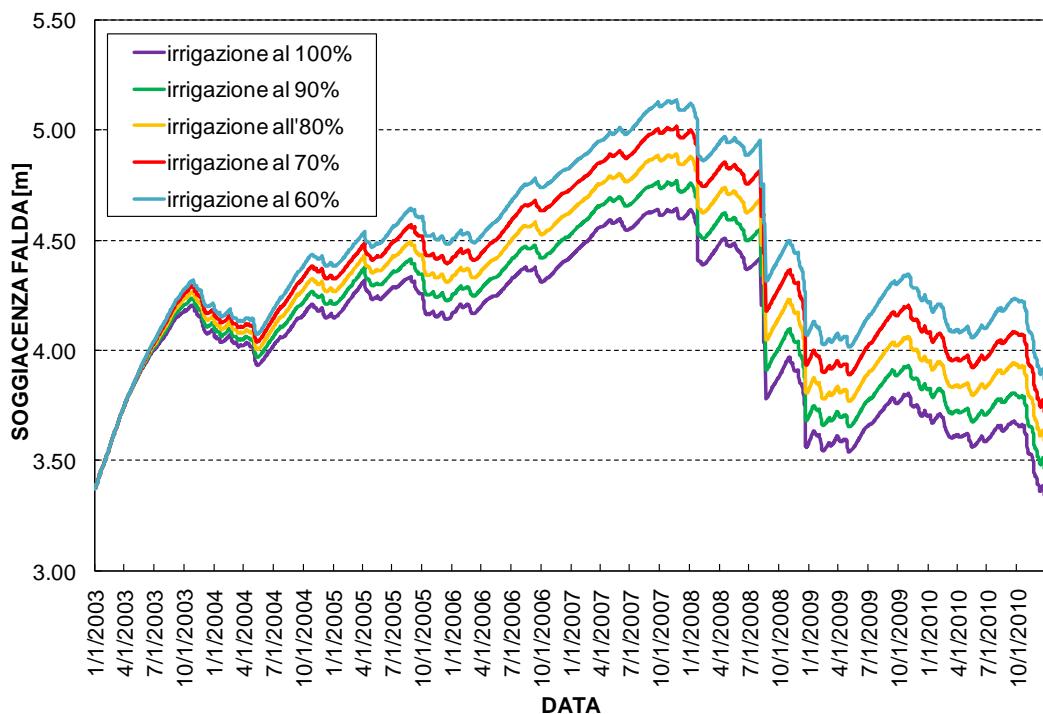


Figura 5.12 Andamento della soggiacenza della falda simulato attraverso il modello idrologico FEST-EWB con irrigazione al 100%, 90%, 80%, 70%, 60% per il periodo 2003-2010.

Per mostrare come vari il valore di soil moisture in condizioni di irrigazione in contabilità idrica sono state estrapolate e messe a confronto le mappe di umidità del suolo al 100%, al 90%, all'80%, al 70%, e al 60% dell'irrigazione teorica, relative al 23-07-2010 (Figura 5.13).

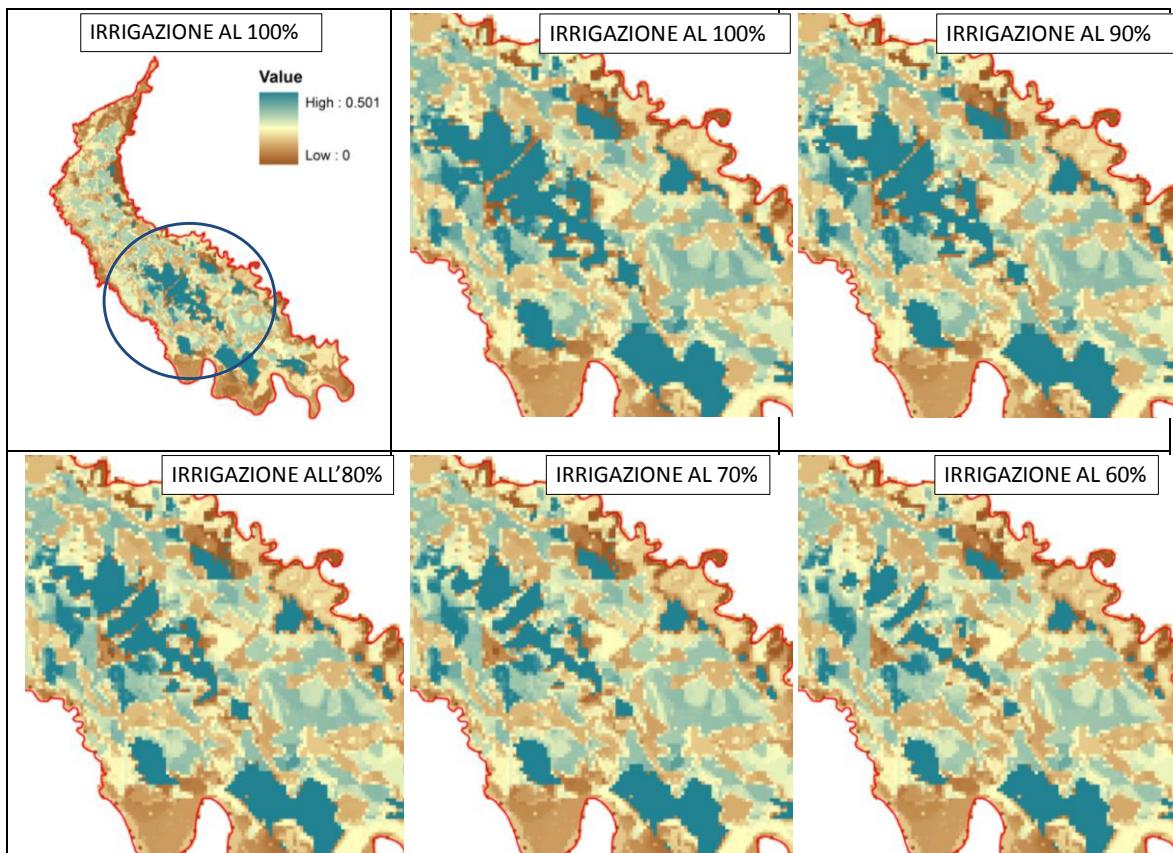


Figura 5.13 Mappe di umidità del suolo relative al 23-07-2010 con un valore di irrigazione pari al 100%, 90%, 80%, 70% e 60% del valore teorico

Dalle mappe sopra riportate in Figura 5.13 si nota come aumentando la percentuale di riduzione dell'acqua distribuita ai vari comizi, il suolo presenta un valore di soil moisture minore. Infatti osservando le mappe con irrigazione che va dal 100% fino al 60% le zone in blu scuro (suolo umido) assumono gradazioni più chiare, e le zone in marrone chiaro assumono gradazioni via via più scure (suolo secco).

D'altra parte per la stagione irrigua considerata, pur diminuendo la portata concessa il valore di soil moisture assume le gradazioni dell'azzurro (che indica un suolo umido) per parte del comprensorio irriguo. Questo è dovuto al fatto che nel periodo di massima irrigazione dell'anno 2010 ci sono state numerose precipitazioni che hanno contribuito ad apportare una risorsa idrica al terreno. In stagioni piovose, risulta quindi vantaggioso, per la gestione della risorsa idrica del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, sapere in anticipo, tramite il modello meteorologico, la probabilità di avere precipitazioni di una certa intensità.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

E SVILUPPI

FUTURI

Lo studio effettuato in questa tesi ha affrontato temi riguardanti l'ottimizzazione della pianificazione irrigua in relazione a periodi di scarsità idrica.

Con lo scopo di creare un supporto alle decisioni che sia utile al Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana nella gestione irrigua del territorio a esso competente, le informazioni fornite sono state elaborate in formato digitale in modo da semplificare il più possibile il complesso sistema di irrigazione del Consorzio.

Richiamando quanto esposto nel capitolo introduttivo, gli obiettivi principali di questa tesi sono:

- 1) analisi dell'andamento del soil moisture relativo al campo “Azienda Agricola Cascina Nuova” situato nel comune di Livraga (LO) e confronto con i dati osservati, nel periodo compreso tra il 26 maggio e il 4 novembre 2010, misurati dai sensori TDR, di proprietà del Politecnico di Milano;

2) stima del valore di umidità del suolo per cui il terreno Cascina Nuova a Livraga (LO), coltivato a mais, va in stress idrico e confronto con l'andamento di soil moisture con e senza apporto irriguo nel periodo 2009-2010.

3) analisi dell'andamento del soil moisture per l'intero comprensorio irriguo gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana per il periodo 2003-2010 in condizione di irrigazione secondo concessione e in condizione di contabilità idrica;

Nel primo caso, dopo aver elaborato i dati di umidità del suolo provenienti dalle sonde Campbell poste nel terreno di Cascina Nuova a Livraga (LO), è stata effettuata una calibrazione del modello idrologico FEST-EWB per la cella di grandezza 200 m x 200 m corrispondente al campo. Il confronto tra gli andamenti del soil moisture osservato e quello ottenuto dalle simulazioni mostra come la variabilità del valore di umidità del suolo sia ben rappresentata. Infatti i picchi di aumento del valore di soil moisture, che avvengono a seguito di un contributo idrico dato dall'irrigazione o dalle precipitazioni, sono evidenti in entrambi gli andamenti.

Nel secondo caso, dopo aver stimato il valore di stress idrico della pianta di mais, coltivata nel podere Cascina Nuova a Livraga, è stata effettuata un'analisi sull'andamento del soil moisture nel periodo di irrigazione (giugno – luglio) degli anni 2009 -2010. I risultati ottenuti hanno mostrato i giorni in cui il contenuto di umidità del suolo presenta un valore minore a quello dell'umidità critica del suolo, confrontando le simulazioni con e senza irrigazione.

Infine, sono state effettuate delle simulazioni per il periodo 2003-2010 estrapolando dal modello idrologico le mappe di umidità del suolo del mese di luglio (mese in cui si ha l'irrigazione massima) in condizione di irrigazione secondo concessione. Inoltre, per il periodo considerato, è stata considerata la condizione di irrigazione in contabilità idrica ed è stato eseguito un confronto tra le mappe di umidità del suolo, estrapolate per il mese di luglio 2010, al 100%, al 90%, all'80%, al 70% e al 60% del valore teorico di irrigazione. Le mappe hanno mostrato come nel corso del periodo analizzato il valore di umidità del suolo cambi a seconda che si abbia o meno una stagione irrigua piovosa. Inoltre il confronto tra le mappe di umidità del suolo ottenute riducendo di una

percentuale il valore di irrigazione teorica, evidenziano come il soil moisture assuma valori via via più bassi diminuendo la percentuale (da 100% a 60%).

Come precedentemente detto il presente lavoro di tesi ha visto l'autore coinvolto nel progetto, finanziato dalla Regione Lombardia, “**Previsione meteo idrologica per la Gestione Irrigua**” (“PRE.G.I.”), che, unendo la previsione meteorologica di lungo periodo alla simulazione del bilancio idrico del suolo, fornisce uno strumento innovativo e necessario alla moderna gestione della risorsa idrica

Quindi, per quanto riguarda gli sviluppi futuri, l'espansione del progetto PreGI anche alle altre realtà territoriali lombarde costituisce un vantaggio non solo per la partnership che realizza questo prodotto, ma un vantaggio per tutte le altre strutture che agiscono sulla gestione della risorsa irrigua e idrica nel suo complesso, anche per come è strutturato tale sistema in Lombardia. Infatti, lo strumento PreGI favorisce la competitività delle aziende agricole lombarde per il prossimo futuro attraverso la valorizzazione dell'antico sistema irriguo della Pianura Padana. Si combinano l'economicità e la semplicità del sistema irriguo lombardo, basato sulla distribuzione turnata, ossia distribuzioni di una portata costante per numero di ore, tramite canali a pelo libero (senza cioè l'impiego di energia fossile), con quello più elastico ed efficiente della distribuzione a domanda, tipico però dei più complessi e costosi sistemi in pressione.

Riferimenti bibliografici

- [1] Baroni, G., Facchi, A., Gandolfi, C., Ortuan, B., Horeschi, D., van Dam, J. C., "Uncertainty in the determination of soil hydraulic parameters and its influence on the performance of two hydrological models of different complexity", *Hydrology and Earth System Sciences*, 14, 251 -270, 2010.
- [2] Brath, A., "Hydrometeorological aspects of the 1994 flooding in the upper Po river basin", *Perugia: U.S.-Italy Research workshop on the Hydrometeorology, impacts, and management of extreme floods*, 1995.
- [3] Cabelguenne, M., Debaeke, Ph., Puech, J., Bosc, N., "Real time irrigation management using the EPIC – PHASE model and weather forecasts", *Agricultural Water Management*, 32, 227 – 238, 1997.
- [4] Cai, J., Liu, Y., Lei, T., Pereira, L. S., "Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman – Monteith equation using daily weather forecast messages", *Agricultural and Forest Meteorology*, 145 ,22 – 35, 2007
- [5] Ceriani, M., Carelli, M., "Carta delle precipitazioni medie, massime e minime annue del territorio alpino della regione Lombardia, registrate nel periodo 1891-1990", *Servizio Geologico, Ufficio Rischi Geologici Regione Lombardia*, 2000
- [6] Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, "Indagine sul mantenimento dell'equilibrio idrico in un antico territorio irriguo della pianura lombarda", 2005
- [7] Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana, "Scheda Tecnica Informativa", 2004

-
- [8] Corbari C., Sobrino J.A., Mancini M., Hidalgo V., “Land surface temperature representativeness in a heterogeneous area through a distributed energy-water balance model and remote sensing data”, *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, 14, 2141–2151, 2010.
 - [9] Corbari, C., Martinelli, J., Ravazzani, G., Mancini, M., “Snow satellite images for calibration of snow dynamic in a continuous distributed hydrological model”, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 4, 4379-4004, 2007.
 - [10] Craveri, L., “Siccità nel clima lombardo. L’esperienza del 2003, in Regione Lombardia”, *ERSAF e Agriteam (a c. di) in L’acqua, una risorsa per il sistema agricolo lombardo*, pp. 27-30, 2006.
 - [11] Cunge, J.A., “On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method)”, *J. Hydraul. Res.* 7 2, pp. 205–230, 1969.
 - [12] Diak, G. R, Anderson, M. C., Bland, W. L., Norman, J. M., Mecikalski, J. M., Aune, R. M., “Agricultural management decision aids driven by real-time satellite data”, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 79 No. 7, 1998.
 - [13] Facchi, A., Ortuan, B., Maggi, D., Gandolfi, C., “Coupled SVAT – groundwater model for water resources simulation in irrigated alluvial plains”, *Environmental Modelling & Software*, 19, 1053 – 1063, 2004.
 - [14] Gowing, J. W., Ejieji, C. J., “Real-time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short term weather forecasts”, *Agricultural Water Management*, 47, 137 – 153, 2001.
 - [15] Hargreaves, G.H., and Z.A. Samani, “Estimating potential evapotranspiration”, *J. Irrig. And Drain. Engrg., ASCE*, 108(3), 223-230, 1982.
 - [16] Jensen, A. L., Thysen, I., “Agricultural information and decision support by sms”, *EFITA Conference*, 2003.
 - [17] Maidment D.R. (editor). *Handbook of Hydrology* McGraw Hill: New York, 1993.
 - [18] Mancini, M., “I laghi di cava come regolatori delle emergenze idriche”, *Progetto finanziato dalla fondazione Cariplo*, 2007

-
- [19] Maugeri, M., “Variabilità e cambiamenti climatici nel corso degli ultimi due secoli: evidenze osservative e problemi aperti”, *ERSAF e Agriteam (a c. di) in L’acqua, una risorsa per il sistema agricolo lombardo*, pp. 17-23, 2006.
 - [20] Montaldo, N., Ravazzani, G., Mancini, M., “On the prediction of the Toce alpine basin floods with distributed hydrologic models”, *Hydrol. Processes* 21, 608-621, 2007.
 - [21] Rabuffetti, D., Ravazzani, G., Corbari, C., Mancini, M., “Verification of operational Quantitative Discharge Forecast (QDF) for a regional warning system – the AMPHORE case studies in the upper Po River”, *Nat. Hazard Earth Sys.* 8, 161-173, 2008.
 - [22] Ravazzani, G., Mancini, M., Giudici, I., Amadio, P., “Effects of soil moisture parameterization on a real- time flood forecasting system based on rainfall thresholds”. In: Quantification and Reduction of Predictive Uncertainty for Sustainable Water Resources Management (Proceedings of Symposium HS2004 at IUGG2007, Perugia, July 2007), *IAHS Publ.* 313, 407-416, 2007.
 - [23] Regione Lombardia, “Sistema Informativo Territoriale (S.I.T.)”, *Banca Dati dell’Uso del Suolo*, 2004.
 - [24] Rogers, D. H., Elliott, E. L., “Irrigation scheduling using crop growth simulation, risk analysis, and weather forecast”, *American Society of Agricultural Engineers*, 0001 – 2351/89/3205 – 1669\$03.00, 1989.
 - [25] Rosso, R. “An introduction to spatially distributed modelling of basin response”. In: R. Rosso, A. Peano, I. Becchi and G.A. Bemporad, Editors, *Advances in Distributed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 3–30, 1994.
 - [26] Salerno, R., M. Giuliacci e L. Bertolani, “Climate Change in Italy: An assessment of data and reanalysis models”, *Development in Earth Surface Processes*, 10, pp. 123-132, Elsevier, 2007
 - [27] Soil Conservation Service, ” Urban hydrology for small watershed”, Tech. Rel., 55, *U. S. Department of Agriculture, Washington D.C.*, 1986.

-
- [28] Tarboton, D.G., Chowdhury, T.G., and Jackson, T.H., “A Spatially Distributed Energy Balance Snowmelt Model”, *Utah Water Research Laboratory*, 1994.
 - [29] Thysen, I., Detlefsen, N. K., “On line decision support for irrigation for farmers”, *Agricultural Water Management*, 86, 269 – 276, 2006.

Appendice A

SOFTWARE UTILIZZATI

Per l'analisi e la valutazione dei risultati delle simulazioni sono stati utilizzati diversi software e programmi.

Software come ArcGis sono stati utili per la visualizzazione delle informazioni relative al bacino irriguo analizzato e per l'estrapolazione di mappe tematiche relative ai risultati ottenuti nelle simulazioni.

Excel è risultato un valido supporto per elaborare in maniera dettagliata i dati osservati e simulati. Da queste elaborazioni è stato possibile effettuare un'accurata analisi sul comportamento delle simulazioni grazie all'utilizzo di grafici.

Il software InfoWorks CS è stato utilizzato per la costruzione del modello idraulico della rete irrigua del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana.

Per la rappresentazione grafica dei dati, è stato utilizzato il pacchetto ArcGis 9.2 (ESRI).

ArcGis è una famiglia di prodotti GIS estremamente ricca di funzionalità ed altamente utile per la gestione, la creazione, l'integrazione, l'analisi e la distribuzione di tutti i tipi di dati geografici, disponendo di un modello di alto livello per la rappresentazione di informazioni spaziali, in particolare quelle vettoriali e raster, come i dati utilizzati per le elaborazioni.

ArcGIS Desktop è un'insieme di applicazioni integrate:

- ArcMap

- ArcCatalog
- ArcToolBox:

ArcMap è l'applicazione usata per tutte le operazioni cartografiche, dalla produzione, all'analisi, all'editing. Consente diversi modi di visualizzare una mappa, sulla quale è possibile svolgere diversi tipi di operazioni GIS avanzate.

ArcCatalog è un'applicazione per organizzare e manipolare i dati GIS.

ArcToolBox è un'applicazione che contiene diversi strumenti GIS per processare i dati geografici (geoprocessing).

Con ArcMap si sono rappresentate una serie di informazioni sul bacino oggetto di studio e sono state create le mappe contenenti le caratteristiche geografiche del territorio analizzato. Inoltre ArcMap è servito a elaborare i risultati delle simulazioni effettuate con il modello idrologico FEST-EWB.

Le applicazioni ArcCatalog e ArcToolBox, invece, sono state utilizzate per la digitalizzazione del sistema di irrigazione (paragrafo 4.2). In particolare sono state un valido supporto nella schematizzazione dei 1722 comizi situati all'interno del comprensorio gestito dal Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana.

Per quanto riguarda l'analisi del comportamento idraulico della rete irrigua del comprensorio si è scelto di utilizzare InfoWorks CS® della Wallingford Software Ltd, che fornisce le migliori soluzioni per l'ingegneria idraulica.

InfoWorks CS è particolarmente facile da usare ma allo stesso tempo estremamente accurato e veloce nel calcolo. Questo permette di affrontare verifiche e progetti di qualsiasi estensione e complessità.

InfoWorks è in grado di utilizzare, importare ed esportare i files nei formati di uso comune nel settore, come: AutoCAD, ArcView/ArcGIS, MapInfo, Access, XLS ecc.

Grazie al software InfoWorks CS è stato creato il modello idraulico del reticolo irriguo, fermandosi al II ordine di derivazione. Il modello costruito è servito a calcolare i tempi di percorrenza delle particelle d'acqua nei comizi del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana (vedi appendice D).

Appendice B

MODELLO METEOROLOGICO

In questo paragrafo viene brevemente descritto il modello meteorologico utilizzato dal Centro Epson Meteo.

Il sistema di previsione mensile/stagionale è basato su un modello di circolazione globale (GCM) che utilizza una modellizzazione di ensemble e fornisce una previsione probabilistica sull'andamento delle variabili atmosferiche. Il GCM è alla base delle modellizzazioni su scala regionale e locale, attraverso un processo di innesto che permette di aumentare i dettagli su un'area limitata di interesse per le simulazioni. Il GCM ha una risoluzione operativa orizzontale a scala globale da 50 a 100 km. A scala regionale, invece, la risoluzione dei modelli può variare a seconda del dominio, da alcune decine di km ad 1 km. Per scopi di studio climatico e a lungo termine la risoluzione normalmente utilizzata è di 100-200 km.

Il punto di partenza nella previsione e nella stima delle precipitazioni nell'arco di 30 giorni in Pianura Padana (area in cui ricade pienamente il Consorzio Muzza Bassa Lodigiana) è quello di effettuare una previsione globale attraverso il modello WRF-ARW utilizzando un dominio di integrazione di 180x90 punti e 36 livelli verticali.

La complessità e la caoticità dell'atmosfera implicano l'inadeguatezza di una previsione deterministica per orizzonti temporali superiori agli 8-10 giorni; una metodologia che permette di tenere in considerazione l'errore iniziale presente nel campo di analisi, l'errore nel modello di previsione, e la loro evoluzione nel tempo è l'ensemble forecasting. Questa tecnica, attraverso la creazione e l'evoluzione nel

tempo di n stati iniziali perturbati, permette di studiare lo sviluppo della densità di probabilità associata agli stati atmosferici, consentendo di associare alla previsione di evoluzione dello stato medio anche una previsione di evoluzione della deviazione standard. Ciò implica il riconoscimento e l'individuazione di situazioni con un lungo orizzonte temporale di predicitività, e di situazioni con un orizzonte più ridotto. Questa metodologia è più dispendiosa a livello computazionale, in quanto richiede la costruzione di un insieme di previsioni, ma le potenzialità offerte fanno sì che oggi sia utilizzata nei maggiori centri mondiali di previsioni meteorologiche nel medio e lungo termine.

Un punto chiave dell'ensemble forecasting è la costruzione delle perturbazioni iniziali: esse devono essere ben rappresentative dell'errore presente nel campo di analisi, e contenere al loro interno i principali modi ed i principali stati presenti nell'atmosfera reale, i quali potrebbero poi evolvere nel tempo dando luogo a configurazioni molto diverse tra loro. Per ottenere ciò è stato messo a punto un sistema di stima dell'errore del campo di analisi attraverso lo studio dell'errore prodotto da previsioni a brevissimo termine da parte del modello WRF effettuate il giorno precedente alla data di inizializzazione del modello. Da questo errore vengono poi ricavati i 20 membri perturbati che costituiscono il nostro sistema di ensemble forecasting. Al termine delle simulazioni vengono calcolati il valore medio dei membri e la deviazione standard rispetto al valore medio, e su queste grandezze viene poi effettuato uno studio sia quantitativo che qualitativo (rappresentazione e confronto attraverso mappe dei principali campi di interesse).

Un altro importante punto è l'evoluzione delle temperature del mare, la quale diventa di fondamentale importanza in una previsione a scala globale su un intervallo temporale di 30 giorni. Il modello WRF, essendo costituito solamente da un modello atmosferico, non è in grado di far evolvere le temperature del mare, e di conseguenza è stato implementato un meccanismo che permette la loro evoluzione attraverso uno studio degli andamenti delle temperature stesse nei mesi precedenti. La logica delle previsioni ad ensemble è stata applicata anche al modello stesso, portando all'utilizzazione di più schemi fisici per i vari membri perturbati: questo permette di tenere in maggiore considerazione anche gli errori causati da un'imperfetta

schematizzazione dei processi fisici da parte del modello stesso. Sono soggetti a queste variazioni gli schemi riguardanti la microfisica e la convezione, dove per ciascun gruppo sono disponibili tre varianti diverse.

Il modello globale è indispensabile per effettuare una previsione a lungo termine senza dati al contorno provenienti da altri modelli, in quanto riesce a gestire l'evoluzione atmosferica e la dinamica dell'intero pianeta. Non è però possibile, a causa delle ingenti risorse di calcolo necessarie, effettuare simulazioni globali ad alta risoluzione, che permettano cioè di rappresentare in modo completo e preciso tutti i fenomeni a scala più piccola che possono avvenire nel dominio di integrazione. Le precipitazioni sono in particolar modo un parametro che risente moltissimo di effetti a piccola scala, come la convezione, l'influenza orografica, ecc. Il bacino del fiume Po comprende territori molto complessi a livello orografico, che possono essere considerati in modo preciso solamente con un'orografia ad alta risoluzione. Per questi motivi è necessario effettuare simulazioni su zone ristrette del territorio (nesting) ad una risoluzione più elevata rispetto alla simulazione globale, la quale fornisce le condizioni al contorno, in modo che l'evoluzione al loro interno sia dettata dall'evoluzione termica e dinamica che avviene a scala globale. In questo modo è possibile focalizzare l'attenzione su aree locali, le quali possono essere studiate ad alta risoluzione con un esiguo dispendio di risorse di calcolo. La tipologia di nesting utilizzata è stata quella dell'integrazione continua del dominio locale all'interno del dominio più grande: la simulazione locale viene inizializzata una sola volta con i dati iniziali, ed in seguito prosegue utilizzando ogni 12 ore i dati al contorno forniti dal dominio genitore. Sono stati effettuati due diversi test variando le dimensioni e il numero dei domini locali utilizzati. Nel primo test è stato creato un solo dominio locale (comprendente Italia del nord, parte dell'Italia centrale, Svizzera, Austria e Francia) inserito direttamente nel dominio globale, con una risoluzione pari a circa 18 km. Nel secondo test sono stati creati due diversi domini: il primo è un dominio comprendente il Mediterraneo occidentale con Francia e Germania, con una risoluzione di 44 km, il secondo è un dominio inserito nel dominio europeo appena citato, e comprendente solamente il nord Italia, con una risoluzione di circa 17 km. La differenza tra i due domini a maggior risoluzione risiede quindi nel fatto che nel

secondo caso vi è un passaggio intermedio, costituito da un dominio europeo, il quale dovrebbe facilitare il rilassamento dei dati nel passaggio dalla bassa all'alta risoluzione (il secondo caso è ovviamente più dispendioso in termini computazionali). I due diversi approcci sono esposti in Figura B.1 e in Figura B.2 rispettivamente.

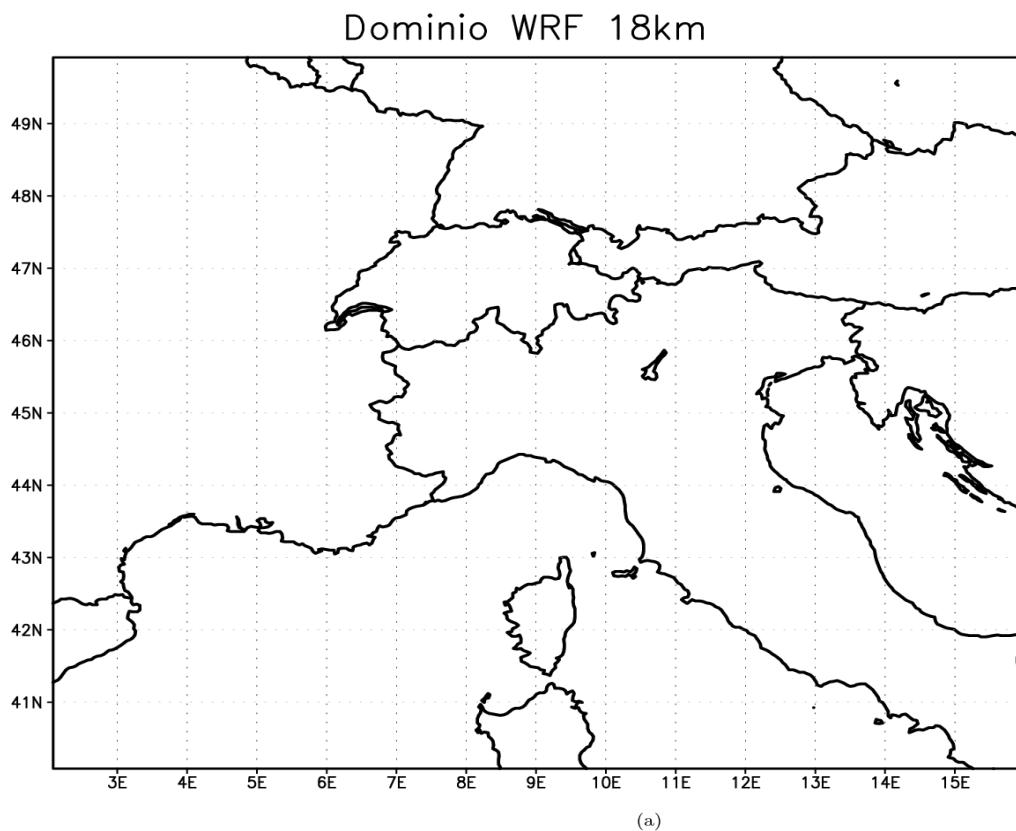


Figura B.1 Domini locali utilizzati per le simulazioni – innesto diretto

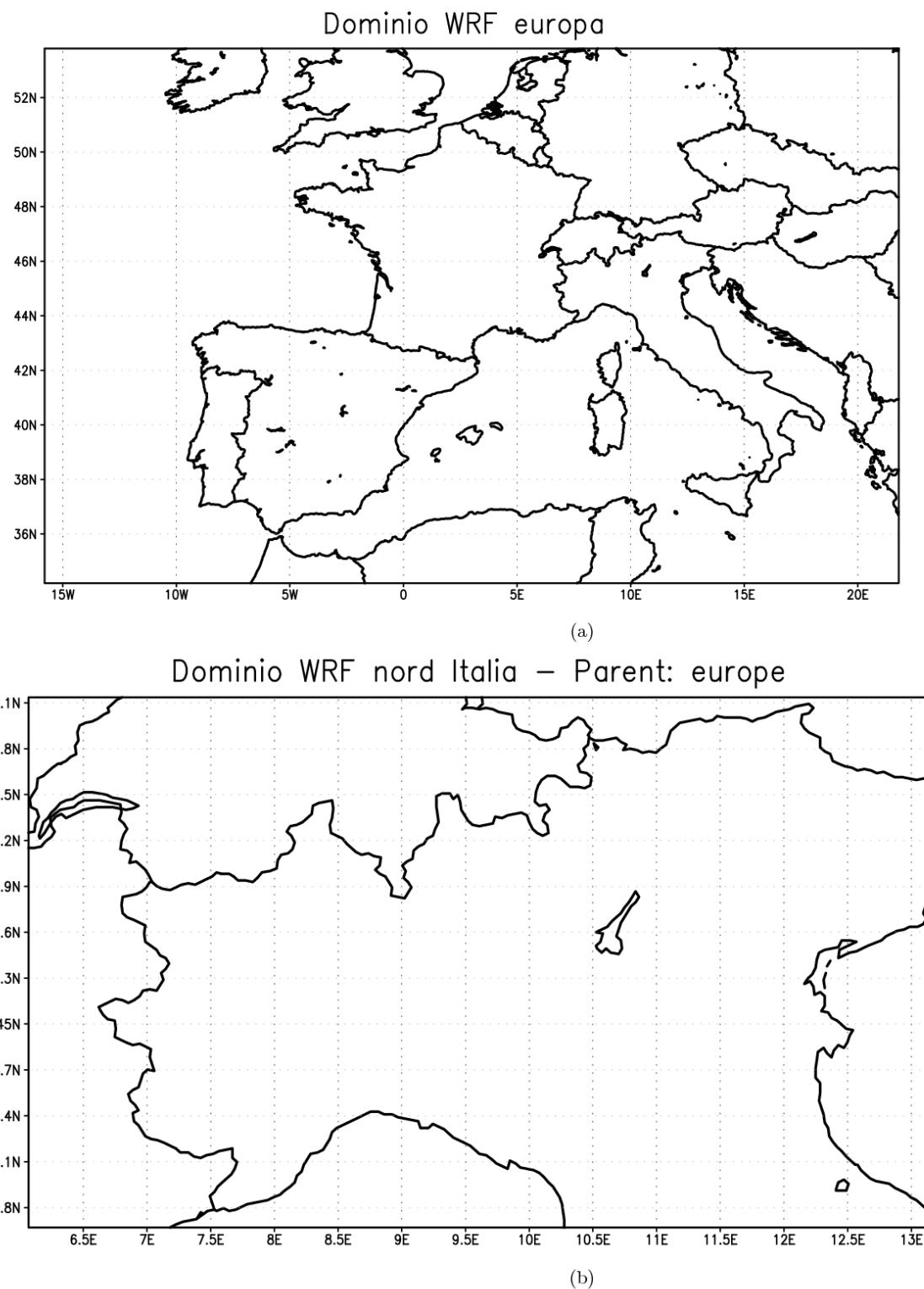


Figura B.2 Domini locali utilizzati per le simulazioni – Europa + Nord Italia

Appendice C

MODELLO IDROLOGICO

Il modello idrologico distribuito utilizzato in questo studio è il FEST-EWB, il quale si propone di stimare in modo integrato gli afflussi-deflussi, basandosi sull'equazione di bilancio idrologico (Figura C.1). Se una parte di precipitazione viene rifiutata dal terreno e/o se il contenuto d'acqua introdotto nell'elemento terreno supera il valore di saturazione, allora è sede di deflusso superficiale.

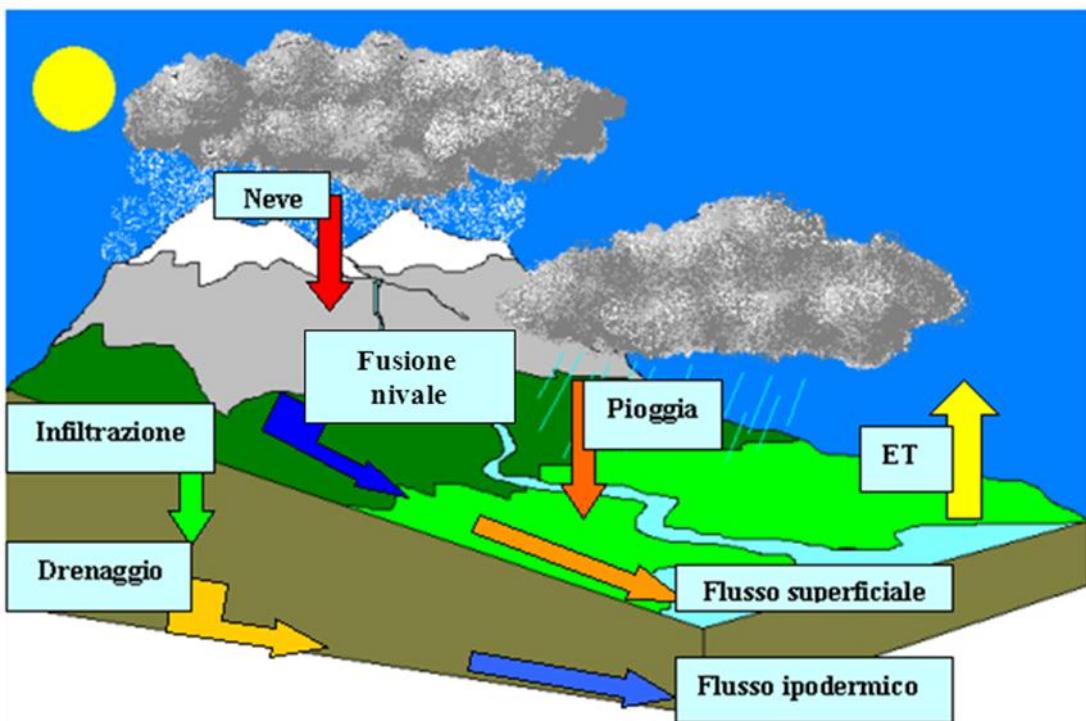


Figura C.1 Modello di bilancio idrologico.

L'acronimo FEST-EWB (acronimo di Flash – flood Event – based Spatially – distributed rainfall – runoff Transformation based on Energy and Water Bilance equation), ed è stato interamente sviluppato nel corso degli ultimi 20 anni dal Politecnico di Milano (Mancini, 1990; Corbari et al., 2010).

Il modello studiato è un modello dinamico, spazialmente distribuito, identificato da una griglia regolare. I modelli a parametri distribuiti tentano di riprodurre, con opportune semplificazioni, l'effettivo funzionamento del bacino nelle varie componenti elementari in cui viene discretizzato. I modelli distribuiti sono perciò quei modelli matematici che tengono conto della variabilità spaziale delle proprietà del bacino considerando distribuiti su tutta la sua area sia le variabili che i parametri del modello. In questi casi, si usa una scomposizione del bacino di tipo raster (griglia), suddividendolo in celle elementari (pixel) di forma quadrata, ottenendo una risoluzione spaziale elevata (200 m di lato). Rispetto al modello concentrato, dove il sistema bacino viene considerato un tutt'uno, nel caso di modello distribuito le forzanti e le variabili di stato del sistema vengono mediate su tutta l'area del bacino.

L'applicazione del modello richiede quindi una preliminare fase di acquisizione e pre-elaborazione dell'informazione che in questo modo viene portata nel formato raster (Figura C.2).

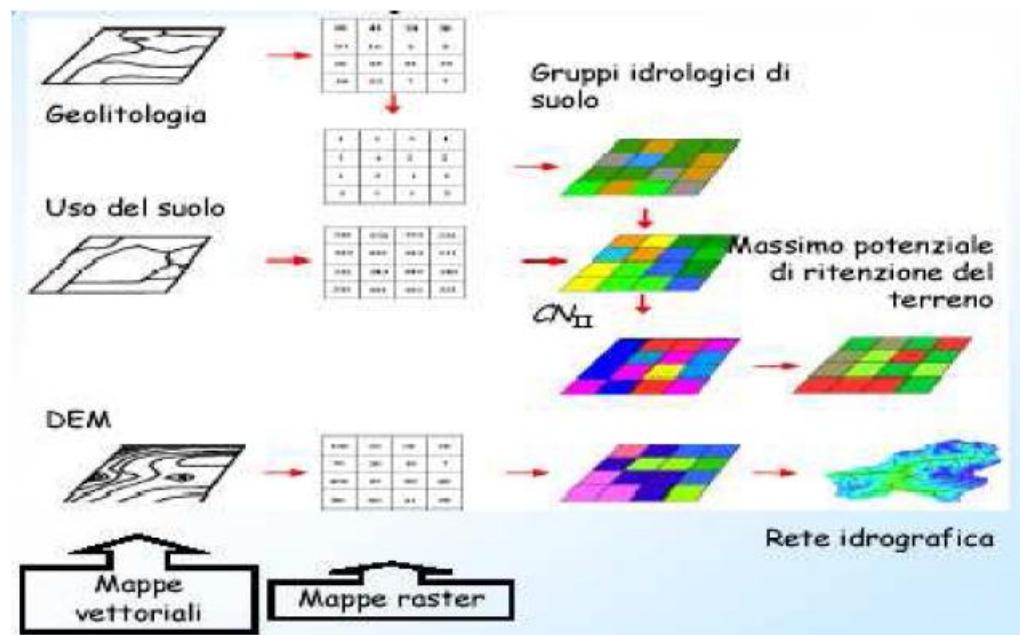


Figura C.2 Informazione spazialmente distribuita per la costruzione del modello di bilancio idrologico.

L'uso di un modello distribuito richiede l'acquisizione di una grande quantità di dati: il numero totale dei parametri in gioco sarà, infatti, dato dal numero delle grandezze usate per descrivere la singola cella elementare, moltiplicato per il totale delle celle presenti. Questa notevole mole di lavoro favorisce però una più accurata descrizione dei fenomeni, soprattutto dal momento che è stato evidenziato (Brath, 1995, Rosso et al., 1994) come la variabilità spaziale dei processi in gioco (assorbimento, propagazione, ecc.) abbia una grande influenza sulla risposta del bacino.

Gli input del sistema sono costituiti da misurazioni in punti noti (pluviometri) delle altezze di pioggia cumulate in step temporali fissati. Il modello provvede poi a calcolare la pioggia come dato spazialmente continuo, su tutte le celle del bacino, utilizzando il metodo della distanza inversa e stima poi, sulla base degli afflussi lordi, gli afflussi netti, implementando un modello di assorbimento del terreno (USDA-

SCS Curve Number del Soil Conservation Service, 1986). La propagazione delle portate di ruscellamento, ottenute a valle del processo di depurazione degli afflussi lordi, avviene col metodo di Muskingum, nella forma proposta da Cunge (1969). Si ottiene, in questo modo, il dato di portata, al variare del tempo, in punti fissati (generalmente alla chiusura del sottobacino di interesse), che costituisce l'output del sistema.

Di seguito si riportano i vari blocchi, evidenziati in Figura C.3, usati nel calcolo delle variabili del modello FEST-EWB.

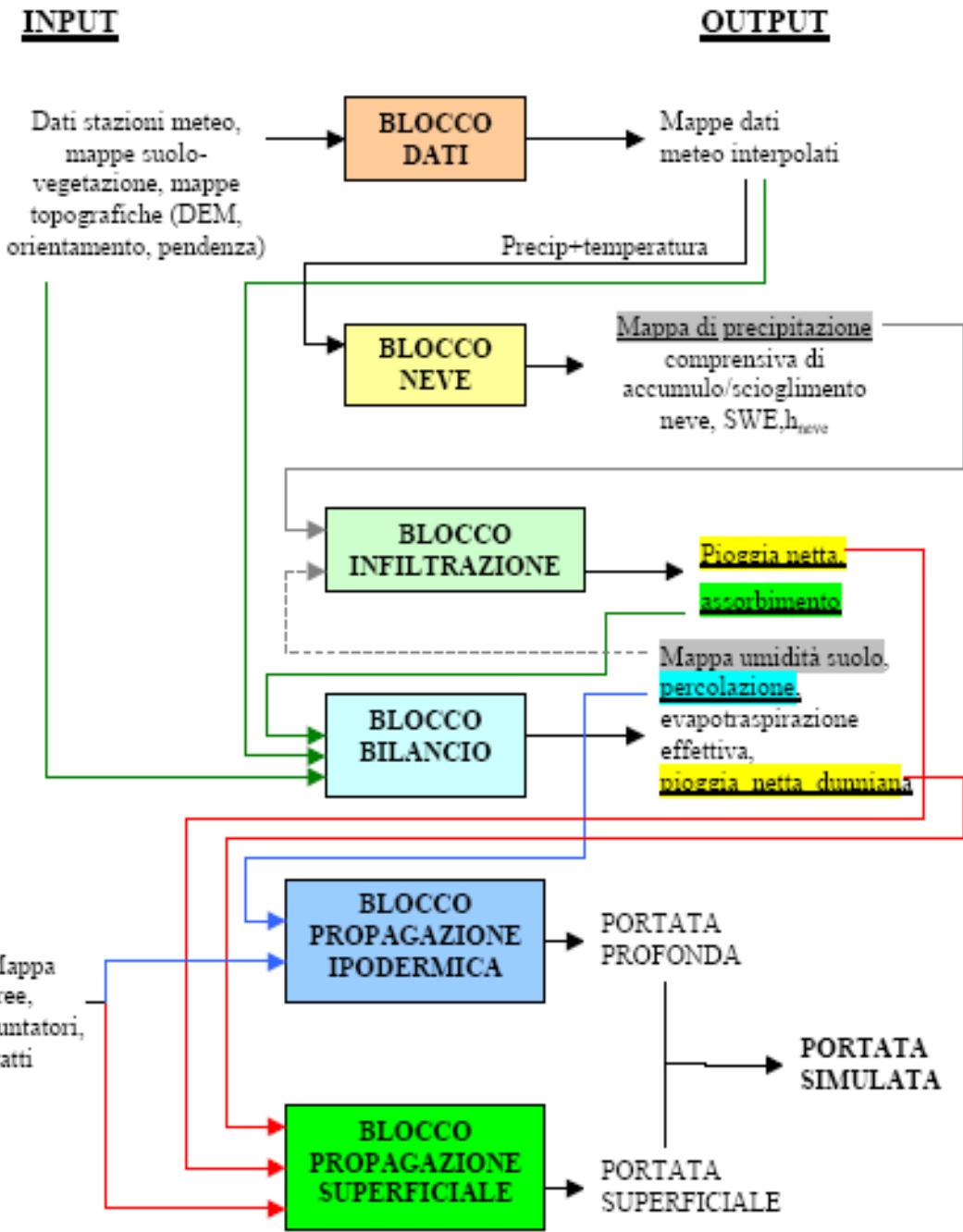


Figura C.3 Struttura del modello idrologico FEST-EWB

C.1 BLOCCO DATI

In questa parte di calcolo del programma viene eseguita l'estrapolazione delle misure dei dati meteorologici registrati dalla stazione meteo per ciascuna cella in cui è suddiviso il bacino.

Il modello necessita, inoltre, dell'impiego di dati spazialmente distribuiti, come mappe del suolo, di vegetazione e mappe topografiche (DEM, orientamento, pendenza), usati anch'essi come input del modello. Si ottengono così mappe di pioggia e temperatura, le quali, insieme alla mappa di ETP (EvapoTraspirazione Potenziale), costituiscono l'output del blocco meteo.

C.1.1 Dati meteo

Si estrapolano le misure dei dati meteorologici registrati dalle stazioni meteorologiche per ciascuna cella in cui è suddiviso il bacino. Questo blocco necessita in ingresso degli input topografici e le misure dei seguenti dati meteorologici:

- Temperatura dell'aria (°C)
- Precipitazione (mm)
- Irrigazione (mm)

TEMPERATURA: la temperatura dell'aria nelle vicinanze della superficie risulta fondamentale, per esempio, per il calcolo dei flussi di energia scambiati dal terreno con l'atmosfera, o per il calcolo della fusione nivale.

Per poter distribuire la temperatura all'interno del bacino rilevata dai sensori è stato utilizzato un gradiente termico che permette di valutare come varia la temperatura con la quota: si utilizza un gradiente costante pari a 6.5°C ogni 1000 m di quota, in

questo modo però, non si tengono in considerazione eventi di inversione termica che posso essere frequenti nei bacini montani.

PRECIPITAZIONE: il dato spaziale di precipitazione deve essere rappresentativo dell'intero bacino di interesse. Essendo la precipitazione (“pioggia + neve”), in genere, spazialmente variabile sul bacino, è necessario definire un metodo di ragguaglio del dato di precipitazione osservato o previsto. L’interpolazione dei pluviometri nel modello FEST-EWB avviene col metodo della distanza inversa.

IRRIGAZIONE: per ogni singolo comizio si è creata una matrice di irrigazione che tenesse conto della turnazione irrigua come input (si veda il paragrafo 4.1) per ulteriori dettagli su come è stata costruita la ruota irrigua. Pertanto l’apporto idrico previene sia dalla pioggia (osservata e prevista) sia dall’irrigazione a scala di comizio.

C.1.2 Dati suolo e vegetazione

Un supporto fondamentale è costituito dal modello digitale delle quote del terreno (Digital Elevation Model – DEM), che fornisce il valore della quota media per ogni cella elementare in cui è suddiviso il bacino d’interesse. Partendo dalla matrice delle quote è possibile, tramite software ArcGis, ricavare la pendenza e l’esposizione di ciascuna cella: dati necessari per caratterizzare al meglio il bacino.

C.2 BLOCCO NEVE

Il modello considera anche la componente di fusione nivale, essenziale per migliorare la stima delle portate nei corsi d’acqua, ottenute a partire dai dati pluviometrici e meteorologici.

Il blocco neve riceve in ingresso le mappe di precipitazione e temperatura, output del blocco dati, e fornisce in uscita l’altezza di neve (h_s), la mappa di precipitazione

completa dell'accumulo e della fusione della neve e l'equivalente idrico della neve SWE (Snow Water Equivalent). In particolare quest'ultimo parametro, che rappresenta l'altezza d'acqua che deriverebbe dalla totale fusione del manto nevoso, è legato allo spessore effettivo del manto dalla relazione (C.1):

$$swe = h_s (\rho_s / \rho_w) \quad (C.1)$$

dove ρ_w è la densità dell'acqua e ρ_s quella della neve fresca.

Per la neve fresca si può generalmente utilizzare un valore di densità (ρ_s) pari a 100 kg/m³, anche se in realtà questo valore è influenzato da alcuni fattori ambientali, tra i quali la velocità del vento e la temperatura dell'aria. In particolare, vari esperimenti hanno evidenziato come la densità della neve vari nello spazio e nel tempo persino all'interno di un singolo evento atmosferico.

C.2.1 Modello di accumulo utilizzato

La precipitazione atmosferica viene misurata dal pluviometro che fornisce i millimetri di pioggia, qualora la precipitazione fosse liquida, oppure gli equivalenti in acqua se la precipitazione cadesse sotto forma di neve. Questo avviene grazie alla presenza all'interno dello strumento, di un sistema di riscaldamento che permette di fondere la neve contenuta e misurarne l'equivalente. Purtroppo non tutte le stazioni presenti sul territorio studiato dispongono di tale sistema di riscaldamento, comportando numerose sottostime in termini di volume di precipitazione nei mesi invernali. Come fattore principale per la determinazione della natura della precipitazione, viene utilizzata la temperatura atmosferica (T_a), dal momento che controlla l'eventuale transizione dallo stato solido a quello liquido dei fiocchi di neve durante la loro caduta.

Il campo di precipitazione viene ricostruito attraverso l'uso di un modello che tenga conto della possibilità di un evento meteorico misto (presenza contemporanea di pioggia e neve).

Data la rilevazione pluviometrica e termometrica, si ipotizza di costruire il modello di accumulo, utilizzando la seguente equazione (C.2) (Tarboton, 1994):

$$\begin{aligned} P_l &= \alpha_p \cdot P \\ P_s &= (1 - \alpha_p) \cdot P \end{aligned} \quad (C.2)$$

dove P [mm], rappresenta l'equivalente della precipitazione, P_l e P_s rispettivamente la precipitazione di tipo liquido e solido e α_p il fattore di separazione dello stato liquido-solido. Quest'ultimo risulta dipendente dalla temperatura secondo questa relazione (C.3):

$$\begin{array}{ll} \alpha_p = 0 & T_a < T_{\text{inf}} \\ \alpha_p = \frac{T_a - T_{\text{inf}}}{T_{\text{sup}} - T_{\text{inf}}} & T_{\text{inf}} < T_a < T_{\text{sup}} \\ \alpha_p = 1 & T_a > T_{\text{sup}} \end{array} \quad (C.3)$$

in cui T_a rappresenta la temperatura dell'aria, mentre T_{inf} e T_{sup} sono rispettivamente la temperatura al di sotto della quale si ha solo neve e la temperatura al di sopra della quale si ha solo pioggia (Figura C.4).

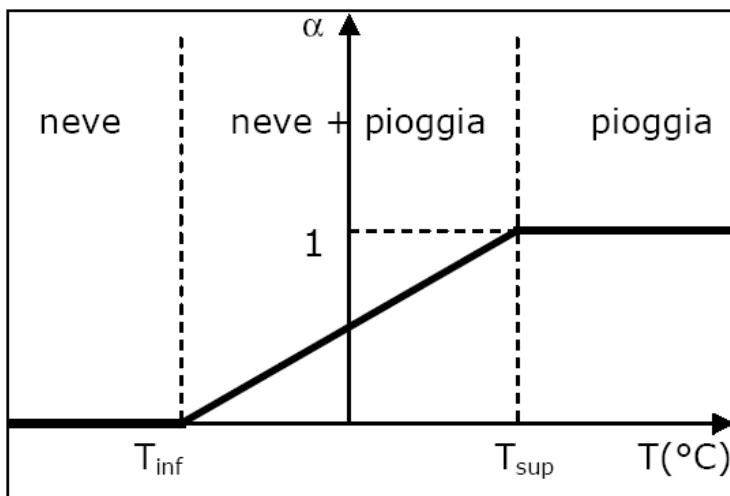


Figura C.4 Legame tra temperatura e formazione della neve.

C.2.2 Modello di fusione

Definire correttamente la quantità di neve che si fonde è importante ai fini del calcolo del deflusso totale del bacino.

Per effettuare una stima corretta della fusione nivale occorre conoscere la variabilità spaziale dei flussi di calore nonché le caratteristiche della neve; la possibile mancanza di queste informazioni ha portato allo sviluppo di modelli che operano su un indice ben specifico; in genere viene utilizzata la temperatura, grazie alla vasta disponibilità di dati e al suo ruolo predominante nel calcolo del bilancio energetico della neve.

Il tasso di fusione [m/s], ovvero la quantità d'acqua prodotta dalla fusione nell'unità di tempo, è stimata secondo l'equazione (C.4)**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.:**

$$M_s = C_m (T_a - T_b) \quad (\text{C.4})$$

dove T_b è la temperatura di base, mentre T_a è quella dell'aria. C_m rappresenta un fattore moltiplicativo di natura empirica, i cui valori variano generalmente tra $4.8 \cdot 10^{-8}$ [$\text{m} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$] e

$6.9 \cdot 10^{-8}$ [m $^{\circ}\text{C}^{-1}\text{s}^{-1}$] in funzione delle condizioni geografiche, meteorologiche e delle proprietà del manto nevoso; nella sua definizione C_m tiene conto di tutti i fattori fisici non inclusi nel modello.

La temperatura di base è la soglia oltre la quale avviene la fusione, e viene normalmente posta pari a 0°C . I valori di T_b e di C_m utilizzati, sono stati ricavati dalla taratura del modello.

C.3 BLOCCO INFILTRAZIONE

All'interno di questo blocco, che riceve in ingresso i dati di umidità del suolo per ogni intervallo dt , viene calcolato il parametro S , quando si verifica un evento piovoso. Tale parametro, mantenuto costante durante tutto l'evento, viene utilizzato dal blocco di bilancio per ricavare il ruscellamento e la percolazione in ogni istante dt .

Per stimare l'infiltrazione, viene utilizzato il metodo SCS-CN adattato alle simulazioni continue (Ravazzani et al. 2007); ciò significa che il valore di umidità (θ) non viene riferito ai cinque giorni precedenti l'evento, ma viene assunto come il valore all'inizio della precipitazione. Questo risulta possibile grazie all'aggiornamento del valore di umidità, ad ogni step di calcolo.

A partire dal valore di umidità, si ricava poi la saturazione (θ_t), tramite la formula
Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. :

$$\varepsilon_t = \frac{\theta_t - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}}$$

Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.

dove θ_{sat} rappresenta l'umidità a saturazione, mentre θ_{res} corrisponde all'umidità residua.

Si ottiene quindi un valore di θ_t ad ogni step di calcolo, con cui si calcola il parametro S (C.6):

$$S_t = S_1(1 - \varepsilon_t) \quad (\text{C.6})$$

In questo modo il parametro S risulta essere compreso nell'intervallo $(0 \div S_1]$, non limitato inferiormente per tenere conto della condizione di terreno completamente saturo.

C.4 BLOCCO DEL BILANCIO IDROLOGICO

Il blocco di bilancio riceve in ingresso le mappe di pioggia e temperatura e quella di evapotraspirazione potenziale (ETP), da cui si calcola la matrice di evapotraspirazione effettiva (ET_{eff}); in ingresso riceve inoltre il termine di infiltrazione ottenuto per ogni cella in cui è diviso il bacino.

Il modello, in questa fase, aggiornando in ogni istante t il valore dell'umidità del suolo (θ), calcola il ruscellamento e la percolazione sia che si verifichi o meno l'evento di pioggia. In particolare, il modello considera come istante effettivo d'inizio dell'evento piovoso quello in cui riceve in ingresso un dato di pioggia diverso da zero. Da questo istante inizia il computo della pioggia cumulata e la misurazione della durata dell'evento.

Successivamente il modello ricalcola la riserva idrica nel suolo (θ), misurando le voci in entrata (precipitazioni depurate dalle perdite ed evapotraspirazione) e quelle in uscita (ruscellamento e percolazione) nell'istante $t+1$.

L'equazione del bilancio idrico (esplicitata rispetto al termine di umidità del suolo θ) assume la seguente forma (C.7):

$$\theta_{t+1} = \theta_t + \frac{(1 - D - ET)}{Z} \quad (\text{C.7})$$

dove:

- I [m/s] = infiltrazione ottenuta come differenza tra pioggia liquida e ruscellamento superficiale;
- D [m/s] = contenuto d'acqua perso per percolazione o drenaggio, calcolato mediante l'equazione (C.8):

$$D = K_{sat} \left(\frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{\frac{2+3B}{B}} \quad (C.8)$$

dove B è il coefficiente di Brooks & Coorey;

- ET [m/s] = rate di evapotraspirazione
- Z [m] = spessore dello strato di terreno considerato

C.5 BLOCCO DI PROPAGAZIONE DEL DEFLUSSO SUPERFICIALE

Questo blocco riceve in ingresso la pioggia netta, output del blocco infiltrazione, la pioggia dunniana e le mappe dei tratti, dei puntatori e delle aree, fornendo in uscita la portata superficiale. Se l'umidità del terreno è superiore alla sua massima capacità di ritenzione, allora la parte in eccesso va a costituire il deflusso superficiale. A questa va aggiunta la quota parte di pioggia rifiutata dal terreno. Il metodo adottato è quello di Muskingum-Cunge nella sua forma non lineare.

C.6 BLOCCO DI PROPAGAZIONE DEL DEFLUSSO IPODERMICO

Il blocco riceve in ingresso la percolazione output del blocco di bilancio e la mappa delle aree, dei puntatori e dei tratti. In uscita fornisce la portata profonda che, sommata a quella del deflusso superficiale, fornisce l'idrogramma di sezione.

L'acqua che riesce a percolare nel terreno si propaga seguendo il modello di Muskingum-Cunge, nella sua forma non lineare, analogamente a quanto accennato per il deflusso superficiale, ma con alcuni accorgimenti.

Generalmente viene utilizzato un peso ε che rappresenta l'influenza relativa della portata entrante e di quella uscente. Essendo però il deflusso ipodermico molto lento a propagarsi, si può considerare che la portata entrante non abbia nessuna influenza su quella uscente, per cui $\varepsilon = 0$.

C.7 MODELLAZIONE DEGLI ACQUIFERI

Il modello per la simulazione degli acquiferi è un modello alle differenze finite, esplicito, basato sulla legge di conservazione della massa, capace di trattare acquiferi eterogenei, isotropi, multistrato.

L'aggiornamento piezometrico viene eseguito mediante l'equazione di conservazione della massa (C.9):

$$h^{t+1} - h^t = \frac{(Q_{orizzontale} + Q_{verticale})}{(\Delta x)^2 \cdot n_e} \Delta t + \frac{(Q_{scambio})}{n_e} \Delta t \quad (\text{C.9})$$

dove Δh rappresenta la variazione dell'altezza piezometrica [m], $Q_{orizzontale}$ i flussi orizzontali tra celle adiacenti [m^3/s], $Q_{verticale}$ i termini di ricarica o la portata emunta dal pozzo [m^3/s], $Q_{scambio}$ i termini di scambio attraverso gli acquitardi [m/s], n_e la porosità efficace, Δx la dimensione della singola cella [m], Δt il passo di calcolo [s].

Per il calcolo dei flussi orizzontali è necessario effettuare, innanzi tutto, il calcolo della trasmissività locale, funzione del tipo dell'acquifero.

Per acquifero non confinato, la trasmissività è definita come (C.10):

$$T = k_s(h_t - bottom) \quad (\text{C.10})$$

con h_t l'altezza piezometrica [m] al passo temporale t , k_s conducibilità idraulica dello strato saturo [m/s], $bottom$ quota della base dello strato [m].

In presenza di un acquifero confinato, in cui la falda è limitata inferiormente e superiormente da livelli impermeabili, il valore di trasmissività è dato da (C.11)**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**:

$$T = k_s(top - bottom) \quad (\text{C.11})$$

in cui top [m] rappresenta la quota dello strato superiore.

A questo punto è possibile calcolare i valori di trasmissività della cella centrale e di quelle adiacenti, effettuando una media armonica (C.12):

$$\begin{aligned} T_{NC} &= \frac{2 \cdot T(i, j) \cdot T(i-1, j)}{T(i, j) + T(i-1, j)} \\ T_{SC} &= \frac{2 \cdot T(i, j) \cdot T(i+1, j)}{T(i, j) + T(i+1, j)} \\ T_{EC} &= \frac{2 \cdot T(i, j) \cdot T(i, j+1)}{T(i, j) + T(i, j+1)} \\ T_{OC} &= \frac{2 \cdot T(i, j) \cdot T(i, j-1)}{T(i, j) + T(i, j-1)} \end{aligned} \quad (\text{C.12})$$

Per convenzione è stato considerato un flusso positivo se entrante nella cella centrale, negativo se uscente. La sommatoria dei flussi orizzontali sarà perciò uguale a

(C.13)**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**:

$$\begin{aligned} Q_{orizzontale} = & T_{NC} \cdot [h_t(i-1, j) - h_t(i, j)] + T_{SC} \cdot [h_t(i+1, j) - h_t(i, j)] + \\ & + T_{EC} \cdot [h_t(i, j+1) - h_t(i, j)] + T_{OC} \cdot [h_t(i, j-1) - h_t(i, j)] \end{aligned} \quad (C.13)$$

Per gli scambi attraverso gli acquitardi, si utilizza l'equazione di Darcy (C.14):

$$Q_{scambio} = \frac{K_{S,SETTO}(i, j) \cdot [h_t(k+1) - h_t(k)]}{[bottom(k) - top(k+1)]} \quad (C.14)$$

dove $k_{S,Setto}$ rappresenta la conducibilità idraulica dell'acquitardo [m/s], h_t rappresenta l'altezza piezometrica al passo di calcolo [m], $bottom(k)$ rappresenta la base dello strato [m], $top(k+1)$ rappresenta il limite superiore dello strato inferiore [m].

C.7.1 Interazione falda fiume

L'implementazione del modello di falda nel modello FEST-EWB permette di analizzare un aspetto non trascurabile nei processi idrologici: la reciproca influenza che sussiste tra un corso fluviale e l'acquifero.

Il flusso che si instaura tra il corso d'acqua e l'acquifero è descritto mediante la legge di Darcy. Il fiume è schematizzato mediante l'uso di celle, all'interno delle quali la sezione del fiume si mantiene costante. La portata scambiata tra il fiume e l'acquifero risulta essere pari a (C.15):

$$Q = \frac{k_s \cdot L \cdot w}{B_T} (H_d - Y - B_E) \quad (C.15)$$

oppure, evidenziando i termini piezometrici della falda e del corso d'acqua (C.16):

$$Q = \frac{k_s \cdot L \cdot w}{B_T} (h_{falda} - h_{fiume}) \quad (C.16)$$

con Q portata scambiata [m^3/s], k_s permeabilità dell'alveo [m/s], H_d altezza dell'acquifero nella cella [m], Y profondità media del fiume [m], B_E altezza media del letto del fiume [m], B_T spessore del letto del fiume [m], w larghezza bagnata del fiume in sommità [m], L lunghezza del tratto di fiume [m], h_{falda} carico piezometrico della falda [m s.l.m.], h_{fiume} livello idrico del fiume [m s.l.m.].

Il problema di interazione (Figura C.5) è schematizzato considerando un solo flusso attraverso il letto del fiume, senza tener conto dei flussi attraverso le pareti laterali e il fondo alveo. Si approssima il perimetro bagnato della sezione con la larghezza bagnata del fiume in sommità, w . In particolare si è imposto che, quando l'altezza dell'acquifero è inferiore al fondo del letto del fiume la percolazione dal fiume all'acquifero sottostante non dipende dall'altezza di falda ma solo dal tirante idrico. Si assume che il flusso attraverso il letto del fiume sia traslato direttamente alla falda senza ritardo e che la percolazione non superi la conducibilità idraulica satura dei depositi che occupano l'intervallo tra il livello di falda e il letto del fiume. Tali ipotesi sono realisticamente accettabili quando lo spessore del suolo insaturo è piccolo o il gradiente idraulico attraverso il letto del fiume non supera di molto l'unità.

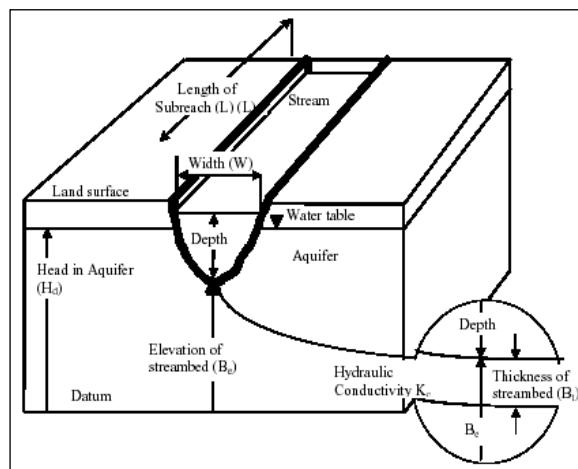


Figura C.5 Schema di una cella del modello di falda con indicate le proprietà principali usate nel calcolo del flusso scambiato tra un fiume e un acquifero

Per ulteriori dettagli sul funzionamento del modello idrologico si rimanda alla letteratura pubblicata (Rabuffetti et al., 2008; Corbari et al., 2007; Montaldo et al., 2007; Ravazzani et al., 2007).

Appendice D

IL MODELLO IDRAULICO

In questa sezione viene descritta la costruzione del modello idraulico della rete irrigua principale del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana. Il software che è stato utilizzato è InfoWorks CS® .

I dati necessari alla definizione del modello sono stati:

- sezione dei canali;
- pendenza dei canali;
- scabrezza;
- perdite di infiltrazione;
- immissione di portata;
- condizione al contorno di valle

Sezione dei canali

Da Cassano d'Adda a Paullo (da progressiva km 0.00 a progressiva km 18.00) il Canale Muzza ha l'aspetto di un fiume. I paramenti di sponda sono o naturali costituiti da materiale anche grossolano, o manufatti con ciottoloni posati a secco (classico selciato); il fondo è completamente naturale composto da materiale grossolano. Le sezioni, ampie, hanno forma trapezia. Le portate possono raggiungere valori di 110 m³/s e i tiranti idrici raggiungono e superano anche 3.00m.

Di seguito in figura D.1 viene riportata la sezione tipica del Canale Muzza nel tratto da Cassano d'Adda a Paullo.



Figura D.1 Sezione tipica del Canale Muzza da Cassano d'Adda a Paullo

Per quanto riguarda il tratto che va da Paullo al manufatto terminale (da progressiva km 18.00 a progressiva km 39.00) il canale mantiene le caratteristiche fluviali anche se con dimensioni inferiori al tronco iniziale. I paramenti di sponda sono o naturali costituiti da materiale sciolto anche

grossolano, o manufatti con rivestimenti in materiale naturale permeabile; il fondo è completamente naturale composto da materiale sciolto anche grossolano. Le sezioni, ampie, hanno forma trapezia. Le portate massime possono raggiungere valori di 80 m^3/s , quelle medie di 60 m^3/s e le profondità sono variabili da 1.60 a 2.00m.

Viene riportata in figura D.2 la sezione tipica del Canale Muzza nel tratto da Paullo al manufatto terminale in località Tripoli in comune di Massalengo.

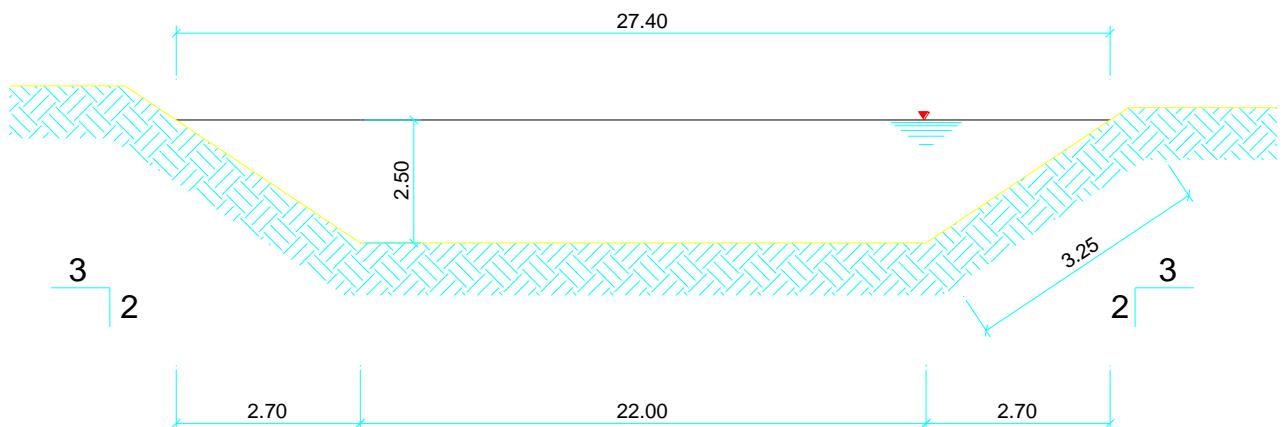


Figura D.2: Sezione tipica del Canale Muzza nel tratto da Paullo al manufatto terminale in località Tripoli in comune di Massalengo

La sezione tipica dei derivatori primari e di quelli secondari è di forma trapezia con scarpata 1/1.

Pendenza dei canali

E' stata adottata una pendenza media dell'1‰ circa per il canale Muzza; dello 0.3-0.4‰ per i derivatori primari, e dello 0.25 ‰ per quelli secondari.

Scabrezza

E' stato scelto come coefficiente di scabrezza di Strickler k_s un valore pari a $45 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per il Canale Muzza, un valore di $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per derivatori primari e un valore di $27 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ per i derivatori del secondo ordine.

Immissione di portata

Il Canale Muzza all'altezza di Cassano d'Adda deriva dal fiume Adda una portata di $110 \text{ m}^3/\text{s}$.

Per questo motivo nel software InfoWorks CS le simulazioni sono state eseguite attribuendo al nodo di monte un'immissione di portata costante di 110 m³/s.

Condizione al contorno di valle

A Tripoli di Massalengo termina il Canale Muzza dando luogo con un salto di fondo di circa 2.00 m all'omonimo colatore.

Il colatore Muzza in estate (periodo in cui si irriga maggiormente) ha una portata di circa 3.5 m³/s e un livello d'acqua pari a 40 cm circa. Quindi, in InfoWorks CS sono state attribuite queste informazioni al nodo terminale del Canale Muzza per creare la condizione al contorno di valle.

Le bocche di presa addotte ai derivatori sono state tarate con il software InfoWorks CS, facendo riferimento alle portate di concessione dei derivatori primari e secondari, riportate nella Tabella 3.5.

Grazie ai dati sopra descritti, è stato quindi possibile ricavare il profilo idraulico del Canale Muzza da Cassano d'Adda fino al manufatto terminale in località Tripoli nel comune di Massalengo (Figura D.3 e Figura D.4); tali acquisizioni sono state verificate anche con sopralluoghi sul campo. Come precedentemente detto, alla frazione di Tripoli nel comune di Massalengo termina il Canale Muzza, dando luogo con un salto di fondo di circa 2 m all'omonimo colatore, il quale a sua volta dopo un percorso di quasi 20 km defluisce in Adda nei pressi del comune di Castiglione d'Adda.

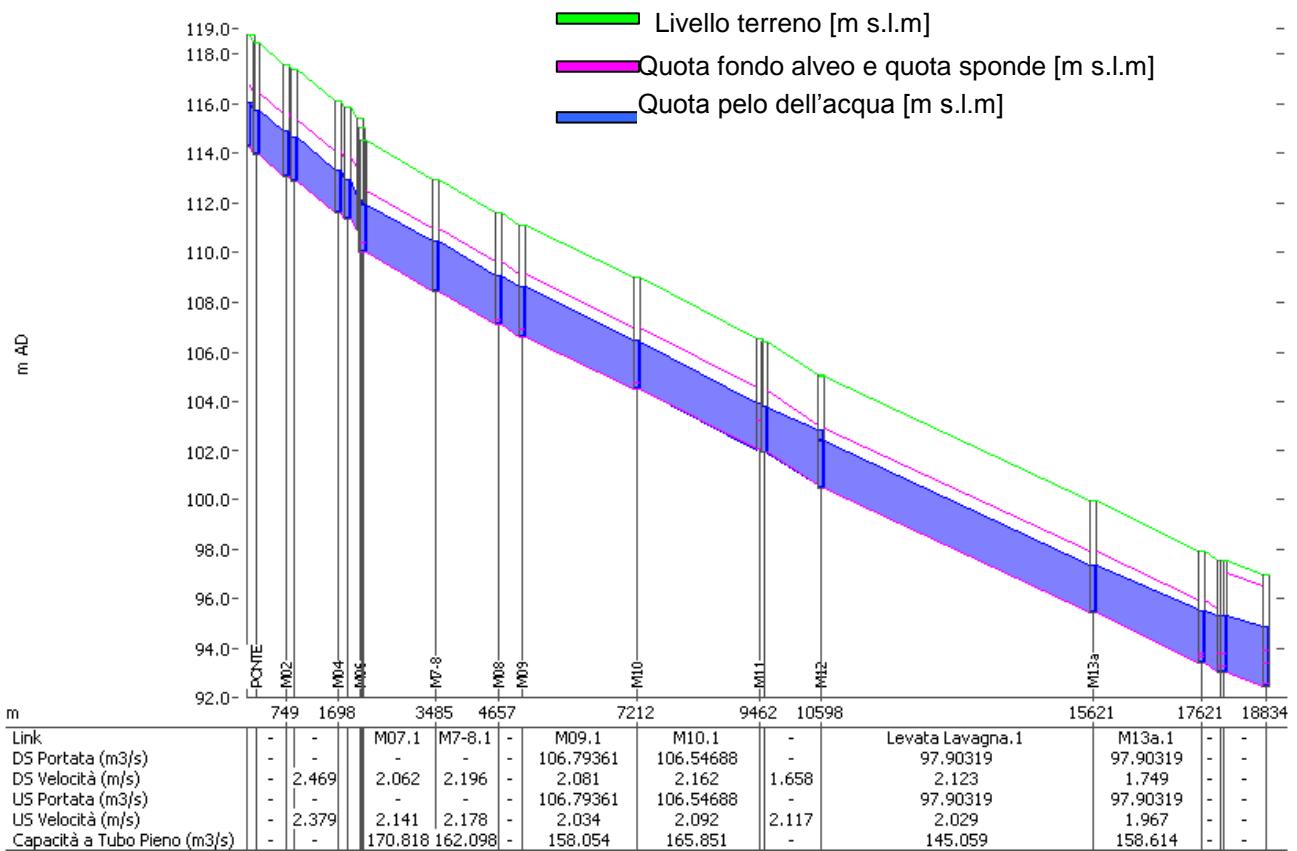


Figura D.3 Profilo idraulico del Canale Muzza da Cassano d'Adda a Paullo

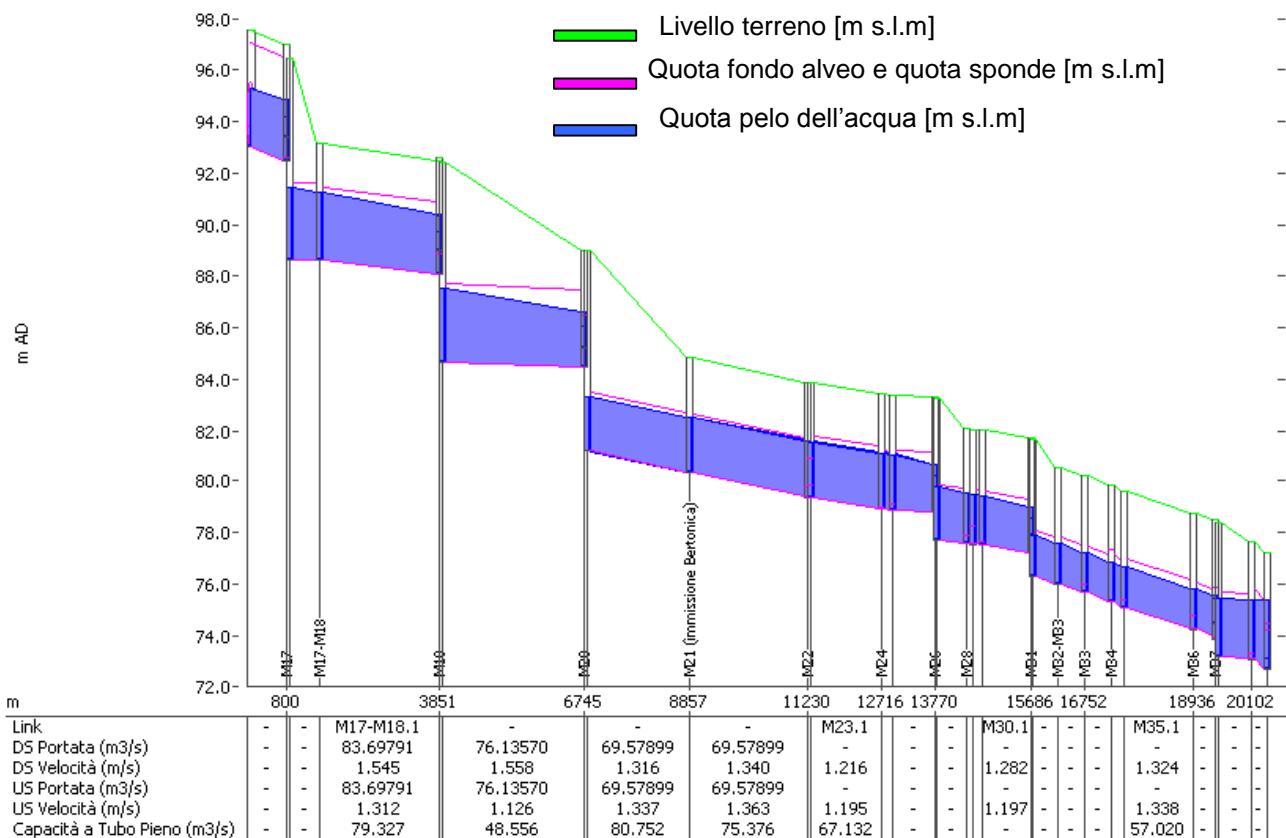


Figura D.4 Profilo idraulico del Canale Muzza da Paullo al manufatto terminale in località Tripoli di Massalengo.

In corrispondenza del termine del canale è ubicato un manufatto idraulico di distribuzione, regolazione e scarico delle portate composto come segue:

- tre paratoie per la distribuzione delle acque irrigue ai canali Vigana e Lanfroia sulla sponda destra e Carpano su quella sinistra;
- una paratoia di fondo che permette di svuotare l'alveo del canale nel tratto di monte sino al manufatto della località Priora;
- due sifoni autoadescanti che regolano i livelli di esercizio scaricando nel colatore Muzza gli afflussi in eccesso.

Osservando i profili idraulici dalla Figura D.4 e dalla Figura D.5 si possono notare dei salti di fondo, i quali vengono utilizzati dalle centrali termoelettriche e idroelettriche, presenti sul territorio.

Infatti, la rete e gli impianti del Canale Muzza sono destinati non solo per l'agricoltura, ma anche alla produzione di energia idroelettrica con quattro centrali e all'uso industriale per il raffreddamento termoelettrico della centrale A.E.M di Cassano d'Adda e quella ENDESA di Tavazzano. Infine, le derivazioni extra agricole non influenzano il regime irriguo essendo tutte con restituzione integrale.

Una volta definito il modello idraulico della rete irrigua principale sono state eseguite le simulazioni in InfoWorks CS con l'obiettivo di ottenere i tempi di trasferimento dell'acqua dal punto di presa iniziale fino al campo irriguo.

Il passo successivo è stato quello di calcolare i tempi di trasferimento delle particelle d'acqua in moto uniforme per vedere se questi si assomigliassero a quelli ricavati con il software InfoWorks CS.

E' stata usata la formula di Chezy (D.1):

$$Q = k_s A R^{1/6} (R i)^{1/2} \quad (D.1)$$

dove:

Q = portata [m^3/s]

A = area bagnata [m^2]

R = raggio idraulico [m]

i = pendenza [-]

Non si son presi in considerazione tutti i derivatori ma solo alcuni che potessero essere rappresentativi di tutto il bacino del Canale Muzza.

In questo modo, conoscendo la geometria e i valori di portata si sono ottenute le altezze idriche. Attraverso la formula (D.2) è stata calcolata celerità di perturbazione c :

$$c = \sqrt{(g \cdot h)} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{D.2})$$

in cui con g [m/s^2] è rappresentata l'accelerazione di gravità e h [m] è l'altezza idrica.

E' stato così possibile calcolare dalla relazione (D.3) i tempi di percorrenza T :

$$T = L/c \quad [\text{s}] \quad (\text{D.3})$$

dove L [m] rappresenta la lunghezza totale del tratto considerato, dall'opera di presa fino al campo irriguo.

Si riporta l'esempio del derivatore primario "Coppa Incassata".

Il calcolo è stato effettuato prendendo in considerazione il tratto del Canale Muzza fino alla bocca di presa che dà origine al derivatore primario "Coppa Incassata". Il tempo di percorrenza totale (inteso come tempo di arrivo delle particelle d'acqua dall'opera di presa di Cassano d'Adda fino al bacino della Coppa Incassata) è stato calcolato sommando al tempo di percorrenza nel Canale Muzza il tempo di percorrenza riferito al derivatore primario "Coppa Incassata".

In Tabella D.1 sono elencati i dati geometrici e di portata del Canale Muzza e del derivatore Coppa Incassata. Attraverso la funzione "Ricerca Obiettivo" di Excel applicata alla formula di Chezy, sono state calcolate le altezze idriche e i raggi idraulici relativi ai tratti considerati.

Tabella D.1 Dati geometrici e di portata del Canale Muzza e del derivatore “Coppa Incassata”

	Canale Muzza	Coppa Incassata
Base minore [m]	30	2
Base maggiore [m]	35.3	4.1
Area [m ²]	57.14	3.28
Contorno bagnato [m]	36.31	5.02
Raggio Idraulico [m]	1.57	0.65
Pendenza	0.001	0.0004
Q [m ³ /s]	110.00	1.48
Altezza [m]	1.75	1.07

In Tabella D.2 si riportano la celerità di perturbazione e i tempi di percorrenza delle particelle d’acqua calcolati attraverso le formule (D.2) e (D.3) sopra descritte.

Tabella D.2 Celerità di perturbazione e tempi di percorrenza delle particelle d’acqua per il Canale Muzza e per il derivatore Coppa Incassata

	Canale Muzza	Coppa Incassata
Lunghezza [m]	2157.3	2700.8
Celerità [m/s]	4.14	3.24
Tempo [s]	520.47	834.29
Tempo [ore]	0.14	0.23
Tempo totale [ore]	0.38	

Il procedimento descritto è stato ripetuto per i diversi derivatori primari e secondari. Si riportano nelle tabelle di seguito i tempi di percorrenza delle particelle d’acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks.

Tabella D.3 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Corneliana Bertola

Corneliana Bertola	
t [ore]	0.95
InfoWorks	1.08 ore

Tabella D.4 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cattaneo Settala

Cattaneo Settala				
	Cavaione	Brivia	Rossate	Settala
t [ore]	0.72	1.48	1.13	1.40
InfoWorks	1 ora	3 ore	2 ore	2.7 ore

Tabella D.5 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Codogna Alta

Codogna Alta			
	Buco della Pola	Mongattino	Codogna alta termine
t [ore]	1.29	4.20	4.29
InfoWorks	1.5 ore	9.5 ore	8.3 ore

Tabella D.6 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cattaneo Comazzo

Cattaneo Comazzo		
	Comazzo	Vaiano
t [ore]	1.16	1.06
InfoWorks	1 ora	1 ora

Tabella D.7 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Lavagna

Derivatore Lavagna				
	Fasola	Quartera	Zela Ospitala	Carcassola Brunora
t [ore]	1.29	1.12	1.11	1.35
InfoWorks	2 ore		1 ora	1.3 ore

Tabella D.8 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Muzzetta

Muzzetta					
	Bertonica di Zelo	Muzzino Grande	Muzzino Mignete	Muzzetta va e vieni	Muzzetta termine
t [ore]	1.76	1.58	1.56	2.19	1.86
InfoWorks	2 ore	1.25 ore	1.2 ore	2 ore	1.5 ore

Tabella D.9 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per i derivatori Crivelletta e Santa Giovanna Gerina

Crivelletta		S.G.Gerina	
t [ore]	1.55	t [ore]	2.15
InfoWorks	1 ora	InfoWorks	2.5 ore

Tabella D.10 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cavo Bolca

Cavo Bolca			
	Lanzana	Camola Frata Vecchia	Borra
t [ore]	1.69	2.25	1.71
InfoWorks	1.5 ore	3 ore	1.7 ore

Tabella D.11 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cavo Apollo

Cavo Apollo					
	Mulazzana	Virola	Santa Maria	Dresana	Leccama Maiocca
t [ore]	1.87	1.77	2.74	2.14	2.22
InfoWorks	2 ore	1.75 ore	5 ore	2.3 ore	2.5 ore

Tabella D.12 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cavo Saturno

Cavo Saturno							
	B.Luserana	Dossa	Guazzona	Casolta	Boccona	Rigoletta	Vesca
t [ore]	2.01	2.21	2.04	2.10	1.92	1.83	2.84
InfoWorks	2 ore	2.7 ore	2.25 ore	2 ore	1.7 ore	1.5 ore	5 ore

Tabella D.13 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cavo Iris

Cavo Iris				
	Bolenzana	Pagana	Camola Vecchia	Isola Balba
t [ore]	2.08	1.82	2.40	1.98
InfoWorks	2.2 ore	1.5 ore	2.8 ore	1.8 ore

Tabella D.14 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Cavo Tris

Cavo Tris				
	San Marco	Antegnatica	Badia	San Bassano
t [ore]	2.10	2.10	1.97	2.48
InfoWorks	2 ore	2 ore	1.3 ore	2.7 ore

Tabella D.15 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per i derivatori Marcona Dentina e Paderna Cesarina

Marcona Dentina			Paderna Cesarina	
	Marcona	Dentina	Cesarina Dentina	Cesarina Bottedo
t [ore]	2.39	2.77	2.46	2.48
InfoWorks	2 ore	3.15 ore	2.3 ore	2.5 ore

Tabella D.16 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Codogna Bassa

Codogna Bassa					
	Trecchino	Trecco	Casala	Triulza	Bagola
t [ore]	5.65	4.17	4.71	4.87	4.67
InfoWorks	13 ore	6ore	7.5ore	7ore	7.75ore
	Guardalobbia	Cancelliera	Nuova	Abadessa	Zucchetta
t [ore]	5.22	5.1	4.79	5.07	4.76
InfoWorks	9 ore	8 ore	6.75 ore	8 ore	8 ore
	Moientina	Codognina	S.Fiorana	Codogna bassa fine	
t [ore]	4.72	4.88	5.35	4.65	
InfoWorks	6.8 ore	7 ore	9 ore	6 ore	

Tabella D.17 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Lanfroia

Lanfroia			
	roggia Lanfroia	Popola Corsa	Vistarina Zorlesco
t [ore]	2.96	3.1	3.87
InfoWorks	2.6 ore	3 ore	4.5 ore
	Bonona	Ossaga sinistra	Ossaga destra
t [ore]	3.55	3.51	3.35
InfoWorks	3.7 ore	4.75 ore	3.5 ore
	Vaghindarna	Grazzana	P.Secugnago
t [ore]	3.51	3.27	3.51
InfoWorks	3.8 ore	3 ore	3.5 ore

Tabella D.18 Tempi di percorrenza delle particelle d'acqua calcolati con la formula di Chezy e ottenuti da InfoWorks per il derivatore Ca' del Parto

Ca' del Parto				
	Brembio	Birga	Porra Nuova	Filippessa
t [ore]	3.62	3.31	3.87	4.16
InfoWorks	5.8 ore	3.3 ore	4.5 ore	5 ore
	Somaglia	Careggia	Torello	
t [ore]	4.08	4.54	3.75	
InfoWorks	5 ore	7 ore	4.25 ore	

Infine è stata creata una mappa del bacino irriguo del Canale Muzza (Figura D.5), in cui sono evidenziati i tempi di trasferimento dell'acqua ottenuti attraverso le simulazioni fatte con il software InfoWorks CS e quelli calcolati con la formula di Chezy (D.1).

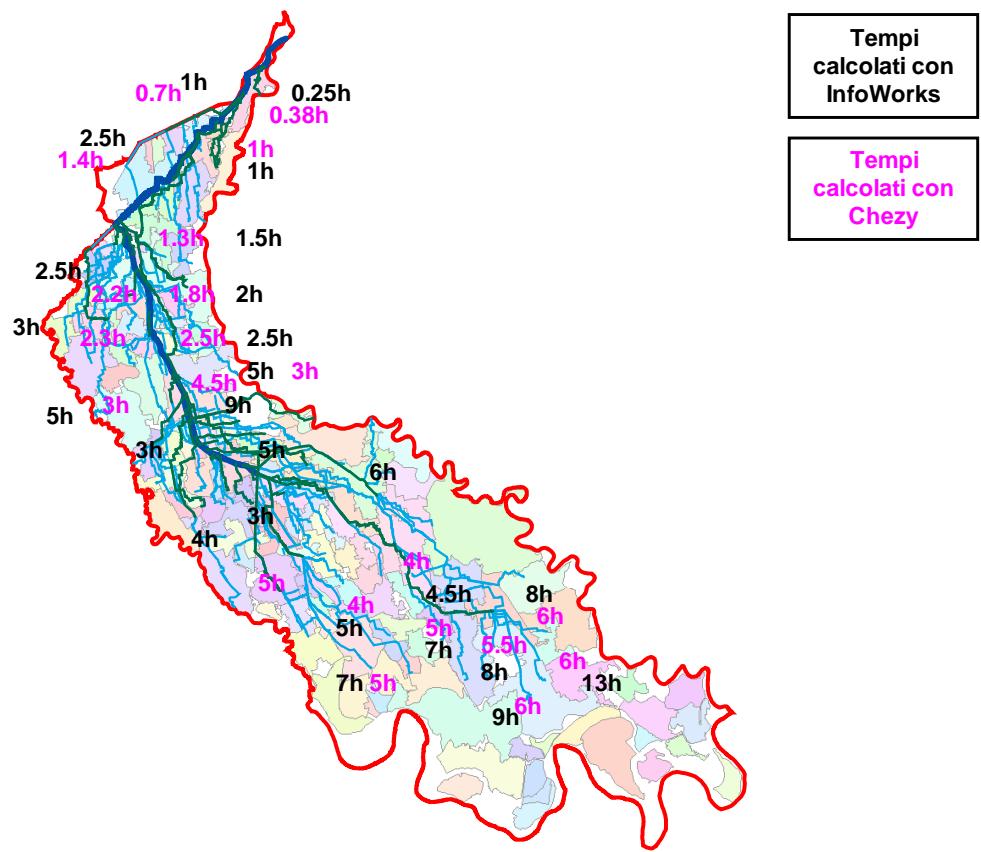


Figura D.5 Mappa di trasferimento dell'acqua per i comizi del Consorzio di Bonifica Muzza Bassa Lodigiana