

Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

Dipartimento di Tecnologie Ingegneria e Scienze
dell'Ambiente e delle Foreste
(DAF)

Dottorato di Ricerca in:
Scienze e Tecnologie per la Gestione Forestale e Ambientale
XXI CICLO

**“Applicazione a scala nazionale per l'Italia del
modello idrologico
SWAT”**

(Settore Scientifico-Disciplinare AGR /10)

Coordinatore: prof. Gianluca Piovesan

Firma

Tutor: prof. Antonio Leone

Firma.....

Tutor: prof. Antonio Lo Porto

Firma.....

Dottoranda: dott. Daria De Luca

Firma.....



INDICE

INDICE	2
INDICE DELLE TABELLE	5
INDICE DELLE FIGURE	7
ABSTRACT	11
CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	15
CAPITOLO 2: USO IRRIGUO E DEL TERRITORIO ITALIANO	18
2.1 LE CARATTERISTICHE AMBIENTALI E L'USO DEL SUOLO	18
2.2 CLIMA.....	20
2.3 IDROGRAFIA E USO IRRIGUO.....	24
2.4 L'AGRICOLTURA ITALIANA.....	27
CAPITOLO 3: LA MODELLIZZAZIONE DEI BACINI IDROGRAFICI	34
3.1 PREMESSA	34
3.2 L'INQUINAMENTO DA FONTI DIFFUSE	35
3.3 LA MODELLISTICA NPS	39
3.4 L'INTEGRAZIONE CON I GIS.....	43
3.5 I PRINCIPALI MODELLI SVILUPPATI	44
CAPITOLO 4: IL MODELLO SWAT	55
4.1 CARATTERISTICHE GENERALI DEL MODELLO.....	55
4.2 STORIA E SVILUPPO.....	57
4.3 IL BILANCIO IDROLOGICO.....	60
4.4 IL PROCESSO SIMULATIVO	64
INTERCEZIONE DELLA VEGETAZIONE	64
REDISTRIBUZIONE	65
EVAPOTRASPIRAZIONE.....	66
DEFLUSSO LATERALE	67
DEFLUSSO SUPERFICIALE	68
NUTRIENTI.....	76
PESTICIDI	80
EROSIONE.....	81

I PROCESSI IN ATTO NELLA RETE IDROGRAFICA (ROUTING PHASE).....	86
CRESCITA DELLE COLTURE	88
PRATICHE COLTURALI	91
CAPITOLO 5: MATERIALI E METODI	93
5.1 RACCOLTA ED IMPUTAZIONE DEI DATI	93
A MODELLO DIGITALE DEL SUOLO SRTM3	94
B CARTA USO SUOLO CORINE LAND COVER	96
C CARTA DEI SUOLI SGDBE	100
D BACINI IDROGRAFICI CCM	104
E DATI CLIMATICI MARS.....	106
F DATI CLIMATICI NCDC-NOAA	109
G DATI CLIMATICI FAO	113
H 5° CENSIMENTO DELL'AGRICOLTURA ISTAT	115
I DATI SULLE PRATICHE AGRICOLE	116
L DATI DI PORTATA ANNALI IDROGRAFICI	116
M PRECIPITAZIONI – ANNALI IDROGRAFICI	117
5.2 LA SUDDIVISIONE IN ZONE.....	117
5.3 LE FASI DELLE SIMULAZIONI	120
5.4 CALIBRAZIONE	132
5.5 SENSITIVITY ANALYSIS E AUTOCALIBRAZIONE	133
CAPITOLO 6: RISULTATI	136
6.1 L'INDIVIDUAZIONE DEI BACINI IDROGRAFICI	136
6.2 IL CONFRONTO TRA DATI MARS E DATI MISURATI.....	147
6.3 LA CALIBRAZIONE DELLE PORTATE	155
ZONA 2 ALCANTARA – MOIO	157
ZONA 3 PO– PONTELAGOSCURO	158
ZONA 4 BRENTA – BARZIZA.....	159
ZONA 5 ARNO – SAN GIOVANNI ALLA VENA.....	161
ZONA 6 TEVERE – RIPETTA.....	162
ZONA 7 BIFERNO – ALTOPANTANO	163
ZONA 8 CARAPELLE – PONTEVECCHIO.....	164
ZONA 9 SELE – ALBANELLA	165
6.4 IL BILANCIO IDROLOGICO	166
6.5 ANALISI DI SENSITIVITÀ.....	171

6.6 AUTOCALIBRAZIONE.....	174
CAPITOLO 7: DISCUSSIONE	177
CAPITOLO 8: CONCLUSIONI	180
BIBLIOGRAFIA	182
APPENDICE : STAZIONI DI RILIEVO DEI DATI CLIMATICI NOAA	195

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: regioni climatiche italiane, significato delle sigle.	20
Tabella 2: Superficie agricola utilizzata in Italia per aggregato colturale nel triennio 2002–2004.	28
Tabella 3: Superficie agricola investita in colture ortofrutticole in Italia nel triennio 2002–2004.	30
Tabella 4: Principali caratteristiche del modello ANSWERS	45
Tabella 5: Principali caratteristiche del modello AGNPS	47
Tabella 6: Principali caratteristiche del modello CREAMS.	48
Tabella 7: Principali caratteristiche distintive del modello derivato GLEAMS.	50
Tabella 8: Principali caratteristiche distintive del modello derivato OPUS..	50
Tabella 9: Principali caratteristiche distintive del modello derivato SWRRB	51
Tabella 10: Principali caratteristiche del modello PRZM	52
Tabella 11: Principali caratteristiche distintive del modello derivato RUSTIC	53
Tabella 12: Principali caratteristiche del modello BASINS.....	53
Tabella 13: Valori medi del Curve Number per le principali categorie di uso del suolo stimati dall' SCS.	71
Tabella 14: Codici e numerazione delle classi di uso del suolo del progetto CORINE LAND COVER	98
Tabella 15: Bacini idrografici selezionati dal progetto CCM per le simulazioni matematiche.....	105
Tabella 16: Tipologia di dati climatici ricavabili dal progetto MARS e rispettive unità di misura. In rosso sono indicati i dati effettivamente usati nelle simulazioni.	107
Tabella 17: Tipologia di dati climatici ricavabili dall'NCDC e unità di misura. In rosso sono indicati i dati effettivamente usati nelle simulazioni. ..	112
Tabella 18: Dati climatici inseriti nel database CLIMWAT, in rosso quelli utilizzati nella creazione dei file WGN	114
Tabella 19: Zone di simulazione e bacini idrografici compresi	119

Tabella 20: Totale dei bacini esaminati e simulati, dei sottobacini individuati e territorio italiano simulato in percentuale.....	137
Tabella 21: Dati riassuntivi zona 1	138
Tabella 22: Dati riassuntivi zona 2	139
Tabella 23: Dati riassuntivi zona 3	140
Tabella 24: Dati riassuntivi zona 4.	141
Tabella 25: Dati riassuntivi zona 5	142
Tabella 26: Dati riassuntivi zona 6	143
Tabella 27: Dati riassuntivi zona 7	144
Tabella 28: Dati riassuntivi zona 8	145
Tabella 29: Dati riassuntivi zona 8	146
Tabella 30: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Alcantara.	166
Tabella 31: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Po.	166
Tabella 32: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Brenta.....	167
Tabella 33: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Arno.	168
Tabella 34: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Tevere.	168
Tabella 35: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Biferno.....	169
Tabella 36: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Carapelle.	170
Tabella 37: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Sele.	170
Tabella 38: Risultati dell'Analisi di Sensitività per il bacino dell'Arno	172
Tabella 39: Risultati dell'Analisi di Sensitività per il bacino del Carapelle.	173
Tabella 40: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Arno.	175
Tabella 41: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Carapelle.	176

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Le regioni climatiche italiane, per il significato delle sigle si veda la tabella 1.....	21
Figura 2: reticolo idrografico principale italiano	24
Figura 3: Percentuale di SAU per aggregato colturale.....	29
Figura 4 : Percentuale di SAU investita in colture ortofrutticole.....	31
Figura 5: Schematizzazione dei processi di calcolo del modello SWAT e dei dati di input richiesti.	56
Figura 6: Rappresentazione schematica del ciclo idrologico realizzata dall'USGS (United States Geological Survey).....	61
Figura 7: Relazione tra il deflusso superficiale e le precipitazioni nel metodo dell'SCS Curve Number.....	70
Figura 8: Composti azotati e loro trasformazioni chimiche secondo SWAT	76
Figura 9: : Composti del fosforo e loro trasformazioni chimiche secondo SWAT.....	79
Figura 10: Il destino dei pesticidi nel suolo secondo SWAT.....	80
Figura 11: Schematizzazione dei processi in atto nella rete di drenaggio simulati da SWAT.....	87
Figura 12: Modello digitale del suolo ricavato dai dati SRTM3.....	96
Figura 13: Carta dell'uso del suolo CORINE LAND COVER. La legenda è stata semplificata in modo da evidenziare solo gli usi del suolo prevalenti indicati con la rispettiva numerazione. Per il significato associato alle numerazioni si rimanda alla tabella 2.....	99
Figura 14: Paesi inclusi nel SGDBE ver. 4; nelle tre tonalità di grigio sono indicati, a partire dalla più scura, i paesi che hanno informazioni complete, quelli che stanno completando il progetto e quelli che saranno aggiunti in futuro.....	101
Figura 15: Schema della struttura del SGDBE e del significato di STU E SMU.	102
Figura 16: Carta dei suoli ricavata dal SGDBE. La legenda è stata semplificata in modo da individuare le STU (Soil Typological Unit) più rappresentate nel territorio italiano.	103

Figura 17: Bacini idrografici italiani digitalizzati nell'ambito del progetto CCM	105
Figura 18: Celle della griglia MARS selezionate per l'Italia e relativi centroidi attribuiti al modello come punti-stazione.....	108
Figura 19: Stazioni NCDC- NOAA nel mondo.	110
Figura 20: Le stazioni NCDC-NOAA nell'area italiana come visualizzato da WebGis.	111
Figura 21: Stazioni NCDC selezionate per le simulazioni con SWAT.	112
Figura 22: Stazioni climatiche FAO utilizzate per la creazione dei files WGN	115
Figura 23: Suddivisione della superficie Italiana in zone per l'attuazione delle simulazioni.	118
Figura 24: Bacini idrografici CCM suddivisi per zona di simulazione.....	120
Figura 25: Menù di comandi inseriti dall'interfaccia AVSWAT2000 in ArcView (1) per la Watershed View (2) e per la SWAT View (3).	121
Figura 26: Schermata principale del modello AVSWAT 2000.....	121
Figura 27: Sottomenù del Menù AVSWAT.....	122
Figura 28: Finestra operativa per la delineazione del bacino idrografico e dei sottobacini. 1: immissione della Mask. 2: immissione del reticolo idrografico per l'opzione di Burn.in.....	124
Figura 29: Sottomenù per la delineazione degli usi del suolo e dei tipi di suolo.....	124
Figura 30: Finestra operativa per la delineazione degli uso-suolo e dei suoli.....	125
Figura 31: Menù e finestra operativa della distribuzione delle HRU	126
Figura 32: Menù input	127
Figura 33: Assegnazione dei dati climatici	127
Figura 34: Menù Edit Input.....	128
Figura 35: Finestra operativa per l'editing dei sottobacini.	129
Figura 36: Assegnazione delle pratiche colturali.....	130
Figura 37: Opzioni di simulazione e setup.	130
Figura 38: Messaggio di completamento della simulazione.....	131

Figura 39: Menù "Reports"	131
Figura 40: Finestra operativa del "Calibration Tool"	132
Figura 41: Moduli aggiuntivi di AVSWAT-X	133
Figura 42: Finestra operativa per l'analisi di sensitività	134
Figura 43: Finestra operativa per l'autocalibrazione.....	135
Figura 44: Bacini idrografici e sottobacini simulati dal modello SWAT	136
Figura 45: Zona 1. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	138
Figura 46: Zona 2. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	139
Figura 47: Zona 3. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	140
Figura 48: Zona 4. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	141
Figura 49: Zona 5. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	142
Figura 50: Zona 6. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	143
Figura 51: Zona 7. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	144
Figura 52: Zona 8. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	145
Figura 53: Zona 8. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.....	146
Figura 54: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 2 e graficazione delle differenze.....	147
Figura 55: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 3 e graficazione delle differenze.....	148
Figura 56: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 4 e graficazione delle differenze.....	149
Figura 57: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 5 e graficazione delle differenze.....	150

Figura 58: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 6 e graficazione delle differenze.....	151
Figura 59: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 7 e graficazione delle differenze.....	152
Figura 60: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 8 e graficazione delle differenze.....	153
Figura 61: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 9 e graficazione delle differenze.....	154
Figura 62: Stazioni di misura delle portate per i bacini idrografici scelti per la calibrazione matematica del modello	156
Figura 63: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell'Alcantara.	157
Figura 64: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Po.	158
Figura 65: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Brenta.	160
Figura 66: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell' Arno.....	161
Figura 67: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Tevere.....	162
Figura 68: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Biferno.	163
Figura 69: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.	164
Figura 70: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.	165
Figura 71: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell'Arno.....	174
Figura 72: Confronto tra le portate giornaliere misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.	176

ABSTRACT

Application at a national scale for Italy of the hydrological model SWAT

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was applied to the whole Italian Region.

The goals were firstly to assess the possibility to use a simulation tool to study the impacts at a national scale on the water, nutrient and sediment balance for forecasting use and secondly to evaluate the use in this framework of available databases with regional or global coverage.

To this purpose some European databases have been used: the MARS database, for the climatic data at a daily resolution, the CORINE Land Cover, the SGBDE (Soil Geographic Database of Europe), for the soil types and the CCM (Catchment Characterization and Modelling) for the river network and basin boundaries delineation. Besides the Global Digital Elevation Model SRTM3 and the 5° Italian Agriculture Census (ISTAT) data were used. All of these databases have a rather coarse spatial resolution.

Due to the large dimension of the study area and to the huge amount of data, the simulation of the whole national surface has been divided into nine zones that were simulated separately. Within each simulation zone a variable number of basins was included. In this way 86 Italian basins were simulated covering the 71,63 % of the Italian territory.

The model was able to delineate the basins boundaries, the subbasins and the river networks correctly. The hydrological balance was calibrated on the flow for a pilot basin in each simulation zone.

The correlation index and the Nash and Sutcliffe Efficiency were used to evaluate the simulation outputs. These indexes show low or acceptable results at daily scale and better results at monthly scale.

The sensitivity analysis and an autocalibration procedure were used in order to highlight key variables and obtain better calibration. This significantly improved the simulation results.

Other studies at a national scale or carried out using global coverage data with the SWAT model shown similar results.

In conclusion, it is possible to use the SWAT model also at national scale for Italy using the available European large scale databases, even if at least the MARS climate database resulted not completely satisfactory for an area like Italy where sea influence and great topographic variability can be a challenge for weather data interpolation procedures.

Applicazione a scala nazionale per l'Italia del modello idrologico SWAT

Il modello idrologico a scala di bacino SWAT (Soil and Water Assessment Tool) è stato applicato all'intero territorio italiano.

Gli obiettivi sono stati in primo luogo quello di sperimentare la possibilità di usare un modello matematico per studiare gli impatti a scala nazionale sul bilancio idrologico e sui cicli di sedimenti e nutrienti a livello previsionale ed in secondo luogo quello di valutare l'uso delle banche dati con copertura regionale o globale disponibili a questo scopo.

A questo fine sono stati utilizzati alcuni database europei: il MARS database, per i dati climatici a risoluzione giornaliera, la carta uso-suolo del progetto CORINE Land Cover, il SGBDE (Soil Geographic Database of Europe), per la caratterizzazione dei tipi di suolo e il CCM (Catchment Characterization and Modelling) per la delineazione dei reticoli idrografici e dei contorni dei bacini analizzati. Inoltre sono stati utilizzati il modello globale digitale del suolo SRTM3 ed i dati del 5° Censimento italiano dell'agricoltura ISTAT.

Data la vastità dell'area esaminata e la mole di dati elaborati, si è resa necessaria la suddivisione per l'Italia in 9 zone di simulazione di estensione simile. In ogni zona di simulazione sono stati quindi compresi e simulati più bacini idrografici. In questo modo sono stati simulati 86 bacini idrografici ricoprendo il 71,63% del territorio nazionale.

Il modello è stato in grado di individuare correttamente i contorni dei bacini esaminati, i rispettivi sottobacini ed i reticoli idrografici. Il bilancio idrologico è stato calibrato sulle portate per un bacino pilota in ogni zona di simulazione.

Gli indici di correlazione e di efficienza di Nash e Sutcliffe sono stati usati per valutare gli output delle simulazioni. Questi sono stati caratterizzati da risultati scarsi o accettabili a scala giornaliera e discreti alla scala mensile.

L'analisi di sensitività e l'autocalibrazione sono state utilizzate al fine di evidenziare le variabili chiave ed ottenere migliori risultati di calibrazione, per due bacini idrografici.

L'uso di questi moduli ha migliorato sensibilmente i risultati di calibrazione in entrambe i bacini esaminati.

Altri studi sviluppati a grande scala o con l'utilizzo di *Global Data* con il modello SWAT, in ambiti territoriali diversi, hanno mostrato risultati simili.

In conclusione, è possibile utilizzare il modello SWAT anche a scala nazionale per l'Italia ed usando le attuali banche dati a larga scala, ad esclusione del database MARS che non è risultato pienamente soddisfacente per un'area come quella italiana dove l'influenza del mare e la grossa variabilità topografica rappresentano degli ostacoli nelle procedure di interpolazione dei dati climatici

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE

L'attenzione rivolta negli ultimi anni all'uso delle risorse idriche a livello globale è il segno dell'esistenza di una problematica diffusa e sentita.

La risorsa idrica è degradabile e non illimitata e quindi occorre agire al fine di soddisfare gli usi delle attuali generazioni e conservarla integra per quelle future e cioè di perseguire un suo utilizzo sostenibile e razionale.

Anche in Italia si avverte fortemente l'esigenza di un approfondimento conoscitivo sul tema dell'acqua e su un suo possibile impiego mirato alla riduzione degli sprechi e dei fenomeni di inquinamento e depauperazione dei corpi idrici. La gestione oculata delle risorse idriche è una questione la cui importanza ha assunto ormai un rilievo determinante.

L'agricoltura, in particolare, catalizza l'attenzione degli esperti. Il settore primario è, infatti, il maggiore utilizzatore di risorsa idrica utilizzando tra la metà ed i due terzi della risorsa totale ed è spesso causa di sprechi o inefficienze (INEA, 2005). L'irrigazione però è assolutamente necessaria per la moderna agricoltura: in molte zone l'irrigazione costituisce l'unica possibilità di sviluppo per un'agricoltura competitiva e i problemi legati ai fenomeni di siccità e della conseguente carenza idrica, molto più frequenti di quanto ci si potesse aspettare solo alcuni anni fa, sembrano aumentare le dimensioni del problema.

Inoltre l'attuale gestione dei suoli agrari, in particolar modo di quelli dedicati ad agricoltura intensiva è causa di profonde perturbazioni ambientali che si ripercuotono nei corpi idrici così come nelle altre matrici ambientali.

L'immissione nei suoli di nutrienti e pesticidi in notevoli quantità, al fine di ottenere gli alti profitti richiesti dalle leggi di mercato, è causa del depauperamento dei corpi idrici recettori e dei fenomeni di eutrofizzazione e lo sfruttamento intensivo delle risorse è alla base della desertificazione dei suoli e della salinizzazione delle acque di falda.

Nel contempo il contesto agricolo europeo si trova a dover affrontare enormi cambiamenti, caratterizzati da un lato dall'introduzione della Water Framework Directive (WFD) e, dall'altro, dalla riforma della Politica Agricola Comune. Questo ha apportato e arrecherà, anche nei prossimi anni, sostanziali modifiche degli attuali assetti e ciò rende ancora più necessario uno studio corretto dei fenomeni descritti possibile attraverso l'utilizzo di moderne tecnologie come supporto alle decisioni politiche.

Da questo contesto è nata l'esigenza di uno studio mirato all'analisi a scala nazionale del bilancio idrologico italiano e dei fenomeni di trasporto di nutrienti, pesticidi e sedimenti legati ad esso con particolare attinenza alle attività agricole.

La realizzazione di uno studio simile è stata sino ad oggi limitata dalla carenza di dati di base e dalla difficoltà insita nell'approcciarsi ad una tematica così complessa. Al giorno d'oggi, invece, la possibilità di ricorrere alla modellazione matematica rende possibile questo tipo di applicazioni.

Sono stati sviluppati numerosi modelli matematici in grado di simulare il ciclo idrologico e tutti i fenomeni connessi ad esso. Molti studi svolti in ogni parte del mondo hanno dimostrato che i modelli rappresentano un importante strumento conoscitivo in quanto capaci di analizzare le interazioni tra le diverse variabili ambientali e le dinamiche nel tempo con buone approssimazioni.

Con i modelli matematici è possibile simulare anche gli effetti dei diversi usi della risorsa idrica e/o delle diverse pratiche agricole, a scopo previsionale, creando una serie di scenari futuri.

Il modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1993) è un complesso modello idrologico e di qualità delle acque che lavora a scala di bacino ed è in grado di rendere output giornalieri in lunghe serie storiche.

SWAT è uno strumento usato con successo in tutto il mondo per studi gestionali sull'uso del suolo e sulle risorse idriche ma non è mai stata sviluppata per l'Italia una applicazione a scala nazionale.

Il modello è alquanto esigente in termini di dati di input e ciò può senz'altro costituire un problema nel caso di applicazioni modellistiche a scala vasta. Diventa pertanto importante poter ricorrere a database ambientali a copertura regionale o globale.

Al momento le banche dati realizzate in ambito europeo hanno reso possibile il presente studio e difatti ulteriore obiettivo è stato anche quello di verificare l'utilizzabilità di queste ultime.

Sono numerose le possibilità e le innovazioni che un approccio modellistico a scala nazionale può apportare. Una corretta irrigazione e gestione di suoli agrari deve essere considerata al giorno d'oggi un obiettivo da perseguire e questa necessità può essere realizzata solo con l'uso di evolute ed appropriate tecnologie.

CAPITOLO 2: USO IRRIGUO E DEL TERRITORIO ITALIANO

2.1 Le caratteristiche ambientali e l'uso del suolo

La complessità del territorio italiano è resa evidente dall'ampia successione di ambienti diversi che esso presenta (pianure, colline, montagne, coste, isole, ecc.) che viene accentuata e ulteriormente complicata dalla sua estensione in senso latitudinale (dai 36° ai 47°).

Un'altra caratteristica importante per la delineazione dei diversi habitat presenti è dettata dalla condizione di peninsularità dell'Italia che la porta ad essere in parte incastonata nell'Europa continentale e in parte protesa nel bacino mediterraneo verso il Continente africano.

Tuttavia molti degli habitat presenti in Italia sono legati all'agricoltura; la gran parte del territorio nazionale può essere infatti descritto come un complesso mosaico di appezzamenti agricoli di dimensioni disparate. In minore percentuale si hanno invece aree naturali e semi naturali.

I primi risultati del secondo Inventario Forestale Nazionale e del Carbonio (IFNC, www.ifni.it) stimano nel nostro Paese una superficie complessiva delle risorse forestali pari a 10,7 milioni di ettari, concentrati per oltre il 50% nelle Regioni del nord. La superficie forestale italiana rappresenta il 5% della superficie forestale totale europea ed è pari al 35% del territorio italiano

Le aree agricole ad alto valore naturale interessano una SAU (Superficie Agricola Utilizzata) pari a circa 2,8 milioni di ettari, circa il 21% della superficie agricola; queste, insieme alle aree forestali ad alto valore naturale, si concentrano soprattutto nelle aree protette (incluso la rete Natura 2000) che, nel loro insieme, coprono il 20% circa della superficie territoriale. Di questo, il 20-25% è interessato dall'agricoltura, ed in particolare da prati e pascoli. L'agricoltura, riveste pertanto un ruolo di grande importanza: per la conservazione della biodiversità naturale; per la struttura del paesaggio tradizionale italiano; per le produzioni tradizionali; per la diversificazione nel settore turistico-ricreativo (MiPAF, 2006).

La complessità del territorio italiano legato all'agricoltura è resa evidente a dai dati del 5° censimento dell'agricoltura (ISTAT, 2000).

Questi evidenziano come la SAU media delle aziende sia tra le più basse d'Europa (5 ha), questo dato è reso ancora più evidente nelle Regioni della Convergenza (3,1 ha), dovuta ad una sostanziale immobilità del mercato fondiario e dall'insufficiente ricambio generazionale.

Questa caratterizzazione dei suoli agrari è la risultante di profonde modificazioni antropiche indotte al territorio naturale e questo è reso evidente anche dal contesto culturale che ancora oggi caratterizza il settore primario italiano. Nel 90% dei casi, le imprese agricole si configurano come familiari, a conduzione diretta del titolare. Prevalgono le imprese individuali e le società di persone o di capitale (2% del totale) si concentrano nell'Italia della Competitività. Sebbene in crescita i conduttori azienda con almeno il diploma di scuola media superiore rappresentano una quota (19%) rispetto al totale dei conduttori agricoli tra le più basse d'Europa. Molte attività inoltre sono state abbandonate per mancanza di ricambio generazionale.

Un altro fenomeno a cui si assiste al giorno d'oggi è che nonostante la ridotta dimensione della maggior parte delle aziende, numerose di queste hanno attivato processi più o meno spinti di diversificazione, realizzando attività commerciali, di lavorazione e trasformazione dei prodotti, attività turistiche e, in generale, attività legate al territorio, alla cultura e al contesto socio-economico. In particolare, l'offerta agrituristica si presenta fortemente dinamica in termini sia quantitativi che dei servizi offerti, a fronte, però, di una domanda che vede diminuire il numero di presenze, anche per la concorrenza da parte di altri Paesi in termini di prezzi e servizi offerti. Meno sviluppate che nel resto d'Europa, invece, sono le attività più innovative, come energie rinnovabili, acquacoltura, prodotti forestali, ecc. Il 61% commercializza in proprio la produzione, nella maggior parte dei casi per valori inferiori ai 5.000 Euro. Poche, inoltre, sono le aziende inserite in circuiti di filiera, che consentirebbero di indirizzare più agevolmente il processo produttivo in funzione della domanda di mercato e ancor meno (1.700 unità complessivamente) sono quelle che utilizzano canali commerciali più innovativi, come, ad esempio, l',e-commerce.

2.2 Clima

Data l'estensione in senso latitudinale e la grande quantità di habitat presenti è quasi impossibile descrivere un unico clima italiano se non attraverso approssimazioni molto generiche e, di solito, poco utili dal punto di vista operativo. Nasce, quindi, l'esigenza – ormai consolidatasi anche come procedura corrente negli studi di climatologia – di definire sottoaree del territorio climaticamente omogenee così come è stato realizzato in uno studio dell'INEA (Istituto Nazionale di Economia Agraria (Bonati e Liberati) (tab. 1) (fig. 1).

Tabella 1: regioni climatiche italiane, significato delle sigle.

Sigla	Area climatica
Aaw	Arco alpino
Aae	Arco alpino
Ppa	Pianura Padana
Pia	Peninsulare interna
Pim	Peninsulare interna
Pib	Peninsulare interna
Vta	Versante tirrenico
Vtm	Versante tirrenico
Vtb	Versante tirrenico
Vaa	Versante adriatico
Vam	Versante adriatico
Vab	Versante adriatico
Sut	Sud tirrenico
Sua	Sud adriatico
Sic	Sicilia costiera
Sii	Sicilia interna
Sac	Sardegna costiera
Sai	Sardegna interna

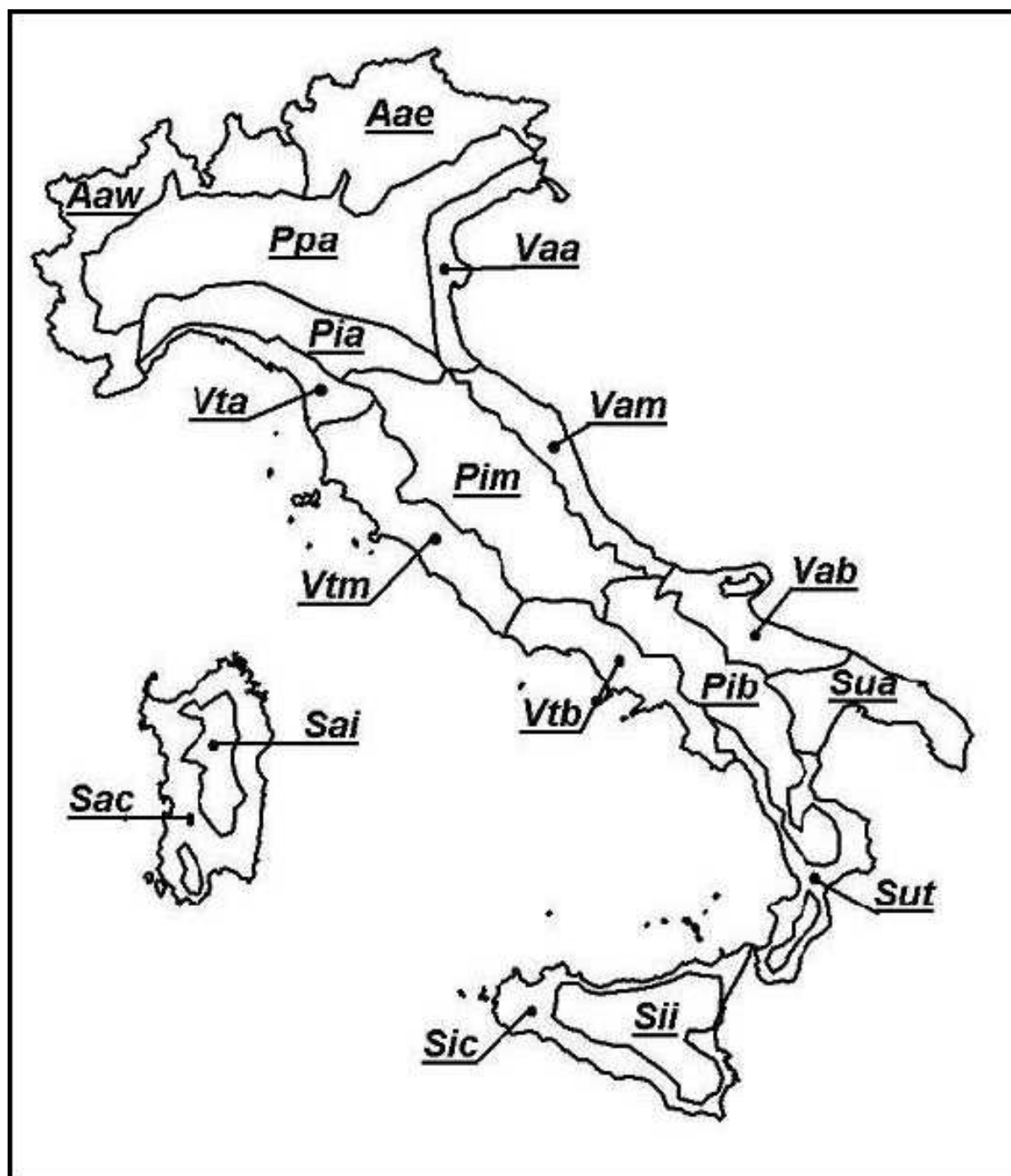


Figura 1: Le regioni climatiche italiane, per il significato delle sigle si veda la tabella 1.

Nell'ambito dello studio sopra citato per la discriminazione delle diverse aree climatiche è stato utilizzato un database di valori giornalieri di dati (temperatura dell'aria minima e massima, precipitazione piovosa, eliofania, umidità relativa e velocità del vento a 10 m) stimate con procedimenti di Analisi Oggettiva (A.O.)

(kriging) ai nodi di una griglia a schema regolare estesa su tutto il territorio italiano (306 punti).

Ogni nodo della suddetta griglia rappresenta, pertanto, il centroide di una cella meteo di circa 30 Km di lato, mentre ciascun dato è il risultato di una interpolazione opportunamente pesata delle osservazioni meteorologiche originarie derivate, prevalentemente, da stazioni UCEA, SMAM, RAN presenti nella Banca Dati Agrometeorologica Nazionale.

A determinare il clima in Italia intervengono:

- la posizione astronomica, compresa fra i 36 ed i 45° N di latitudine, sede di un fronte di convergenza da Nord e da Sud di masse d'aria di contrastanti caratteristiche termodinamiche;
- la posizione geografica, gravante sul lato occidentale della grande massa dei vecchi continenti, prossima all'Oceano Atlantico ed all'Africa Settentrionale;
- l'estensione della penisola, in direzione Nord-Sud per oltre 10° di latitudine;
- la marittimità del clima (almeno per la penisola), per la forma lunga e stretta della penisola nel Mar Mediterraneo;
- la configurazione orografica, influente in particolare sul clima invernale, con la barriera dell'arco alpino a protezione dai venti freddi provenienti dal I e IV quadrante e con la dorsale appenninica a riparo del versante tirrenico dai venti freddi di Nord-Est.

Il regime pluviometrico della penisola italiana presenta, con esclusione dell'arco alpino, un netto minimo estivo.

Di contro, il massimo delle precipitazioni è presente con una unica punta massima durante l'inverno nelle regioni più meridionali della penisola, mentre nelle regioni centrali mostra un massimo principale in autunno ed uno secondario in primavera.

Il valore di quest'ultimo aumenta e si sposta verso l'estate salendo alle regioni settentrionali fino a divenire un unico massimo estivo nelle zone alpine.

Il valore medio delle precipitazioni meteoriche registrato in Italia dal 1950 al 2000 corrisponde ad un'altezza media di precipitazioni di poco inferiore ai 1000 mm/anno. Considerato che l'altezza media delle precipitazioni in Europa è pari a circa 650 mm/anno, è evidente che l'Italia riceve un quantitativo di acque meteoriche significativamente superiore alla media europea.

Le difficoltà dell'Italia nel campo delle disponibilità idriche sono imputabili sostanzialmente alla irregolare distribuzione sia spaziale che temporale delle precipitazioni sul nostro territorio. La differenza di latitudine fra Nord Italia e Sud Italia e isole comporta notevoli differenze climatiche, con conseguenti differenze nell'altezza media delle precipitazioni fra Nord e Sud con conseguenti differenze nelle disponibilità idriche.

Negli ultimi anni si sono registrate in Italia situazioni di carattere particolare dal punto di vista climatico con maggiore frequenza rispetto al passato (Vento, 2001).

In alcuni anni nel periodo estivo le temperature sono state quasi sempre sopra i valori medi delle rispettive serie storiche e spesso anche sopra i valori dei limiti di variabilità statistica (deviazione standard di circa 4 °C). Inoltre la quantità di pioggia caduta da maggio ad agosto è stata inferiore anche con ampi scarti rispetto allo standard climatico. Carenza di pioggia nel periodo primaverile-estivo si è avuta del resto su tutto il territorio nazionale. Con ciò si confermano i segni da tempo evidenziati in molti studi a riprova di aumento dei fenomeni estremi come conseguenza dei cambiamenti climatici in atto in Italia, nonché la validità della decisione del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (MiPAF) di considerare, tra le ricerche per sé prioritarie, quelle aventi per oggetto i cambiamenti climatici in rapporto all'agricoltura.

2.3 Idrografia e uso irriguo

L'Italia è caratterizzata da un grande bacino idrografico il Po di circa 70.000 kmq, da alcuni bacini di medie dimensioni quali il Tevere, l'Adige, l'Arno, il Piave, il Volturno e il Reno e da molti corsi d'acqua con bacini di modesta superficie (fig. 2).



Figura 2: reticolo idrografico principale italiano

La lunghezza relativamente breve della maggior parte dei corsi d'acqua italiani, comporta anche tempi di percorrenza relativamente brevi dalla sorgente alla foce.

Questo determina la modesta capacità di immagazzinamento delle risorse idriche ed è anche causa di fenomeni alluvionali frequenti nel periodo di massima piovosità. In tali casi l'abnorme quantità di precipitazioni concentrata in brevi periodi comporta il rapido scorrimento delle acque verso il mare, in quanto viene superata la capacità di immagazzinamento dei corsi d'acqua, dei laghi e del sottosuolo, sottraendo di fatto enormi quantitativi di acqua ad un possibile uso da parte dell'uomo.

La variabilità stagionale dei deflussi costituisce una caratteristica molto importante ai fini dell'utilizzazione delle risorse idriche; per esempio, la carenza di deflussi disponibili durante la stagione estiva condiziona fortemente l'utilizzo delle risorse idriche, soprattutto quelle per fini irrigui.

La conseguenza è spesso un eccessivo ricorso alla risorsa idrica sotterranea che determina l'insorgere di fenomeni quali-quantitativi (intrusione salina, subsidenza) con modificazioni a volte irreversibili.

In Italia si possono distinguere i seguenti regimi fluviali, o dei deflussi, in base alla seguente classificazione dei bacini:

1) Bacini glaciali: sono ricoperti in buona parte da ghiacciai, scarsa è la correlazione fra la curva dei deflussi e quella degli afflussi (perché sono importanti gli effetti di immagazzinamento dell'acqua nella coltre nivale)

2) Bacini alpini (regime pluviometrico continentale o alpino): i deflussi presentano due massimi (principale in estate e secondario in autunno). Il minimo fra estate ed autunno è molto meno marcato di quello invernale. Fra la curva dei deflussi e quella degli afflussi si nota uno sfasamento: le precipitazioni nevose autunno-invernali si trasformano in deflussi durante la primavera-inizio estate.

3) Bacini appenninici parzialmente permeabili: il regime dei deflussi dipende in buona parte dal regime pluviometrico determinando un massimo dei deflussi in autunno o inverno. La curva dei deflussi è notevolmente più regolare di quella

degli afflussi. Tale regolarità è tanto più pronunciata quanto maggiore è l'area di bacino interessata da formazioni permeabili.

4) Bacini appenninici impermeabili: la curva dei deflussi è simile a quella degli afflussi. Il minimo estivo è molto pronunciato. In taluni bacini appenninici alle piogge primaverili si sommano i contributi di fusione nivale.

5) Bacini insulari: il regime pluviale è mediterraneo. I deflussi registrano quindi magre estive e piene invernali- primaverili. La curva dei deflussi è simile a quella degli afflussi.

In Italia, se pure considerato un Paese potenzialmente ricco di risorse idriche, la natura del territorio, la disomogenea distribuzione delle precipitazioni tra contesti geografici, la conseguente irregolarità dei deflussi superficiali e lo stato delle reti di distribuzione non consentono di utilizzare appieno le risorse potenzialmente disponibili.

Ulteriori difficoltà per gli approvvigionamenti idrici sono considerati i periodi siccitosi che nel corso degli ultimi anni hanno interessato vaste aree del nostro Paese, dapprima il Sud Italia nel triennio 2000-2002, successivamente il Centro-Nord Italia nel corso del 2003, aree tradizionalmente non soggette a questo tipo di problematiche (Vento ed Esposito, 2003).

Proprio gli eventi siccitosi hanno portato all'attenzione generale i problemi legati alle variazioni climatiche che stanno interessando il nostro territorio e alle conseguenti ripercussioni negative soprattutto sul settore primario.

Rispetto al quadro conoscitivo della dimensione dell'irrigazione in Italia, in termini di disponibilità, fabbisogni e uso delle risorse idriche a scopo irriguo, i dati a disposizione si presentano disomogenei e con un diverso grado di approfondimento per i diversi contesti geografici.

Mentre per il Sud l'indagine INEA (Progetto CASI) ha fornito un quadro ormai consolidato sullo stato strutturale ed infrastrutturale dell'irrigazione; la carenza di informazioni egualmente dettagliate anche per il Centro e per il Nord, il diverso approccio metodologico seguito nelle sole rilevazioni per le quali si dispone di dati e le competenze in materia diversamente distribuite e in molti casi frammentate, non consentono di definire in un quadro omogeneo lo stato dell'irrigazione nel

nostro Paese. Per quanto riguarda l'Italia meridionale, dove l'attività di monitoraggio della stagione irrigua viene realizzata sin dal 1999, come sopra accennato, si riportano gli ultimi dati disponibili riferiti alla stagione 2003.

La produzione agricola proveniente da colture irrigue rappresenta più dei due terzi del valore aggiunto del settore agricolo meridionale. La superficie occupata dalle colture irrigue è di circa 1.600.000 ha, cui corrisponde circa il 60% del consumo totale di risorsa idrica.

Per quanto riguarda il tipo di captazione oltre il 53% dei prelievi è costituito da captazioni da falda profonda, senza contare le strutture di approvvigionamento private.

L'acqua rappresenta quindi un elemento chiave per l'economia del settore agricolo ma sono numerose, al giorno d'oggi le limitazioni e le problematiche legate all'uso di questa risorsa.

I vincoli sulle disponibilità idriche a disposizione dell'agricoltura irrigua meridionale sono dovuti non solo alla riduzione degli apporti pluviometrici, che pure hanno inciso ed incidono principalmente sullo stato delle fonti di approvvigionamento, ma anche dall'aumento della domanda di acqua per usi diversi e non coordinata a livello territoriale, dall'obsolescenza delle reti, da una gestione delle risorse focalizzata alla realizzazione di investimenti non sempre coerenti con le esigenze, da un livello di conoscenza dell'impiego di acqua per i diversi usi non sempre attendibile e tempestivo e dall'assenza di un sistema di monitoraggio permanente del settore idrico.

2.4 L'agricoltura italiana

Un quadro panoramico sulla situazione dell'agricoltura italiana è fornito periodicamente dalle attività dell'ISTAT (Istituto Statistico Nazionale) attraverso i censimenti nazionali dell'agricoltura. Di seguito sono riportati i dati del 5°

censimento al fine di illustrare sinteticamente le principali coltivazioni presenti a livello nazionale e la loro distribuzione sul territorio.

La Superficie Agricola Utilizzata (SAU) per l'Italia ammonta, in totale, a circa 14,5 milioni di ettari.

Le colture maggiormente diffuse sono rappresentate dai cereali (30% della SAU complessiva) e dai pascoli (24%). Seguono le coltivazioni ortofrutticole (9%), l'olivo ed i prati avvicendati (8%), gli erbai ed i prati (6%), la vite da vino (5%) e chiudono l'elenco con quote residuali i semi oleosi (2%), la barbabietola da zucchero (1%) ed il tabacco (0,2%) (tab. 3).

Tabella 2: Superficie agricola utilizzata in Italia per aggregato colturale nel triennio 2002-2004

Superficie totale	2002	2003	2004
Cereali	4.284.427	4.148.400	4.278.780
Pascoli	3.473.939	3.467.874	3.481.942
Colture ortofrutticole	1.364.891	1.360.375	1.365.391
Olivo	1.170.362	1.162.713	1.166.022
Prati avvicendati	1.182.605	1.151.536	1.116.351
Erbai	956.127	933.523	920.541
Prati	904.928	879.640	872.605
Vite da vino	797.977	789.155	768.045
Semi oleosi	327.392	307.837	277.431
Barbabietola da zucchero	245.664	210.620	185.805
Tabacco	37.676	36.577	33.760
Piante tessili	357	924	1.090
S.A.U.	14.746.345	14.449.174	14.467.763

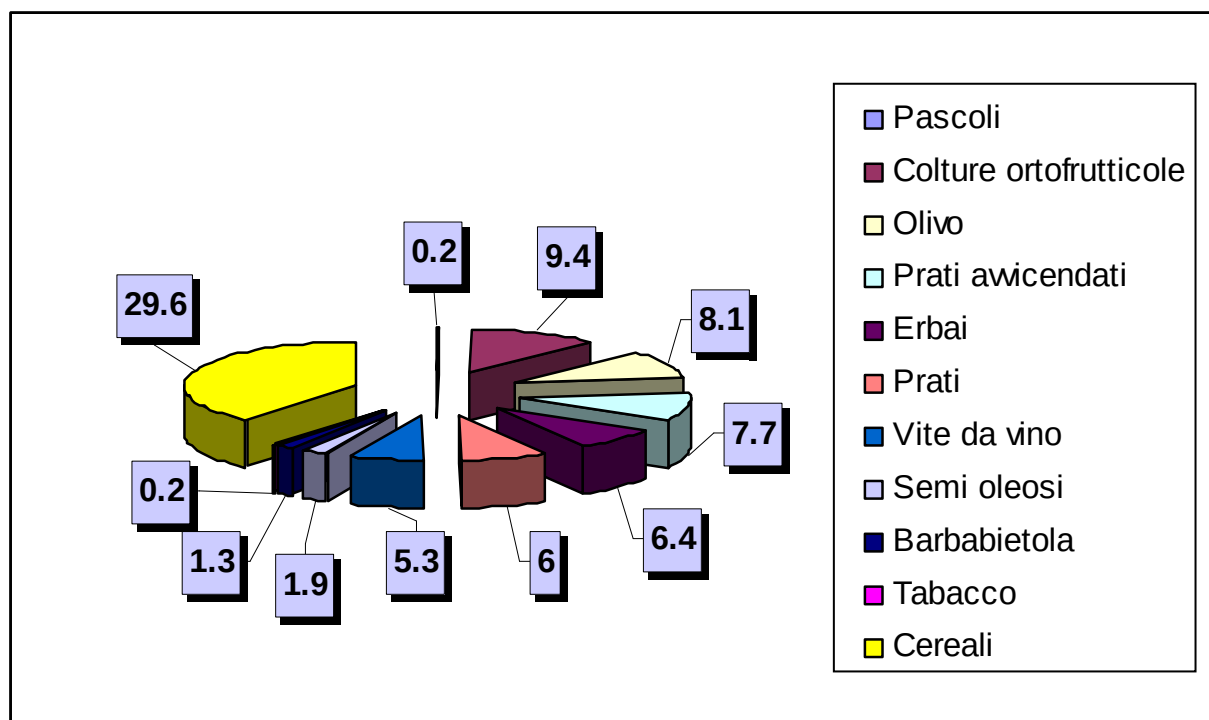


Figura 3: Percentuale di SAU per aggregato culturale.

Le percentuali di SAU per aggregato culturale sono raffigurate in figura 3.

Molto rappresentate sono le coltivazioni foraggere che ricoprono oltre 6,3 milioni di ettari, corrispondenti a circa il 45% della SAU nazionale. Queste coltivazioni possono essere distinte in due grandi gruppi: le foraggere permanenti (pascoli e prati) e le foraggere temporanee (prati avvicendati ed erbai). Le superfici a pascolo ricoprono 3,5 milioni di ettari, ossia circa un quarto della SAU, mentre i prati si attestavano a quota 872mila ettari. Tra le foraggere temporanee si ha una prevalenza dei prati avvicendati rispetto agli erbai, con i primi che occupavano 1,1 milioni di ettari, pari all'8% della SAU. Il 70% dei prati avvicendati è rappresentato dalla coltivazione di erba medica (768mila ettari). Gli erbai invece ricoprono oltre 920mila ettari, circa il 6% della SAU, con la netta prevalenza degli erbai monofiti (534mila ettari) sui polifiti (386mila ettari). I principali erbai monofiti sono quelli di mais ceroso e loietto.

Un altro grande gruppo di colture, in termini di superficie investita, è rappresentato dai cereali, che comprendono: frumento duro e tenero, mais, orzo,

riso, avena, sorgo, segale ed altri cereali minori. La superficie investita a cereali è pari a 4,3 milioni di ettari, ossia circa un terzo della SAU.

Le produzioni ortofrutticole si estendono su 1,3 milioni di ettari, il 9% sulla SAU. La coltivazione dell'olivo interessa poco meno di 1,2 milioni di ettari, pari all'8% della SAU ed a seguire si collocano la viticoltura da vino (768mila ettari), la produzione di semi oleosi (277mila ettari), prevalentemente soia, ma anche girasole e colza; la coltivazione della barbabietola da zucchero (185mila ettari), il tabacco (34mila ettari) ed infine le piante tessili (canapa e lino) che occupano superfici modestissime anche se in rapido aumento rispetto agli anni precedenti.

In tabella 4 sono riportati gli ettari investiti in colture ortofrutticole nel triennio 2002-2004 e nella figura 4 sono raffigurate le percentuali di queste ultime.

Tabella 3: Superficie agricola investita in colture ortofrutticole in Italia nel triennio 2002-2004

Coltivazioni	2002	2003	2004
Ortaggi in pieno campo (escluso pomodoro da industria)	364.931	364.998	359.962
Frutta fresca	320.193	312.956	313.421
Agrumi	179.470	172.838	171.666
Frutta in guscio	159.610	159.037	156.711
Pomodoro da industria	68.815	81.356	88.179
Piante da tubero (patate e batate)	78.359	75.340	73.837
Uva da tavola	73.620	72.445	71.676
Legumi secchi	65.667	70.488	70.840
Ortaggi in serra	30.608	31.750	34.395
TOTALE ORTOFRUTTA	1.341.273	1.341.208	1.340.687
Frutta fresca e in guscio + Agrumi + Uva	732.893	717.276	713.474
Ortaggi + Legumi + Patate	608.380	623.932	627.213

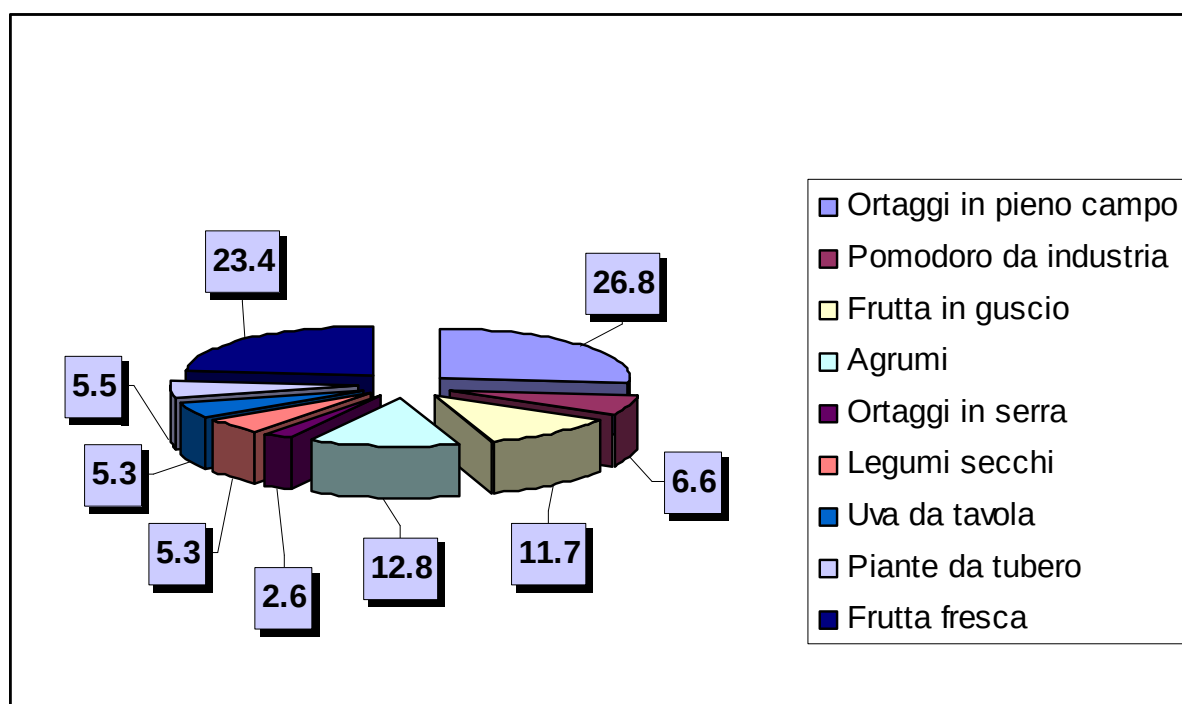


Figura 4 : Percentuale di SAU investita in colture ortofrutticole

In totale la superficie italiana investita a prodotti ortofrutticoli ammonta a 1.365.391 ettari, pari al 9,4% della superficie agricola utilizzata, mentre la produzione raccolta è pari a circa 28 milioni di tonnellate.

Di seguito è riportata la ripartizione per regione della superficie totale e della produzione ortofrutticola. La ripartizione per regione riguarda sia le coltivazioni ortofrutticole nel complesso sia i principali aggregati (frutta fresca, agrumi, uve da tavola, frutta in guscio, ortaggi in pieno campo, ortaggi in serra, patate e legumi).

I dati sono sintetizzati sulle regioni maggiormente rappresentative per aggregato culturale.

A livello regionale la superficie ortofrutticola nazionale vede cinque regioni con più di 100mila ettari investiti: Sicilia (328mila ettari), Puglia (230mila ettari), Emilia Romagna (153mila ettari), Campania (133mila ettari) e Calabria (100mila ettari). Seguono il Lazio, che ha una superficie ortofrutticola superiore a 70mila ettari, il Veneto (62mila ettari), la Sardegna ed il Piemonte con 50mila ettari, Trentino Alto Adige, Abruzzo e Basilicata con 30mila ettari.

Se si considera la produzione raccolta nel 2004, l'Emilia Romagna con 4,8 milioni di tonnellate stacca le altre regioni ed è seguita da Puglia e Sicilia, rispettivamente con 4,5 e 4,4 milioni di tonnellate. Seguono Campania (2,6 milioni di tonnellate), Calabria (2,3 milioni di tonnellate), Veneto (1,5 milioni di tonnellate), Trentino Alto Adige (1,4 milioni di tonnellate) e Lazio (1,3 milioni di tonnellate).

Le aziende censite tra aziende agricole, zootecniche e forestali in Italia sono circa 2,6 milioni. Per quanti riguarda la diffusione delle colture per azienda i dati del censimento evidenziano che particolarmente diffuse sono le colture dei seminativi e le coltivazioni legnose agrarie.

La coltivazione dei seminativi è presente nel 59,9% delle aziende e copre il 55,6% della SAU e il 37,4% della superficie totale delle aziende.

Le coltivazioni legnose agrarie sono presenti nel 71,7% del totale e sono rappresentate in particolare dall'olivicoltura (1,2 milioni di aziende) e dalla viticoltura (790 mila aziende) ma anche dalla frutticoltura e agrumicoltura (circa 650 mila aziende). La relativa superficie investita rappresenta il 18,6% della SAU e il 12,5% della superficie totale, anche in questo caso con prevalenza delle superfici ad olivo (8,2% della SAU) e a vite (5,4% della SAU).

Per quanto riguarda l'agricoltura eco-compatibile, invece, l'Italia si pone al primo posto in Europa e al quarto nel mondo per estensione della superficie a biologico.

Questo tipo di agricoltura, generalmente implica non solo minori rilasci di sostanze inquinanti nel suolo, ma anche lavorazioni ridotte con effetti meno dannosi in termini di erosione e riduzione della sostanza organica che, peraltro, viene reintegrata con pratiche di sovescio. La superficie destinata all'agricoltura biologica, con un'inversione di tendenza rispetto agli ultimi anni, nel 2005 è aumentata assestandosi su 1.067.102 ettari, pari al 7% della SAU, di cui oltre la metà è costituito da prati e pascoli e superfici a foraggio, in parte destinate alla zootecnia biologica.

Spesso, però, il mancato riconoscimento di un maggiore valore aggiunto rispetto ai prodotti convenzionali concorre fortemente alla contrazione della superficie a

biologico, a sua volta causato dalle difficoltà di integrazione degli agricoltori che ottengono un minore potere contrattuale nei confronti delle imprese di trasformazione e dei distributori.

CAPITOLO 3: LA MODELLIZZAZIONE DEI BACINI IDROGRAFICI

3.1 Premessa

Lo studio dei sistemi ambientali risulta essere molto complicato; il numero di variabili da considerare è elevato così come le relazioni interconnesse tra le variabili stesse. I sistemi naturali, difatti, possono essere definiti come “sistemi complessi”.

Anche la comprensione dei fenomeni e delle dinamiche che si sviluppano in un bacino idrografico riguarda lo studio di un sistema naturale complesso.

A questo scopo devono infatti essere considerati numerosi fattori come la morfologia del territorio, la distribuzione spaziale, qualitativa e quantitativa delle precipitazioni, così come dei suoli e degli usi del suolo. E' importante, inoltre, definire la modalità di sviluppo dei fenomeni fisici attraverso i processi di trasformazione, la risposta idrologica e sedimentologica, la variazione nel tempo. Tutte queste variabili influenzano la caratterizzazione dei flussi e dei carichi annessi come inquinanti e sedimenti che si ripercuotono in tutto il bacino idrografico.

Gli studi empirici applicati ai bacini idrografici risultano di difficile attuazione: i fenomeni oggetto di studio sono osservabili in archi temporali estesi e su aree molto vaste e l'analisi dei costi-benefici per la loro realizzazione risulta enormemente svantaggiosa.

Tuttavia lo studio idrologico a scala di bacino è di notevole importanza per le molte applicazioni pratiche che ne derivano e che hanno rilevanza in diversi settori a livello gestionale: uso delle risorse irrigue e del suolo a livello di bacino, analisi della qualità delle acque ad uso irriguo e civile, studio delle conseguenze dei cambiamenti climatici e di gestioni diverse del suolo ecc.

Per questi motivi l'approccio modellistico si è rivelato di notevole interesse e rappresenta una importante alternativa per la realizzazione di questo tipo di studi.

I modelli sono sempre delle riproduzioni molto semplificate della realtà ma rappresentano la migliore tecnologia disponibile per l'analisi dei sistemi ambientali nel loro insieme.

La modellazione matematica consente di elaborare un numero enorme di dati in tempi brevi gestendo numerosi parametri attraverso l'uso dei calcolatori, lo sviluppo della modellistica infatti si è andato incrementando di pari passo a quello dei calcolatori.

I modelli simulano matematicamente i processi fisici che si sviluppano nei bacini idrografici e permettono l'analisi dei fenomeni studiati nel tempo restituendo serie storiche di output. Questo consente un uso previsionale delle simulazioni e permette la creazione di scenari futuri.

Particolarmente utili risultano, nella modellizzazione dei sistemi ambientali, i Sistemi Informativi Territoriali SIT (oppure GIS Geographic Information System) che consentono la raccolta, georeferenziazione ed elaborazione dei dati, rendendo possibili molti tipi di analisi. I GIS consentono, inoltre, la manipolazione e la visualizzazione dei risultati e la fruizione delle informazioni, aspetti fondamentali nello sviluppo dei processi decisionali.

3.2 L'inquinamento da fonti diffuse

Strettamente collegato allo studio dei fenomeni idrologici a scala di bacino è lo studio dell'inquinamento idrico da fonti diffuse (NPS *Non Point Source*).

L'inquinamento idrico può essere dovuto a diversi fattori e, in base al tipo di fonte, viene classificato in inquinamento di tipo puntuale o diffuso. Si parla di inquinamento puntuale quando questo è dovuto a scarichi puntiformi, cioè localizzati in un punto preciso dello spazio come ad esempio scarichi di depuratori o scarichi industriali, mentre si parla di inquinamento da fonti diffuse quando la fonte dei carichi inquinanti è areale.

Quest'ultimo fenomeno è associabile prevalentemente alle attività produttive estese come attività agricole, allevamenti intensivi, attività industriali e alla presenza delle grosse infrastrutture ad uso antropico dovute all'urbanizzazione del territorio.

La principale differenza riscontrabile tra gli inquinanti NPS e quelli di origine puntuale riguarda la modalità di diffusione: mentre gli inquinanti da fonte puntuale sono rilasciati nel substrato in modo continuo e facilmente caratterizzabile, gli inquinanti NPS hanno una modalità di diffusione discontinua e strettamente correlata agli eventi meteorici ed alle loro caratteristiche. La quantità, l'intensità e la distribuzione spaziale delle precipitazioni sono direttamente correlate a quelle degli inquinanti.

La diffusione degli inquinanti di origine diffusa è quindi interconnessa al ciclo idrologico; gli inquinanti si muovono per percolazione nei suoli fino a raggiungere le falde acquifere o ad instaurare movimenti laterali o per ruscellamento superficiale arrivando ai corpi idrici. L'unità di base nello studio dell'inquinamento da fonti diffuse proprio per queste caratteristiche viene ad essere il bacino idrografico.

In Italia, così come in molti altri paesi, le attività agricole sono una delle principali fonti di inquinamento diffuso. Alle attività agricole è dovuta l'immissione nei corpi idrici di nutrienti e pesticidi (erbicidi, fitofarmaci, antiparassitari, ecc.), inoltre le attività agricole intensive sono la principale causa della perdita di ingenti quantitativi di sedimenti e del conseguente fenomeno di desertificazione.

Tra i nutrienti particolare rilievo assumono l'azoto e il fosforo che vengono addizionati ai terreni agrari in maniera massiva.

Questi elementi, difatti, insieme al potassio, rappresentano i macroelementi principali per la crescita delle colture cioè sono gli elementi che maggiormente vengono assorbiti dalle piante nella loro crescita. Per questo motivo la loro presenza nei suoli, in corrispondenza di aree coltivate è insufficiente e le colture hanno bisogno di concimazioni che si basano quasi esclusivamente su questi elementi (Bonciarelli, 1989).

La tendenza in ambito agricolo è stata fino ad oggi quella di fornire ai terreni questi elementi anche in surplus al fine di ottenere le rese necessarie alle leggi economiche. Il surplus attraverso i movimenti delle acque meteoriche e di irrigazione arriva ai corpi idrici con ingenti danni all'ambiente e alla salute pubblica.

I deterioramenti provocati dall'inquinamento da azoto e fosforo sono diversi e di differente entità e vanno dall'abbassamento della qualità delle acque all'impossibilità del loro impiego per uso potabile fino all'alterazione dei sistemi biologici a causa del fenomeno dell'eutrofizzazione.

Al giorno d'oggi si sta assistendo ad una diversa presa di coscienza, in seguito ai problemi ambientali che vengono continuamente denunciati e cominciano, anche in ambito europeo, ad essere presenti programmi ed azioni politiche che rendano razionale l'uso di prodotti concimanti.

Nell'affrontare l'argomento delle fonti diffuse di inquinamento di origine agricola è d'obbligo il riferimento agli Stati Uniti, nazione in cui è stata prodotta in merito all'avanguardia grazie all'ottimo funzionamento dei servizi tecnici che garantiscono l'indispensabile supporto di dati ambientali: si pensi al capillare lavoro del Soil Conservation Service (Leone, 1991).

Per comprendere l'entità del problema è possibile fare riferimento ad un inventario statunitense sulla qualità delle acque dell'EPA sviluppato 1977.

Già più di un trentennio fa risultava che il 68 % dell'inquinamento riguardante i bacini idrografici americani proveniva da fonti diffuse di origine agricola (90% nelle aree con attività agricola intensiva) (Braden e Uchtmann, 1985).

I suoli agrari erano responsabili, negli USA, dell'immissione nelle acque superficiali di circa 7 milioni di tonnellate di azoto e 3 milioni di tonnellate di fosforo all'anno. A queste quantità vanno ad aggiungersi quelle prodotte dagli allevamenti, stimate in circa 7 milioni per l'azoto e 2 milioni per il fosforo. Inoltre il 90% di coliformi, azoto totale (ad eccezione dei nitrati) e ferro, nonché fino al 70% di fosforo totale e zinco e fino al 60% di cromo, piombo, e rame provenivano da fonti diffuse (Chester e Schiero, 1985).

In Italia mancano dati capillari sullo stato di inquinamento idrico da fonti diffuse anche se alcuni studi sono stati condotti in quest'ambito ed evidenziano l'importanza del problema (Leone e Marini, 1993).

Esistono, inoltre, dati sulla qualità dei corpi idrici principali prodotti nei quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque (IRSA) del Consiglio Nazionale delle Ricerche che danno un quadro orientativo sulla situazione ambientale.

In particolare uno studio IRSA del 1992 attuato su quattro bacini idrografici maggiori italiani ha evidenziato che il carico inquinante di azoto di dimensioni maggiori deriva da attività agricole mentre il carico di fosforo da agricoltura è secondo solo agli scarichi di origine civile.

E' importante anche evidenziare le caratteristiche di solubilità delle diverse sostanze inquinanti. L'azoto in particolare essendo molto solubile si ritrova principalmente in soluzione mentre il fosforo avendo una solubilità nettamente inferiore lo si ritrova per lo più in forma particolata. Per i pesticidi invece, che sono di natura molto differente tra loro, non è possibile questa distinzione anche se negli ultimi anni la tendenza è quella di immettere sul mercato prodotti sempre più solubili in grado di produrre minori residui soprattutto in campo alimentare, con conseguenze importanti per le acque sotterranee e le falde acquifere.

Le attività agricole inducono delle profonde trasformazioni nei suoli che condizionano anche le modalità di diffusione degli inquinanti. Aree coltivate intensivamente sono soggette a forte erosione nel tempo e quest'ultima a lungo andare causa una maggiore percolazione dovuta ad una minore ritenzione idrica dei suoli. Quindi la stessa area agricola può essere interessata in tempi diversi sia da fenomeni di ruscellamento che di percolazione.

Il regime pluviometrico condiziona in maniera predominante la diffusione degli inquinanti. In Italia si assiste ad una forte stagionalità e ad una accentuata differenziazione dei regimi pluviometrici nelle diverse zone climatiche (cap. 2) e la diffusione degli inquinanti segue questi andamenti. In generale si riscontrano piogge intense e di forte energia tra la fine di dell'estate e l'inizio dell'inverno e piogge leggere ma abbondanti e prolungate tipiche del periodo inverno – primavera.

3.3 La modellistica NPS

Negli ultimi decenni sono stati sviluppati un gran numero di modelli matematici per lo studio dell'inquinamento da fonti diffuse in bacini idrografici agricoli.

I modelli elaborati in questo ambito si basano sempre su modelli per lo studio idrologico, i più complessi dei quali simulano il processo di trasformazione afflussi-deflussi associando quelli di dilavamento, trasporto e deposito degli inquinanti, erosione e calcolando i parametri di qualità.

Secondo la classificazione di Chow (1972), i modelli idrologici possono essere distinti in modelli fisici e astratti.

I primi tentano di rappresentare attraverso equazioni matematiche i fenomeni idrologici individuali e sono molto usati per studiare processi come l'infiltrazione, il deflusso superficiale, l'assorbimento e il rilascio.

I secondi risultano molto utili nello studio di inquinamento da fonti diffuse perchè cercano di rappresentare la realtà in forma matematica, esaminando non i singoli processi ma l'insieme delle dinamiche idrologiche.

Questi ultimi sempre nella stessa classificazione, sono suddivisi in:

- semplici modelli statistici;
- modelli idrologici di tipo deterministico;
- modelli idrologici di tipo stocastico;

I modelli statistici sono basati su calcoli di probabilità e solitamente sono procedure semplici mentre i modelli deterministici e stocastici sono più complessi e la principale differenza esistente tra loro consiste nel fatto che nei modelli deterministici, che ignorano le variazioni casuali, un dato set di input fornisce solo un set di output, mentre l'output dei modelli stocastici è spesso espresso in termini di significato e variazioni probabilistiche.

Chow inoltre classifica i modelli per l'inquinamento diffuso sulla base dell'approccio utilizzato in: modelli a parametri costanti (lumped-parameter models), e modelli a parametri distribuiti (distributed-parameters).

I primi considerano il bacino o una significativa porzione di esso come un'unità. Le diverse caratteristiche di un bacino idrografico, o dell'unità di studio, sono raggruppate insieme attraverso l'uso di equazioni empiriche che rendono i parametri semplificati ed uniformati per una modellazione di insieme. I parametri inoltre sono spesso determinati per il sistema in esame da un processo di calibrazione e taratura degli output che avviene attraverso il confronto con dati di campo, per cui la relazione input-output può essere descritta con la seguente equazione:

$$Y = \Phi X$$

dove

X= vettore di input (singolo o multivariato)

Y= vettore di output (singolo o multivariato)

Φ = funzione di passaggio (semplice o complessa)

I modelli a parametri distribuiti invece suddividono il bacino idrografico in piccole unità con caratteristiche omogenee sulle quali vengono poi sviluppati i calcoli di bilancio di massa in entrata e in uscita. Quindi ogni area omogenea è analizzata individualmente e si ottengono, di conseguenza, output per ognuna di esse. Gli output di una unità possono fungere anche da input per le unità adiacenti mentre l'output dell'intero bacino è dato dalla somma degli output delle singole unità. Questo implica una maggiore complessità di calcolo ed una maggiore difficoltà nella raccolta degli input ma forniscono descrizioni dei sistemi analizzati più accurate ed anche i cambiamenti, all'interno del sistema, possono essere in seguito modellati più semplicemente.

Per i modelli a parametri distribuiti risulta estremamente vantaggioso l'uso dei Sistemi Informativi Territoriali con cui è possibile spazializzare i dati geografici necessari alle simulazioni come proprietà idrologiche e morfologiche del suolo, distribuzione spaziale e temporale della pioggia, uso del suolo ecc.

Attraverso l'uso del GIS, inoltre, è possibile visualizzare interattivamente i risultati delle modellazioni dell'inquinamento da fonti diffuse e mostrare la localizzazione delle fonti e l'ampiezza dei contributi dei diversi inquinanti alla qualità totale del deflusso (Haan e Storm, 1996).

I modelli sono classificati anche sulla base della risposta in termini temporali cioè possono simulare le conseguenze di un singolo evento o di un periodo di tempo in maniera continua, utilizzando serie storiche di dati.

I modelli basati sull'evento "event oriented" simulano un singolo evento come una piena, un evento piovoso particolare ecc. Per questi il principale vantaggio consiste nel fatto che sono necessari pochi dati di input e poco tempo di elaborazione ma il principale svantaggio è che non sono adatti a simulare i cambiamenti del sistema.

I modelli a processo continuo invece operano su un intervallo di tempo utilizzando dati da giornalieri o sub-giornalieri, come dati orari ed eseguono in maniera continua un bilancio di massa dell'acqua e degli inquinanti nel sistema.

In particolare poi esistono numerose tipologie di modelli per l'inquinamento idrico da fonti diffuse.

Novotny e Olem, in un lavoro del 1994, hanno individuato una serie di caratteristiche comuni ai modelli NPS:

- Una componente che descrive il processo di generazione del deflusso superficiale e che valuta la trasformazione in pioggia netta.
- La componente suolo e sottosuolo, che descrive il movimento dell'acqua dal suolo insaturo al sottosuolo saturo. Tali sotto-modelli eseguono un bilancio tra umidità del suolo da una parte e velocità di infiltrazione, evapotraspirazione e percolazione dall'altra. Poiché l'infiltrazione è una funzione dell'umidità del suolo, solitamente viene implementata una

procedura iterativa. Se la componente suolo non è inclusa nel modello, il tasso di infiltrazione viene valutato attraverso un'equazione empirica.

- Accumulo, rimozione e dilavamento di inquinanti da superfici impermeabili. Tale componente, tipica dei modelli per le aree urbane, considera la deposizione degli inquinanti in forma particolata durante i giorni secchi ed il loro successivo dilavamento durante il successivo evento di pioggia (sono i cosiddetti modelli Buildup and Washoff). La massa accumulata è il risultato della deposizione di inquinanti particolati, provenienti da diverse fonti, quali deposizione atmosferica, emissioni veicolari, applicazione di sale.
- Componenti di erosione del suolo, attraverso cui è possibile stimare la perdita di suolo dalle aree impermeabili. La Universal Soil Loss Equation (USLE) è il metodo più comunemente usato per rappresentare questo processo.
- Adsorbimento degli inquinanti sul suolo e sulla polvere delle aree urbane. Tale componente, che nei modelli per le fonti diffuse di aree agricole è rappresentata dalle relazioni di adsorbimento-deposizione, nella massima parte dei modelli per le aree urbane è sostituita da fattori potenziali che mettono in relazione l'inquinante in forma particolata ai solidi sospesi totali.
- Componenti di deflusso e di trasporto degli inquinanti. Tecniche comuni per la pioggia netta e il deflusso superficiale (convoluzione), in molti casi fanno affidamento su un idrogramma unitario sintetico. Il percorso compiuto attraverso i canali e le reti fognarie è spesso accompagnato da formule dell'onda cinematica.
- Nei sistemi fognari misti, la generazione del deflusso e la deposizione dei solidi nelle fognature, così come la crescita della biomassa, devono essere considerate. Il contributo fornito dai solidi depositatisi potrebbe essere fondamentale.

3.4 L'integrazione con i GIS

La modellistica ambientale ha trovato particolare giovamento nell'integrazione con i Sistemi Informativi Territoriali e anche i modelli sviluppati in campo idrologico e quelli per lo studio delle fonti diffuse sono stati interfacciati nel tempo ai software GIS in diverso modo.

E' possibile individuare tre livelli potenziali di integrazione tra i modelli idrologici NPS e i software GIS (Tim e Jolly, 1994).

Nel primo livello di integrazione il GIS ed il modello sono sviluppati separatamente ed eseguiti indipendentemente. Il GIS serve solo come preprocessor dei dati di input per il modello.

Il secondo livello di integrazione viene sviluppata un'interfaccia interattiva tra GIS e modello. In questo livello di integrazione, il GIS prepara i dati di input per la modellazione e acquisisce a sua volta i dati di output del modello per la presentazione dei risultati finali o per ulteriori elaborazioni.

Il terzo livello di integrazione si riferisce solitamente ad un'integrazione completa nella quale il modello idrologico e di qualità dell'acqua è implementato direttamente nel GIS. In questo modo il pre-processamento dei dati e le funzioni analitiche sono effettuate all'interno dello stesso software. A questo livello di integrazione, l'interfaccia GIS consente di supportare la preparazione dei file di input, far girare il modello e visualizzarne i risultati.

Questo livello d'integrazione è tecnicamente preferito dalla maggior parte dei ricercatori, ma è spesso difficoltoso da implementare, a causa dell'incompatibilità nelle strutture dei dati del modello e del GIS, o perché i software più in uso hanno formato proprietario e non consentono l'introduzione di ulteriori routines o moduli.

A volte possono presentarsi problemi dovuti anche alla limitata capacità di calcolo numerico all'interno dell'ambiente di programmazione del GIS.

Proprio per i motivi sopra descritti, la maggior parte dei modelli idrologici a interfaccia GIS esistenti mantengono la loro identità separata come nel secondo livello di integrazione.

3.5 I principali modelli sviluppati

Di seguito sono elencate in tabella le caratteristiche dei principali modelli idrologici per lo studio dell'inquinamento da fonti diffuse in bacini agricoli, sviluppati a livello globale.

In particolare, in ogni tabella vengono riportati solo gli elementi distintivi per ciascun modello, evidenziando il filone di ricerca per quelli derivati da ampliamenti di modelli precedentemente sviluppati. I modelli di seguito descritti sono:

- ANSWERS - Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Model (tab. 4);
- AGPS - Agricultural Nonpoint Source Pollution (tab. 5);
- CREAMS - Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System (tab. 6);
- GLEAMS - Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems (tab. 7);
- OPUS (tab. 8);
- SWRRB - Simulator for Water Resources in Rural Basins (tab. 9);
- PRZM - Pesticide Root Zone Model (tab. 10);
- RUSTIC - Risk of Unsaturated/Saturated Transport and Transformation of Chemicals Concentration (tab. 11);
- BASINS - Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources (tab. 12).

Tabella 4: Principali caratteristiche del modello ANSWERS

ANSWERS: Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation Model	
SVILUPPATORI	Beasley e Huggins (1981) - Bouraoui (1994).
SCOPI	Previsione della risposta idrologica e dell'erosione in bacini idrografici agricoli.
PARAMETRIZZAZIONE	Parametri distribuiti.
CARATTERISTICHE APPLICATIVE	Il modello simula un singolo evento. Il bacino viene suddiviso in una griglia a maglie quadre per le quali i parametri al suo interno hanno un valore uniforme. L'output di una maglia funge da input per la maglia adiacente. Il modello ha una struttura di tipo modulare che consente all'utente di modificare in maniera semplice il codice di calcolo esistente e di inserire nuovi algoritmi.
PROCESSI SIMULATI	Intercezione: il massimo volume di intercezione è calcolato con una interpolazione lineare funzione del livello di crescita e della tipologia vegetazionale. Infiltrazione: metodo di Green & Ampt. Immagazzinamento superficiale. Deflusso superficiale. Percolazione. Distaccamento. Redistribuzione dell'acqua dopo l'evento: determinata sulla base del flusso di gravità in condizioni di non saturazione.

	Trasporto e deposizione dei sedimenti. Trasporto e deposizione dei nutrienti (azoto e fosforo): simulati usando equazioni di correlazione tra le concentrazioni chimiche, la produzione di sedimenti e il deflusso. Crescita delle piante: sfruttando l'indice di copertura fogliare variabile e dalla zona radicale. Evapotraspirazione: equazione di Priestly-Taylor
INTERFACCIA	Il modello ANSWERS è stato interfacciato al software GIS open source GRASS (Rewerts e Engel, 1991), ad un software GIS dedicato (DeRoo, 1993) e ad ArcView attraverso la costruzione dell'interfaccia QUESTIONS (Veith et al., 2000).
GESTIONE DEGLI OUTPUT	Il modello consente la valutazione selettiva degli output, grazie all'approccio distribuito, in quanto questi non sono limitati solo alla sezione di chiusura del bacino. Gli output consistono in un idrogramma dell'evento ed un diagramma che rappresenta la quantità di sedimento in funzione del tempo (Von EuW et al., 1989).
LIMITI	Estremamente sensibile alla pioggia fornita come input; risulta decisiva la scelta dell'evento da simulare. Risulta complicata infatti anche la compilazione del file contenente i dati di input dell'evento scelto. Il modello è sensibile anche alle infiltrazioni, variabili per piccoli eventi. Esso non consente la simulazione dei processi di scioglimento della neve e dei pesticidi. Sono simulati solo l'azoto e il fosforo che sono rappresentati da equazioni di correlazione che non considerano processi di trasformazione.

Tabella 5: Principali caratteristiche del modello AGNPS

AGNPS: Agricultural Nonpoint Source Pollution	
SVILUPPATORI	USDA-ARS (United States Department of Agriculture - Agriculture Research Service), MPCA (Minnesota Pollution Control Agency) ed il Soil Conservation Service (Young et al., 1987).
SCOPI	Stima accurata della qualità del deflusso, in particolare riferita a nutrienti e sedimenti a scopo previsionale per confrontare gli effetti delle varie alternative di gestione del bacino idrografico studiato.
PARAMETRIZZAZIONE	Parametri distribuiti.
CARATTERISTICHE APPLICATIVE	Il modello simula singoli eventi di pioggia o fornisce output di tipo continuo. I bacini idrografici sono suddivisi in celle quadrate all'interno delle quali sono assegnati parametri omogenei.
PRINCIPALI PROCESSI SIMULATI	Trasporto e deposizione di inquinanti solubili. Trasporto e deposizione di inquinanti adsorbiti sui solidi Trasporto e deposizione dei nutrienti: determinati usando relazioni tra le concentrazioni chimiche, la deposizione dei sedimenti e il volume di deflusso. Erosione della superficie del suolo e dei canali: versione modificata dell'USLE - Universal Soil Loss Equation (Wishmeier and Smith, 1978) con la quale l'erosione viene calcolata per particelle di cinque categorie di grandezza: sabbia, limo, argilla, piccoli e grandi aggregati
INTERFACCIA	Il modello AGNPS, ad esempio, è stato interfacciato a GRASS (Line et al., 1997) e ad ArcInfo (Haddock e Jakowski, 1993; Liao e Tim, 1997).
GESTIONE DEGLI	Gli output vengono forniti per una specifica cella o per

OUTPUT	l'intero bacino. Essi includono la stima del volume di deflusso, la portata di picco del deflusso, l'area interessata dall'erosione sia superficiale che dei canali, la produzione di sedimenti, la stima dei carichi inquinanti e la conducibilità elettrica nel deflusso.
LIMITI	La compilazione degli input risulta complessa.

Tabella 6: Principali caratteristiche del modello CREAMS.

CREAMS: Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management System	
SVILUPPATORI	USDA-ARS (United States Department of Agriculture - Agriculture Research Service) (Knisel, 1980).
SCOPI	Ottenere simulazioni dettagliate a scala di campo.
PARAMETRIZZAZIONE	Parametri distribuiti.
CARATTERISTICHE APPLICATIVE	Il modello è in grado di sviluppare simulazioni continue e lavora a scala di campo. Utilizza sottomodelli separati per le componenti idrologiche, per l'erosione e per gli elementi chimici.
PRINCIPALI PROCESSI SIMULATI	Stima del deflusso con dati di pioggia giornalieri: attraverso il modello dell'SCS Runoff Curve Number. Stima del deflusso con dati di pioggia orari: attraverso l'equazione di Green & Ampt. Erosione: considera i processi base di distacco del suolo, trasporto e deposizione. Il distacco delle particelle di suolo è modellato attraverso la Universal Soil Loss Equation per un singolo evento di pioggia. Trasporto e deposizione dei nutrienti in soluzione.

	Trasporto e deposizione dei nutrienti adsorbiti sui sedimenti. Trasporto e deposizione dei pesticidi. Valutazione delle migliori pratiche di gestione: attraverso la simulazione delle diverse attività agronomiche, quali applicazione di pesticidi, trattamento dei liquami di allevamento, operazioni di aratura e di terrazzamento. Simulazione delle pratiche gestionali definite dall'utente.
INTERFACCIA	No
GESTIONE DEGLI OUTPUT	Il modello calcola il volume di deflusso, la portata di picco, l'infiltrazione, l'evapotraspirazione, il contenuto d'acqua del suolo e la percolazione su base giornaliera. Vengono stimate anche l'erosione giornaliera e la quantità di sedimenti. Sono calcolate, inoltre, le concentrazioni medie associate ai sedimenti e le sostanze chimiche disciolte e presenti nelle acque di deflusso, i sedimenti, e l'acqua percolata (Leonard et al, 1986).
LIMITI	Le maggiori limitazioni del modello riguardano la ridotta capacità di gestione ed elaborazione dei dati e l'inefficienza della simulazione dei processi di accumulo e scioglimento della neve e dell'impatto idrologico del terreno ghiacciato (Knisel et al., 1993).

Tabella 7: Principali caratteristiche distintive del modello derivato GLEAMS.

GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems	
DERIVAZIONE	Deriva dal modello CREAMS.
SVILUPPATORI	Leonard et al., (1987).
SCOPI	Il modello è stato sviluppato per utilizzare le pratiche gestionali individuate dal modello CREAMS e includere una componente che valuti il flusso verticale dei pesticidi nella zona radicale.
CARATTERISTICHE DISTINTIVE DAL MODELLO ORIGINARIO	Calcolo del deflusso superficiale. Infiltrazione: metodo dell'SCS Curve Number modificato (Williams e Nicks 1982). Trasporto e diffusione dei pesticidi: a questo scopo il suolo è suddiviso in strati di diverso spessore, da un minimo di tre ad un massimo di dodici strati, utilizzati per la circolazione dell'acqua e dei pesticidi (Knisel et al., 1989).

Tabella 8: Principali caratteristiche distintive del modello derivato OPUS

OPUS	
DERIVAZIONE	Deriva dalla fusione dei due modelli CREAMS e GLEAMS.
SVILUPPATORI	Smith, (1992).
SCOPI	Unire in un unico modello le funzionalità dei modelli CREAMS e GLEAMS e sviluppare simulazioni a scala di bacino.
CARATTERISTICHE DISTINTIVE DAL MODELLO	Le condizioni climatiche sono simulate attraverso un modello di generazione del tempo su base giornaliera (WGEN), il deflusso giornaliero è calcolato da un

ORIGINARIO	approccio del tipo SCS modificato e l'erosione del suolo viene modellata usando la Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) (Williams, 1975). Ulteriori processi rispetto ai modello originari: trasporto dei sedimenti; trasporto chimico; decadimento microbiologico dei suoli.
-------------------	---

Tabella 9: Principali caratteristiche distintive del modello derivato SWRRB

SWRRB: Simulator for Water Resources In Rural Basins	
DERIVAZIONE	Deriva da un'incrementazione del modello CREAMS.
SVILUPPATORI	Williams et al. (1985) - Arnold et al. (1990).
SCOPI	Simulare la qualità delle acque in bacini rurali.
CARATTERISTICHE DISTINTIVE DAL MODELLO ORIGINARIO	Il modello opera a scala giornaliera e sono stati implementati ulteriori processi: condizioni meteorologiche; idrologiche; crescita delle colture; sedimentazione; avanzamento e regressione della piena; movimento dei nutrienti; movimento dei pesticidi.

Tabella 10: Principali caratteristiche del modello PRZM

PRZM: Pesticide Root Zone Model	
SVILUPPATORI	U.S. EPA's Environmental Research Laboratory (Carsel et al., 1984).
SCOPI	Simulare il movimento di sostanze chimiche.
PARAMETRIZZAZIONE	Modello monodimensionale dinamico.
CARATTERISTICHE APPLICATIVE	Il modello è diviso in due grosse componenti denominate idrologia/idraulica e trasporto chimico.
PRINCIPALI PROCESSI SIMULATI	Deflusso: metodo runoff curve number del SCS. Per la simulazione del movimento dell'acqua attraverso la colonna di suolo nella zona insatura vengono utilizzati dati che riguardano il suolo e l'acqua, quali capacità di campo, punto di appassimento e contenuto d'acqua alla saturazione. Erosione: metodo USLE. Evapotraspirazione: da dati di evapotraspirazione potenziale misurata o da equazioni empiriche. Simulazione dell'irrigazione. Trasporto e diffusione di pesticidi sul suolo. Trasporto e diffusione di pesticidi sul suolo sulla copertura fogliare.
INTERFACCIA GIS	No
GESTIONE DEGLI OUTPUT	Il modello rende output per la zona insatura all'interno ed immediatamente sotto l'apparato radicale delle piante.
LIMITI	E' un modello specifico del trasporto chimico e quindi non simula adeguatamente gli altri trasporti.

Tabella 11: Principali caratteristiche distintive del modello derivato RUSTIC

RUSTIC: Risk of Unsaturated/saturated Transport and Transformation of Chemicals Concentration.	
DERIVAZIONE	Deriva dal modello PRZM
SVILUPPATORI	Dean et al. (1989).
SCOPI	Prevedere il destino finale ed il trasporto dei pesticidi attraverso la zona radicale delle colture e la zona satura.
CARATTERISTICHE DISTINTIVE DAL MODELLO ORIGINARIO	I dati richiesti dal modello sono di tipo estensivo e le previsioni sono fatte su base giornaliera. Il modello si basa sull'unione di tre sottomodelli.

Tabella 12: Principali caratteristiche del modello BASINS

BASINS : Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources	
SVILUPPATORI	EPA-United States Environmental Protection Agency.
SCOPI	Analisi dei bacini e della qualità delle acque.
PARAMETRIZZAZIONE	Parametri distribuiti.
CARATTERISTICHE APPLICATIVE	BASINS include tre strumenti di elaborazione: TARGET, ASSESS, e Data Mining. Questi tre strumenti valutano i dati del bacino a grande e piccola scala. Ha una struttura a moduli che si interfacciano. I carichi da fonti diffuse sono calcolati usando un apposito modulo: il Non-Point Source Model (NPSM). L'output dal modello NSPM e dall'analisi delle sorgenti puntiformi può essere

	inserito in ulteriori due moduli aggiuntivi, TOXIROUTE e QUAL2E, per verificare la qualità delle acque nel corpo idrico ricettore.
PRINCIPALI PROCESSI SIMULATI	Calcolo dei carichi da fonti diffuse. Calcolo dei carichi da fonti puntiformi. Integrazione di modelli di valutazione ambientale.
INTERFACCIA	Il modello è completamente sviluppato in ambito GIS. Anche per i modelli TOXIROUTE e QUAL2E è stata costruita una propria interfaccia.
GESTIONE DEGLI OUTPUT	L'analisi delle sorgenti puntuali e diffuse viene eseguita nel programma BASINS con elaborazioni in ambiente GIS.
LIMITI	Il limite principale consiste nel fatto che il modello è stato sviluppato in modo da essere utilizzato con i dati dell'EPA e non si adatta facilmente ad altre tipologie di dati.

CAPITOLO 4: IL MODELLO SWAT

4.1 Caratteristiche generali del modello

Il modello SWAT (Soil and Water Assessment Tool) è stato sviluppato nei primi anni '90 dall'USDA - ARS (United States Department of Agriculture – Agricultural Research Service) e, fin dai suoi esordi, è stato continuamente modificato e ampliato anche nella costruzione di una propria interfaccia GIS che lo rende *user friendly* nonostante la sua complessità di calcolo (Di Luzio et al., 2001) (fig. 5).

SWAT è un modello idrologico a scala di bacino che permette la stima delle componenti del bilancio idrologico e del trasporto di nutrienti, pesticidi e sedimenti e, proprio in funzione di queste caratteristiche, può essere definito un modello gestionale (Brandmeyer J. E., Karimi H. A., 2000). Il modello SWAT consente infatti la simulazione e l'analisi di differenti scenari come, ad esempio, la formulazione di diverse pratiche gestionali (o diversi usi del suolo) oppure la realizzazione di scenari climatici per l'analisi dei cambiamenti climatici.

Particolarmente significativa è anche la diffusione a livello globale del modello: al giorno d'oggi esiste una vasta rete di utilizzatori e sviluppatori in tutto il mondo, un forum di discussione aperto e sono state organizzate varie conferenze internazionali. SWAT è in grado di lavorare su bacini di origine agricola estesi anche contraddistinti da molti tipi di suolo e microclima diversi e caratterizzati da una grossa differenziazione nell'uso del suolo. Inoltre SWAT lavora su periodi di tempo restituendo output giornalieri.

Le principali caratteristiche del modello sono:

- il procedimento di simulazione è fisicamente basato: i processi fisici vengono modellati direttamente da SWAT, attraverso i parametri di input. Sono richiesti input dettagliati di variabili climatiche, proprietà del suolo, topografia, vegetazione e pratiche agronomiche.;
- è efficiente dal punto di vista computazionale anche su bacini estesi e complessi;

- le simulazioni sono di tipo continuo e restituiscono output giornalieri;
- lavora su lunghi periodi di tempo;
- è dotato di un generatore del clima che consente di riempire i dati mancanti e di lavorare su lunghe serie storiche (Neitsch S. L., Arnold J. G. Williams J. R., 1999);
- utilizza un approccio di tipo semi-distribuito: il bacino idrografico viene suddiviso in sottoaree con caratteristiche ambientali (clima, idrologia, litologia, pedologia) ed antropiche (uso del suolo, pratiche gestazionali) omogenee sulla base delle quali viene effettuato un bilancio dei flussi di massa (acqua, sedimento e sostanze chimiche) in entrata ed uscita (Lo Porto et al., 2006).

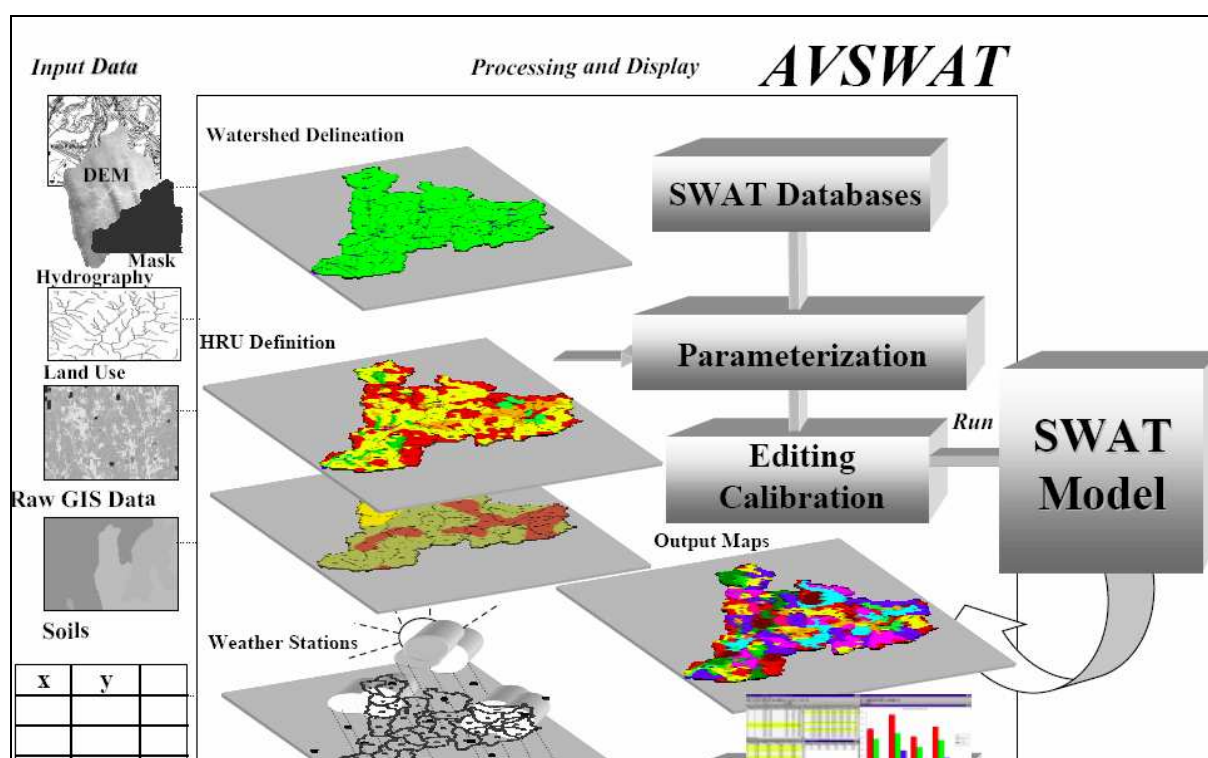


Figura 5: Schematizzazione dei processi di calcolo del modello SWAT e dei dati di input richiesti.

4.2 Storia e sviluppo

Il modello SWAT è il risultato di molti anni di studi e ricerche condotti dall'ARS che hanno portato alla implementazione di numerosi modelli ed infatti esso stesso ingloba le caratteristiche di modelli precedentemente sviluppati.

In particolare SWAT nasce come un'estensione del modello SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) che comprende, a sua volta, anche moduli dei modelli CREAMS, GREAMS e l'EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams et al., 1984) precedentemente sviluppati.

Lo sviluppo del modello SWRRB comincia con delle modifiche apportate al CREAMS, ovvero:

- il potenziamento finalizzato a consentire calcoli su numerosi sottobacini;
- l'aggiunta del modulo per il calcolo del flusso di ritorno dell'acqua dalla falda;
- l'inserimento del modulo relativo all'immissione di invasi naturali o artificiali nel calcolo del bilancio idrologico e all'analisi degli effetti della presenza di questi ultimi sulle portate di deflusso e sulla produzione di sedimenti;
- l'aggiunta di un Weather Generator per la simulazione di dati climatici mancanti di precipitazione, radiazione solare e temperatura, allo scopo di facilitare le simulazioni a lungo termine;
- il miglioramento del metodo per la previsione dei picchi di deflusso;
- l'inserimento di un modulo per la crescita delle colture su base annuale e per l'immissione degli avvicendamenti;
- l'inserimento di una componente per la valutazione degli eventi di piena;
- l'inserimento di componenti per simulare il trasporto dei sedimenti negli invasi e nella rete idrografica;
- l'inserimento del calcolo delle perdite per trasmissione.

In seguito anche l'SWRRB è stato modificato nei seguenti punti:

- inserimento della componente relativa ai pesticidi del GLEAMS;
- utilizzo del metodo del SCS (Soil Conservation Service) per stimare i picchi di deflusso;
- sviluppo di nuove equazioni per la stima della produzione dei sedimenti.

Queste modifiche resero possibile l'uso del modello SWRRB come software gestionale ma per studi di bacini di piccole dimensioni.

Su bacini di grosse dimensioni, invece, il modello aveva degli importanti limiti che riguardavano la suddivisione in sottobacini e la gestione degli output: la suddivisione permessa era limitata a dieci sottobacini e le portate e il carico di sedimenti erano valutati solo alla sezione di chiusura del bacino.

Per superare queste limitazioni fu sviluppato un modello chiamato ROTO (Routing Outputs To Outlet) (Arnold et al., 1995), che utilizzava come input gli output del modello SWRRB. Il modello ROTO superava la limitazione dei sottobacini dell'SWRRB eseguendo più elaborazioni successive con un approccio basato sul trasporto del deflusso.

Nonostante questo metodo di calcolo fosse efficiente, i molteplici file di input e di output dell'SWRRB erano molto ingombranti e richiedevano, pertanto, molta memoria nel calcolatore. Inoltre i due modelli SWRRB e ROTO non erano interconnessi e le diverse elaborazioni dovevano essere fatte separatamente.

Per superare questi inconvenienti si pensò di unire l'SWRRB ed il ROTO in un unico modello, SWAT. Il modello SWAT ha conservato tutte le caratteristiche dell'SWRRB, che lo hanno reso un valido modello di simulazione, in grado di lavorare su aree più estese.

Dalla prima implementazione ad oggi il modello SWAT ha subito molte revisioni e perfezionamenti che lo hanno reso adatto a molti studi a scala di bacino in quanto capace in grado di elaborare molti processi fisici diversi insieme.

Una caratteristica che rende SWAT un modello molto adattabile alle caratteristiche delle diverse aree esaminate è il modo di operare la suddivisione in sottobacini.

Quest'ultima è gestita direttamente dall'utente: in base alle peculiarità fisiche del bacino analizzato è possibile impostare i calcoli su un numero diverso di sottobacini. Un numero alto di sottobacini complica i calcoli allunga i tempi di elaborazione ma è molto utile quando si analizzano bacino molto complessi e frammentati e viceversa.

La suddivisione del bacino in più sottobacini consente all'utente di riferirsi con precisione ad un'area specifica. Le informazioni di input per ciascun sottobacino sono raggruppate nelle seguenti categorie:

- clima;
- copertura del suolo, tipo di suolo, e pratica gestionale che sono uniti ed indicati in SWAT attraverso l'identificazione di una HRU (Hydrologic Response Units) ovvero una unità di risposta idrologica. Ogni HRU comprende una porzione di territorio omogenea per le suddette caratteristiche;
- laghi;
- falde;
- rete idrografica principale e secondaria.

4.3 Il bilancio idrologico

Il ciclo idrologico consiste nella circolazione dell'acqua all'interno dell'idrosfera terrestre, includendo i cambiamenti di stato fisico dell'acqua tra la fase liquida, solida e gassosa e si riferisce ai continui scambi di massa idrica tra l'atmosfera, la terra, le acque superficiali, le acque sotterranee e gli organismi (fig. 6).

Oltre all'accumulo in varie zone (come gli oceani che sono le più grandi zone di accumulo idrico), i molteplici cicli che compie l'acqua terrestre includono i seguenti processi fisici: evaporazione, condensazione, precipitazione, infiltrazione, scorrimento e flusso sotterraneo.

Le molecole d'acqua si muovono in continuazione tra differenti compartimenti, o riserve, dell'idrosfera terrestre mediante processi fisici. L'acqua evapora dagli oceani, forma le nuvole dalle quali l'acqua torna alla terra però prima di raggiungere gli oceani l'acqua può evaporare, condensare, precipitare e scorrere molte volte.

L'evaporazione è il trasferimento dell'acqua da corpi idrici superficiali nell'atmosfera. Questo trasferimento implica un passaggio di stato dalla fase liquida alla fase vapore. Nell'evaporazione viene inclusa anche la traspirazione delle piante; in tal modo ci si riferisce a questo trasferimento come evapotraspirazione. Il 99% dell'acqua atmosferica proviene dall'evaporazione, mentre il rimanente 1% dalla traspirazione.

La precipitazione è costituita da vapore acqueo che si è prima condensato sotto forma di nuvole (cambio dalla fase gassosa alla fase liquida o solida) e che cade sulla superficie terrestre. Questo avviene soprattutto sotto forma di pioggia, ma anche di neve, grandine o nebbia.

L'intercettazione è la precipitazione intrappolata dalla vegetazione che non cade direttamente al suolo.

L'infiltrazione è la transizione dall'acqua dalla superficie alle acque sotterranee. L'aliquota di infiltrazione dipende dalla permeabilità del suolo o della roccia e da altri fattori. Le acque sotterranee tendono a muoversi molto lentamente, così

l'acqua può ritornare alla superficie dopo l'accumulo in un acquifero in un lasso di tempo che può arrivare al migliaio di anni in alcuni casi. L'acqua ritorna alla superficie ad altezza inferiore a quella del punto di infiltrazione, sotto l'azione della forza di gravità e delle pressioni da essa indotta.

Lo scorrimento include tutti i modi in cui l'acqua superficiale si muove in pendenza verso il mare. L'acqua che scorre nei torrenti e nei fiumi può stazionare nei laghi per un certo tempo. Non tutta l'acqua ritorna al mare per scorrimento; gran parte evapora prima di raggiungere il mare o un acquifero.

Il flusso sotterraneo include il movimento dell'acqua all'interno della terra sia nelle zone insature che negli acquiferi. Dopo l'infiltrazione l'acqua superficiale può ritornare alla superficie o scaricarsi in mare.



Figura 6: Rappresentazione schematica del ciclo idrologico realizzata dall'USGS (United States Geological Survey).

L'equazione del bilancio idrologico simulato da SWAT è finalizzata alla stima del contenuto idrico nel suolo ed è la seguente:

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

i cui termini sono:

- SW_t = contenuto finale di acqua nel suolo (mm);
- SW_o = contenuto iniziale di acqua nel suolo al giorno t (mm);
- T = Tempo (giorni);
- R_{day} = ammontare della precipitazione nel giorno i-esimo (mm);
- Q_{surf} = ammontare del deflusso superficiale nel giorno i-esimo (mm);
- E_a = ammontare dell'evapotraspirazione nel giorno i-esimo (mm);
- W_{seep} = ammontare di acqua entrata nella zona vadosa dal profilo del suolo nel giorno i-esimo (mm);
- Q_{gw} = ammontare del flusso di ritorno nel giorno i-esimo (mm).

Il deflusso è valutato separatamente per ogni HRU ed in seguito è valutato per il bacino nel suo insieme e la suddivisione del bacino in un numero congruo di HRU rende il modello capace di riflettere le differenze nell'evapotraspirazione per i diversi tipi di suolo e di uso del suolo.

Le variabili climatiche del bacino richieste dal modello fungono da input, sia per quanto riguarda il quantitativo di acqua nei diversi substrati sia per stimare, attraverso la radiazione solare, il quantitativo di energia disponibile all'attuazione dei processi fisici.

Le variabili climatiche, richieste da SWAT, sono a scala temporale giornaliera e consistono in:

- Precipitazioni giornaliere. La distribuzione delle precipitazioni è simulata nel modello in maniera molto accurata in termini sia spaziali sia temporali. Questa può essere ricavata da un database di input creato dall'utente oppure può essere generata da un apposito modello generatore di dati climatici di input che si basa su valori medi derivati da lunghe serie storiche. E' possibile sia generare dati climatici per l'intero periodo di simulazione che solo necessari a riempire le eventuali lacune presenti nelle serie storiche a disposizione dell'utente;
- Temperature massime e minime. La temperatura influenza un notevole numero di processi fisici, chimici e biologici. La produzione delle piante è fortemente dipendente dalla temperatura così come lo sono i processi di mineralizzazione e di decomposizione della sostanza organica. Nel modello, i dati giornalieri di temperatura possono essere inseriti in un apposito database dall'utente, oppure possono essere generati da un modello come per i dati di precipitazione. La temperatura del suolo e quella dell'acqua sono derivate dalla temperatura dell'aria;
- Radiazione solare. Anche questi dati possono essere inseriti in appositi database tramite file di input, oppure fatti generare dal modello;
- Velocità del vento. I dati giornalieri della velocità del vento sono richiesti dal modello per stimare l'evapotraspirazione potenziale e la traspirazione della copertura vegetale secondo il metodo di Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989). Il modello assume che i dati della velocità del vento siano riferiti ad una stazione di misura posta ad un'altezza da terra di 1,7 metri ed anche in questo caso è in grado di generare i dati completamente o in parte con il modello di simulazione di dati climatici;
- Umidità relativa. I dati dell'umidità relativa sono richiesti da SWAT per stimare l'evapotraspirazione potenziale con i metodi di Penman-Monteith o di Priestley-Taylor (1972).

4.4 Il processo simulativo

Il processo di calcolo di SWAT è distinto in due fasi: nella prima sono simulati tutti i fenomeni che danno luogo al trasporto idrico dalla superficie compresa nell'area del bacino alla rete di drenaggio (LAND PHASE), nella seconda sono sviluppati i processi di trasporto all'interno della rete di drenaggio e le connesse trasformazioni chimiche (ROUTING PHASE).

Di seguito vengono brevemente descritti i principali processi simulati dal modello.

INTERCEZIONE DELLA VEGETAZIONE

L'intercezione è il fenomeno che si verifica quando in seguito ad un evento meteorico, parte della precipitazione è trattenuta dalle piante presenti sulla superficie interessata. Questo produce un doppio effetto: la perdita di un'aliquota di precipitazione al suolo e la diminuzione del potere erosivo della precipitazione stessa. I fenomeni descritti sono strettamente collegati dalla densità della copertura fogliare e alla morfologia delle specie vegetali presenti sul territorio.

Il fenomeno dell'intercezione della copertura vegetale (*canopy storage*) può avere significativi riscontri nel calcolo dell'infiltrazione, del deflusso superficiale e dell'evapotraspirazione.

Nel calcolo del deflusso superficiale con il metodo del Curve Number (descritto in seguito) l'intercezione fogliare viene considerata come sottrazione iniziale e vi sono inclusi anche l'immagazzinamento superficiale e l'infiltrazione prima del deflusso. L'intercezione è stimata, come valore di default, pari al 20% del valore del parametro di ritenuta per un dato giorno.

SWAT permette agli utenti di inserire la quantità massima di acqua che può essere intercettata dalla copertura vegetale, variandola giorno per giorno in funzione dell'indice di area fogliare. Questa è calcolata con la seguente espressione:

$$\mathbf{can}_{\text{day}} = \frac{\mathbf{can}_{\text{mx}} \cdot \mathbf{LAI}}{\mathbf{LAI}_{\text{mx}}}$$

dove:

- **can_{day}** = quantità massima di acqua che può essere intercettata dalla copertura fogliare in un dato giorno (mm);
- **can_{mx}** = ammontare massimo di acqua che può essere trattenuta dalla copertura fogliare quando al massimo del suo sviluppo (mm);
- **LAI** = indice di area fogliare per un dato giorno;
- **LAI_{mx}** = indice massimo di area fogliare per specie di pianta.

REDISTRIBUZIONE

La redistribuzione è il fenomeno per il quale si crea un continuo movimento dell'acqua (derivante da precipitazione o da irrigazione) nel suolo. Questo fenomeno si verifica quando esistono diverse quantità d'acqua lungo il profilo del suolo e termina non appena il contenuto d'acqua si uniforma nei diversi strati.

SWAT calcola la componente di redistribuzione usando il metodo del ciclo di immagazzinamento in ogni strato di suolo della zona radicale per calcolare il flusso dell'acqua contenuta. Il fenomeno citato è strettamente correlato alla temperatura del suolo; se, infatti, la temperatura di un particolare strato del suolo è uguale o inferiore a 0°C la redistribuzione non è consentita in questo determinato strato.

Si ha flusso discendente (percolazione) quando la capacità di campo dello strato di suolo è elevata e lo strato sottostante non è saturo.

EVAPOTRASPIRAZIONE

L'evapotraspirazione è un processo attraverso il quale l'acqua passa dalla fase liquida alla fase gassosa, ad opera della radiazione solare e dell'aumento della temperatura terrestre, diventando vapore acqueo e passando all'atmosfera.

L'evapotraspirazione include diversi fenomeni come l'evaporazione da fiumi e laghi, da suolo nudo, da superficie vegetale (traspirazione), superfici ghiacciate o innevate (sublimazione). L'evapotraspirazione è, in particolare, funzione della temperatura, al crescere della quale cresce, almeno fino a quando la temperatura non sia tanto alta da causare la morte della vegetazione. Inoltre aumenta all'aumentare della disponibilità d'acqua, ma non indefinitamente. Il modello SWAT valuta separatamente l'evaporazione dei suoli e la traspirazione della vegetazione. L'evaporazione potenziale dal suolo è stimata come una funzione dell'evapotraspirazione potenziale e dell'indice di area fogliare (rapporto tra l'area fogliare e la superficie dell'HRU). L'evaporazione reale dal suolo è stimata attraverso funzioni esponenziali della profondità del suolo e del contenuto d'acqua. La traspirazione è simulata come una funzione lineare dell'evapotraspirazione potenziale e dell'indice di area fogliare.

Il valore limite, dato dall'altezza d'acqua effettivamente evaporata quando la quantità d'acqua disponibile è almeno uguale a quella che può essere trasformata in vapore dal complesso dei fattori atmosferici e dalla vegetazione, prende il nome di evapotraspirazione potenziale. L'evapotraspirazione potenziale (ET_p) è un concetto introdotto da Thornthwaite (1948) come parte di uno schema di classificazione climatica. Egli definisce la ET_p come il tasso al quale l'evapotraspirazione può verificarsi da una grande area uniformemente coperta da vegetazione in fase di crescita che ha accesso ad una quantità illimitata di acqua presente nel suolo e che non è esposta agli effetti dell'advezione e delle escursioni termiche. Poiché il tasso di evapotraspirazione è fortemente influenzato dalle caratteristiche della vegetazione, Penman (1956) ridefinì la ET_p come "l'ammontare di acqua traspirata da un prato che ricopre completamente il terreno, di altezza uniforme e sempre saturo d'acqua".

Numerosi metodi sono stati sviluppati per stimare la ETp, tre di questi sono incorporati in SWAT e sono: il metodo di Penman-Monteith il metodo di Priestley-Taylor e il metodo di Hargreaves (1985). Il modello SWAT è anche in grado di leggere i valori giornalieri dell'ETp, calcolati all'esterno del modello. I tre metodi presenti in SWAT differiscono per la quantità di dati di input richiesti.

Il metodo di Penman-Monteith richiede come dati di input la radiazione solare, la temperatura dell'aria, l'umidità relativa e la velocità del vento.

Il metodo di Priestley-Taylor richiede la radiazione solare, la temperatura dell'aria e l'umidità relativa. Il metodo di Hargreaves richiede soltanto la temperatura dell'aria. Una volta che l'evapotraspirazione potenziale è stata determinata si deve calcolare l'evapotraspirazione reale. SWAT considera, in una prima fase, l'evaporazione della pioggia intercettata dalla copertura vegetale, ed in seguito calcola l'ammontare massimo della traspirazione e della sublimazione dal suolo.

DEFLUSSO LATERALE

E' il contributo al deflusso in alveo che si origina al di sotto dello strato più superficiale ma al di sopra della zona satura d'acqua. Il suo contributo è significativo nelle aree con suoli caratterizzati da una elevata conducibilità idraulica negli strati superficiali, e da strati impermeabili o semipermeabili a piccole profondità. Tale sistema consente al deflusso di percolare verticalmente fino a che non incontra lo strato impermeabile, qui l'acqua ristagna formando una zona satura di acqua, che diventa la fonte per il deflusso laterale.

Per prevedere il flusso laterale, in ogni strato di suolo, SWAT si serve di un modello cinematico, i cui parametri variano in funzione della conducibilità idraulica, della pendenza e del contenuto di acqua nel suolo.

DEFLUSSO SUPERFICIALE

Il deflusso superficiale è il deflusso che si verifica su una superficie di scorrimento dovuto alla forza di gravità. Utilizzando dati di pioggia giornaliera o sub-giornaliera SWAT è in grado di simulare i volumi del deflusso superficiale ed i valori di picco per ciascuna HRU.

SWAT utilizza due metodi per valutare il deflusso superficiale: la procedura del Curve Number dell'SCS (Soil Conservation Service, 1972) e il metodo dell'infiltrazione di Green & Ampt (1911).

L'equazione del deflusso utilizzata dall'SCS è un modello empirico diventato di uso comune nel 1950. Questo modello è il risultato di più di venti anni di studio sulle relazioni che intercorrono tra precipitazioni e deflusso su piccoli bacini situati negli Stati Uniti o in territori limitrofi.

Il modello è stato sviluppato per fornire una base consistente per stimare la quantità di deflusso relativa a diversi usi del suolo e a diversi tipi di suolo (Rallison e Miller, 1981).

L'equazione dell'SCS Curve Number (SCS, 1972) è la seguente:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)}$$

dove:

- Q_{surf} = ammontare del deflusso o eccesso di pioggia (mm)
- R_{day} = altezza di pioggia giornaliera (mm)
- I_a = sottrazione iniziale che include: immagazzinamento superficiale, intercezione, e infiltrazione prima del deflusso (mm)
- S = parametro di ritenzione.

Il parametro di ritenzione (S) varia per il tipo di suolo, l'uso del suolo, le pratiche gestionali, la pendenza e il contenuto d'acqua nel suolo.

Il parametro S può essere rappresentato dalla seguente equazione:

$$S = 25,4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

dove:

CN = curve number giornaliero.

La sottrazione iniziale (I_a) è comunemente approssimata come $0,2 S$.

Si verifica il deflusso soltanto quando R_{day} è maggiore di I_a .

L'SCS curve number è una funzione che mette in relazione la permeabilità del suolo, l'uso del suolo e le precedenti condizioni di umidità del suolo.

Una soluzione grafica dell'equazione sopra descritta, per diversi valori del Curve Number, è rappresentata dalla figura 7.

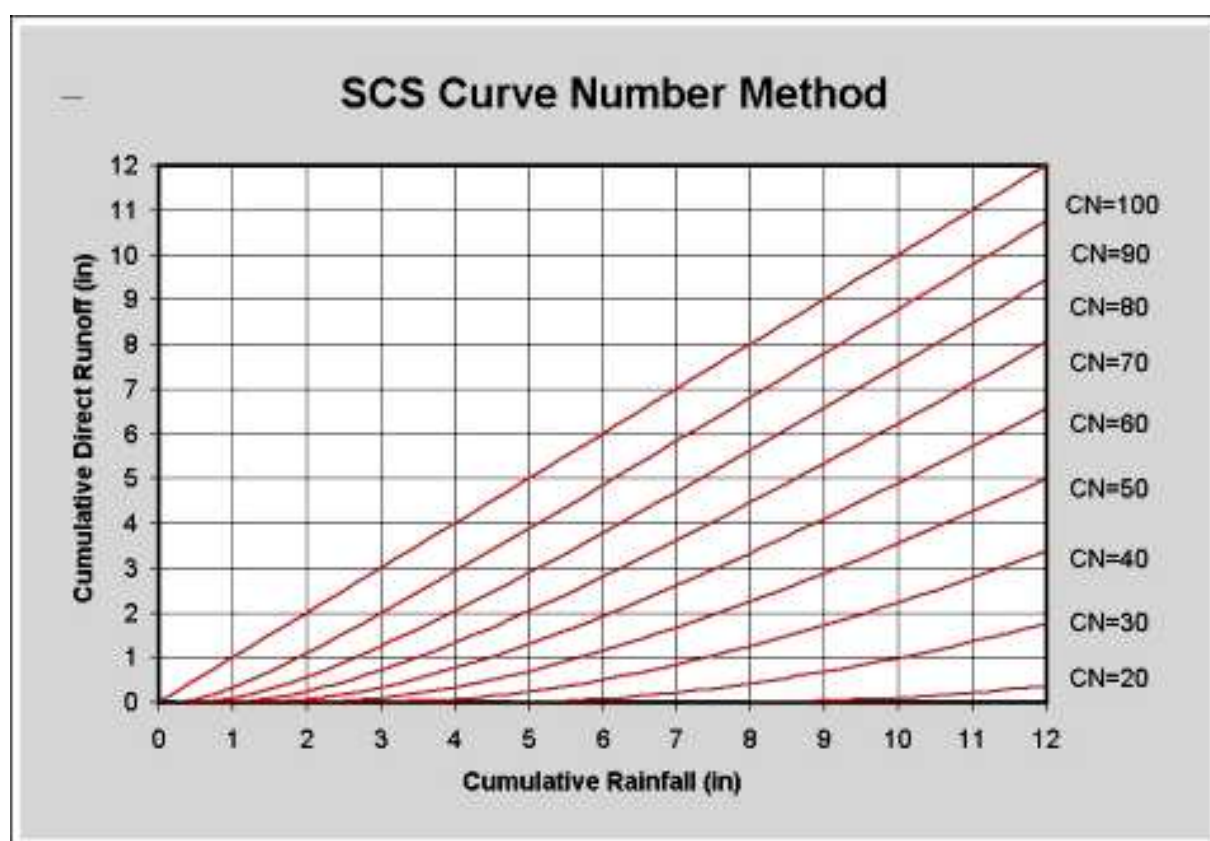


Figura 7: Relazione tra il deflusso superficiale e le precipitazioni nel metodo dell'SCS Curve Number.

Il Natural Resource Conservation Service (NRCS) classifica i suoli in quattro gruppi idrologici, sulla base delle caratteristiche di infiltrazione. Il Soil Survey Staff (1996) definisce il gruppo idrologico come un insieme di suoli che hanno deflussi potenziali molto simili tra loro, in presenza delle stesse condizioni di precipitazioni e di copertura del suolo.

Un determinato suolo può essere pertanto rappresentato con uno dei quattro gruppi di seguito descritti:

Gruppo A, (basso deflusso potenziale). I suoli che appartengono a questo gruppo hanno un elevato tasso di infiltrazione anche quando sono completamente saturi. Sono costituiti principalmente da sabbia e ghiaia. In essi vi è una elevata velocità di trasmissione dell'acqua.

Gruppo B, in questo gruppo vanno inseriti i suoli che hanno un moderato tasso di infiltrazione quando sono completamente saturi. La loro velocità di trasmissione dell'acqua è pertanto moderata.

Gruppo C, i suoli di questo gruppo sono caratterizzati da un lento tasso di infiltrazione quando sono completamente saturi. In essi è presente, in genere, o uno strato che impedisce il movimento dell'acqua verso il basso, o sono caratterizzati da una tessitura moderatamente fine. Hanno una bassa velocità di trasmissione dell'acqua.

Gruppo D, (elevato deflusso potenziale). I suoli di questo gruppo hanno una velocità di infiltrazione molto bassa quando sono completamente saturi. Sono principalmente suoli argillosi, con un elevato rigonfiamento potenziale, suoli che sono permanentemente bagnati e delimitati da uno strato quasi impermeabile. La velocità di trasmissione dell'acqua è per essi molto lenta.

I valori medi dei Curve Number, calcolati dall'SCS per i principali usi del suolo e per i diversi gruppi idrologici, sono schematizzati nella tabella 13.

Tabella 13: Valori medi del Curve Number per le principali categorie di uso del suolo stimati dall' SCS.

Land Use Description on Input Screen	Description and Curve Numbers from TR-55					
	Cover Description		Curve Number for Hydrologic Soil Group			
	Cover Type and Hydrologic Condition	% Impervious Areas	A	B	C	D
Agricultural	Row Crops - Straight Rows + Crop Residue Cover- Good Condition ⁽¹⁾		64	75	82	85
Commercial	Urban Districts: Commercial and Business	85	89	92	94	95
Forest	Woods ⁽²⁾ - Good Condition		30	55	70	77
Grass/Pasture	Pasture, Grassland, or Range ⁽³⁾ - Good Condition		39	61	74	80
High Density Residential	Residential districts by average lot size: 1/8 acre or less	65	77	85	90	92
Industrial	Urban district: Industrial	72	81	88	91	93
Low Density Residential	Residential districts by average lot size: 1/2 acre lot	25	54	70	80	85
Open Spaces	Open Space (lawns, parks, golf courses, cemeteries, etc.) ⁽⁴⁾ Fair Condition (grass cover		49	69	79	84

	50% to 70%)					
Parking and Paved Spaces	Impervious areas: Paved parking lots, roofs, driveways, etc. (excluding right-of-way)	100	98	98	98	98
Residential 1/8 acre	Residential districts by average lot size: 1/8 acre or less	65	77	85	90	92
Residential 1/4 acre	Residential districts by average lot size: 1/4 acre	38	61	75	83	87
Residential 1/3 acre	Residential districts by average lot size: 1/3 acre	30	57	72	81	86
Residential 1/2 acre	Residential districts by average lot size: 1/2 acre	25	54	70	80	85
Residential 1 acre	Residential districts by average lot size: 1 acre	20	51	68	79	84
Residential 2 acres	Residential districts by average lot size: 2 acre	12	46	65	77	82
Water/ Wetlands		0	0	0	0	0

L'equazione di Green & Ampt è stata sviluppata per predire l'infiltrazione assumendo un eccesso d'acqua in superficie in ogni istante di tempo (Green ed Ampt, 1911). L'equazione considera il profilo di suolo omogeneo e la condizione d'umidità antecedente uniformemente distribuita nel profilo. Quando l'acqua inizia ad infiltrarsi, il modello assume che il suolo al di sopra del fronte umido sia completamente saturo e che ci sia una netta variazione del contenuto d'umidità lungo il fronte.

Mein and Larson (1973) hanno sviluppato una metodologia per determinare il tempo di imbibizione durante l'infiltrazione usando l'equazione di Green & Ampt. Il metodo Green-Ampt Mein-Larson della pioggia in eccesso è stato incorporato in SWAT. Questo metodo richiede, per essere utilizzato, dati di precipitazione sub-giornalieri.

La velocità d'infiltrazione di Green-Ampt Mein-Larson è definita come:

$$f_{\text{inf},t} = k_e \cdot \left(1 + \frac{\Psi_{\text{inf}} \cdot \Delta\theta_v}{F_{\text{inf},t}} \right)$$

Dove:

- f_{inf} = velocità d'infiltrazione al tempo t (mm/h);
- K_e = conducibilità idraulica effettiva (mm/h);
- Ψ_{wf} = potenziale matriciale del fronte umido (mm);
- $\Delta\theta_v$ = variazione del contenuto volumetrico di umidità lungo il fronte umido (mm/mm);
- F_{inf} = infiltrazione cumulata al tempo t (mm).

Quando l'intensità di pioggia é minore della velocità d'infiltrazione, tutta l'acqua caduta si infiltrerà durante l'intervallo di tempo e l'infiltrazione cumulata per quel periodo risulterà essere pari a:

$$F_{\text{inf},t} = F_{\text{inf},t=1} + R_{\Delta t}$$

dove

- $F_{\text{inf},t}$ = infiltrazione cumulata in un dato intervallo di tempo (mm);
- $F_{\text{inf},t-1}$ = infiltrazione cumulate nell'intervallo di tempo precedente (mm);
- $R_{\Delta t}$ = altezza di pioggia caduta nello stesso periodo di tempo (mm);

La conducibilità idraulica effettiva di Green-Ampt, K_e , equivale approssimativamente ad un mezzo della conducibilità idraulica a saturazione del suolo, K_{sat} (Bouwer, 1969). Nearing et al. (1996) hanno sviluppato un'equazione

per calcolare la conducibilità idraulica effettiva in funzione della conducibilità idraulica a saturazione e del curve number. L'equazione è:

$$K_e = \frac{56.82 * K_{sat}^{0.286}}{1 + 0.051 * \exp(0.062 * CN)}$$

dove

- K_e = conducibilità idraulica effettiva (mm/hr);
- K_{sat} = conducibilità idraulica satura (mm/hr);
- CN = curve number.

Il potenziale matriciale del fronte umido, Ψ_{wf} , è calcolato in funzione della porosità, della percentuale di sabbia e della percentuale di argilla (Rawls and Brakensiek, 1985):

$$\Psi_{wf} = 10 - \exp [6.5309 - 7.32561 - \Phi_{soil} + 0.001583 - m_c^2 + 3.809479 \Phi_{soil} + 0.000344 - m_s \cdot m_c - 0.049837 - m_s \Phi_{soil} + 0.001608 - m_s \Phi_{soil} + 0.001602 m_c - \Phi_{soil} - 0.0000136 - m_s m_c - 0.003479 - m_c \Phi_{soil} - 0.000799 m_s - \Phi_{soil}]$$

dove:

- Φ_{soil} = porosità del suolo (mm/mm);
- m_c = contenuto percentuale di argilla;
- m_s = contenuto percentuale di sabbia.

La variazione volumetrica del contenuto di umidità lungo il fronte umido è calcolata all'inizio di ogni giorno come:

$$\Delta\theta = \left(1 - \frac{SW}{FC}\right) * (0.95 * \Phi_{soil})$$

Dove:

- $\Delta\theta_v$ = variazione volumetrica del contenuto di umidità lungo il fronte umido (mm/mm);
- SW = contenuto idrico del suolo nell'intero profilo escludendo quello contenuto al punto di appassimento (mm);
- FC = contenuto idrico alla capacità di campo (mm);
- Φ_{soil} = porosità del suolo (mm/mm).

Se l'evento di pioggia avviene a cavallo della mezzanotte, $\Delta\theta_v$ viene calcolata come:

$$\Delta\theta = 0.001 * (0.95 * \Phi_{soil})$$

Per ogni intervallo di tempo SWAT calcola la quantità di acqua che entra nel suolo. L'acqua che non si infila da luogo a ruscellamento superficiale.

NUTRIENTI

SWAT simula i processi coinvolti nella applicazione e trasmissione dei nutrienti ed in particolare di azoto e fosforo che sono, insieme al potassio gli elementi principali contenuti nei fertilizzanti.

I composti azotati nei suoli e le trasformazioni simulate dal modello sono rappresentate nella figura 8.

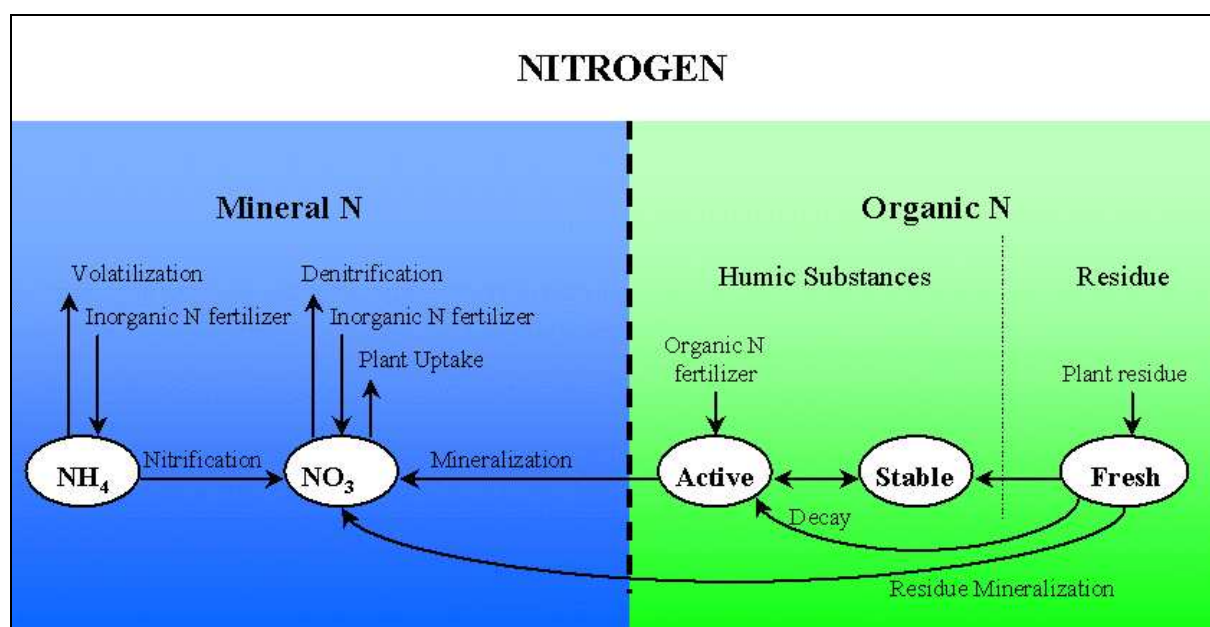


Figura 8: Composti azotati e loro trasformazioni chimiche secondo SWAT

SWAT permette all'utente di definire la quantità di nitrati ed azoto organico contenuta nella sostanza umica per tutti gli strati di suolo all'inizio della simulazione. Se l'utente non specifica la concentrazione iniziale di azoto, SWAT stabilisce il livello di azoto delle diverse forme. Il livello iniziale di azoto nel suolo varia in funzione della profondità con la seguente relazione:

$$NO3_{conc,z} = 7 * \exp\left(-\frac{z}{1000}\right)$$

Dove:

- **NO3_{conc,z}** = concentrazione di azoto nel suolo alla profondità z in [mg/kg oppure ppm];
- **z** = profondità dalla superficie del suolo in [mm].

I livelli di azoto organico sono assegnati assumendo che il rapporto C:N per la sostanza umica sia di 14:1. La concentrazione dell'azoto organico umico in uno strato di suolo è calcolata con:

$$orgN_{hum,ly} = 10^4 * \left(\frac{orgC_{ly}}{14}\right)$$

dove:

- **orgN_{hum,ly}** = concentrazione di azoto organico umico nello strato [mg/kg oppure ppm];
- **orgC_{ly}** = percentuale di carbonio organico nello strato.

L'azoto organico umico è distinto in una parte attiva ed una parte stabile usando le seguenti equazioni:

$$\mathbf{orgN_{act,ly} = orgN_{hum,ly} * fr_{actN}}$$

$$\mathbf{orgN_{sta,ly} = orgN_{hum,ly} * (1 - fr_{actN})}$$

Dove:

- **orgN_{act,ly}** = concentrazione di azoto allo stato organico attivo [mg/kg];
- **orgN_{hum,ly}** = concentrazione di azoto organico umico nello strato , [mg/kg];
- **fractN** = frazione di azoto umico in fase attiva;
- **orgN_{sta,ly}** = concentrazione di azoto organico in fase stabile [mg/kg].

La frazione di azoto umico in fase attiva, **fractN** , viene settata dal modello al valore 0,02.

L'azoto organico fresco viene posto pari a zero in tutti gli strati tranne che nei primi 10 millimetri di suolo dove assume il valore pari al 0,15% dell'ammontare iniziale di residuo presente sulla superficie del suolo, ovvero:

$$\mathbf{orgN_{frsh, surf} = 0.00015 * rsd_{surf}}$$

Dove:

- **orgN_{frsh,surf}** = quantità di azoto organico fresco nei primi 10 mm[kg N/ha];

- rsd_{surf} = materiale residuo presente sulla superficie del suolo [kg/ha].

L'azoto ammoniacale NH_4 , per il suolo è inizializzato a 0 ppm.

I composti del fosforo e le trasformazioni chimiche simulate dal modello sono rappresentate nella figura 9.

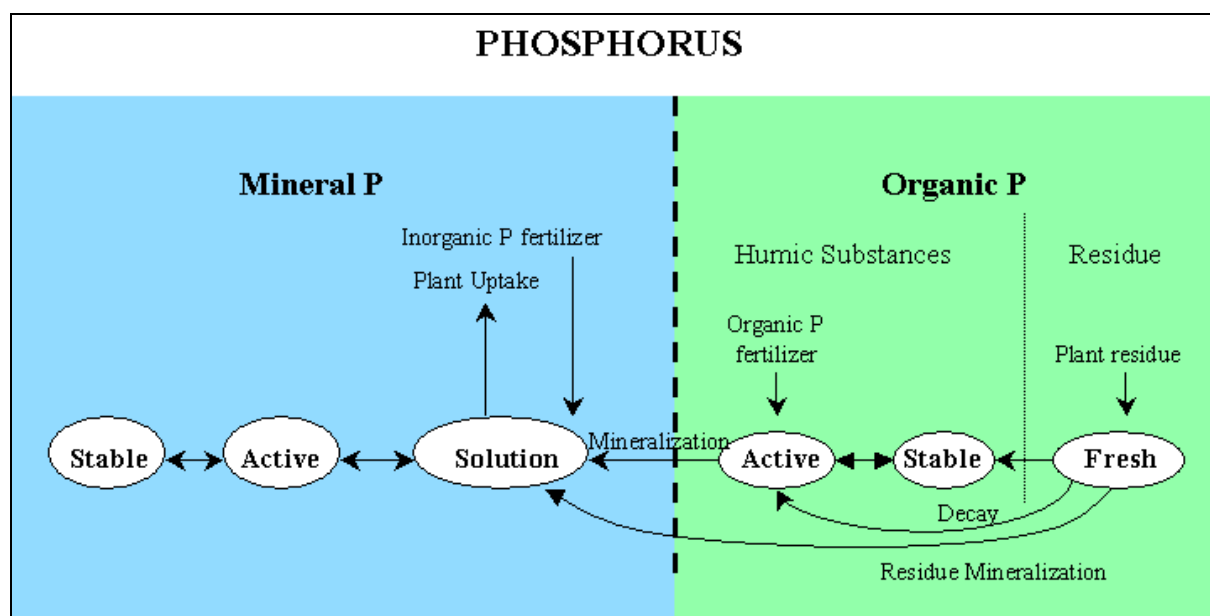


Figura 9: : Composti del fosforo e loro trasformazioni chimiche secondo SWAT.

SWAT permette all'utente di definire anche la quantità di fosforo solubile e organico contenuto nella sostanza umica, per tutti gli strati del suolo dall'inizio della simulazione. Se l'utente non specifica la concentrazione iniziale di fosforo, SWAT stabilisce anche in questo caso i livelli di fosforo nei diversi strati. La concentrazione del fosforo in soluzione in tutti gli strati è inizialmente settata al valore 5 mg/kg di suolo.

PESTICIDI

SWAT simula gli spostamenti ed il trasporto dei pesticidi applicati alle aree agricole (fig. 10).

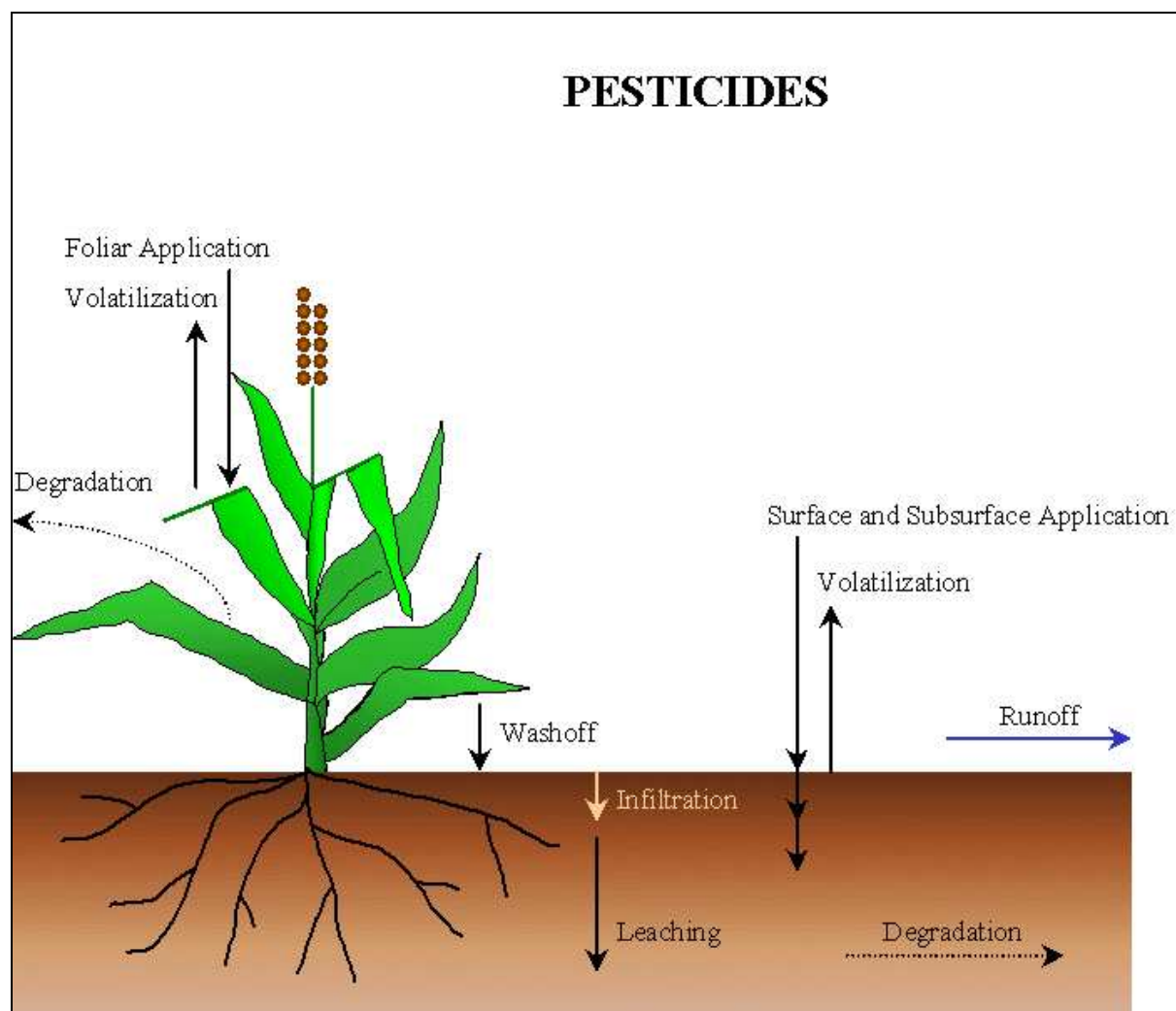


Figura 10: Il destino dei pesticidi nel suolo secondo SWAT.

L'equazione usata dal modello per il movimento dei pesticidi nella fase del ciclo idrologico del suolo è la stessa presente nel modello GLEAMS. I movimenti dei pesticidi sono legati a quelli dell'acqua e i processi implicati nel trasferimento sono l'erosione e la sedimentazione delle particelle di suolo, il ruscellamento superficiale, il deflusso sub-superficiale, l'infiltrazione e la percolazione.

Nel trasferimento di un inquinante al corpo idrico si possono individuare più fasi: la disponibilità della sostanza, l'estrazione, il trasporto e l'impatto sul corpo idrico ricettore. Durante lo svolgimento di queste fasi, gli inquinanti subiscono trasformazioni fisiche, chimiche e biologiche che determinano le modalità di trasferimento.

Per le sostanze che sono fortemente adsorbite sulle particelle di suolo, prevalgono i processi di erosione e sedimentazione, anche se successivamente possono distaccarsi dalla particella e diventare disciolte. Per le sostanze moderatamente e debolmente adsorbite prevalgono i processi di trasporto in soluzione per ruscellamento superficiale o percolazione profonda.

La frazione di pesticida che arriva sulle foglie o al suolo è definita dall'efficienza di applicazione del pesticida, calcolata con:

$$pest' = ap_{ef} \cdot pest$$

Dove:

pest' = effettiva quantità di pesticida applicato [kgpst/ha];

ap_{ef} = efficienza di applicazione;

pest = reale quantità di pesticida applicato [kgpst/ha].

EROSIONE

Il processo erosivo prodotto dalle piogge e dal deflusso viene valutato attraverso la Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) (Williams, 1975). MUSLE è una versione modificata della Universal Soil Loss Equation (USLE), sviluppata da Wischmeier e Smith (1965, 1978).

La USLE considera l'erosione media annuale come una funzione dell'energia della precipitazione. Nella MUSLE, invece, il fattore “energia della precipitazione” viene sostituito con un fattore di deflusso. Questo migliora la previsione della produzione di sedimenti, elimina la necessità di inserire rapporti di distribuzione, e rende possibile l'applicazione a singoli eventi meteorici. La previsione della produzione di sedimenti è migliorata poiché il deflusso è una funzione delle precedenti condizioni di umidità, così come l'energia della precipitazione. Per l'utilizzo della USLE sono richiesti i rapporti di distribuzione (ossia la produzione di sedimenti in una sezione lungo la rete idrografica, rapportata alla fonte di erosione a monte del punto specificato), poiché il fattore di pioggia rappresenta l'energia utilizzata solo nella fase di distacco. I rapporti di distribuzione non sono richiesti per l'uso della MUSLE, dal momento che il fattore di deflusso rappresenta l'energia utilizzata nella fase di distacco e di trasporto del sedimento.

La Modified Universal Soil Loss Equation (Williams, 1975) è la seguente:

$$sed = 118 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{hru})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG$$

dove:

- **sed** = produzione di sedimenti in un dato giorno (ton);
- **Q_{surf}** = volume del deflusso superficiale (mm/ha);
- **q_{peak}** = portata di picco del deflusso (m³/s);
- **area_{hru}** = area dell'HRU (ha);
- **K_{USLE}** = fattore USLE di erodibilità del suolo (0.013 ton m² hr/(m³ ton cm));
- **C_{USLE}** = fattore USLE di copertura e gestione del suolo;
- **P_{USLE}** = fattore USLE di supporto;
- **LS_{USLE}** = fattore topografico USLE;
- **CFRG** = fattore dei frammenti grossolani.

Alcuni suoli vengono erosi più facilmente di altri, anche in presenza di uguali condizioni al contorno. Tale differenza è definita erodibilità del suolo ed è funzione dalle proprietà del suolo stesso. Wischmeier e Smith (1978) hanno definito il fattore di erodibilità del suolo come la velocità di perdita di suolo in presenza di un indice di erosione unitario per uno specifico suolo, su di una superficie unitaria. Wischmeier e Smith (1978) hanno notato che una tipologia di suolo diventa solitamente meno soggetta ad erosione quando si riduce la sua frazione limosa, a prescindere dalle corrispondenti variazioni delle frazioni sabbiosa e argillosa.

Misure dirette del fattore di erodibilità sono molto dispendiose. Wischmeier et al. (1971) hanno sviluppato un'equazione generale per il calcolo del fattore di erodibilità del suolo quando la percentuale della frazione limosa e di quella sabbiosa non superano il 70% della distribuzione dimensionale delle particelle:

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - OM) + 3.25 * (c_{soilstr} - 2) + 2.5 * (c_{perm} - 3)}{100}$$

in cui:

- **K_{USLE}** = fattore di erodibilità del suolo;
- **M** = parametro che tiene conto della grandezza delle particelle;
- **OM** = percentuale di sostanza organica;
- **c_{soilstr}** = codice di struttura del suolo utilizzato nella classificazione del suolo;
- **c_{perm}** = classe di permeabilità del profilo.

Il parametro di grandezza delle particelle viene calcolato con la seguente equazione:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) * (100 - m_c)$$

in cui:

- **msilt** = contenuto percentuale di limo (particelle di diametro compreso tra 0.002 e 0.05 mm),
- **mvfs** = contenuto percentuale di sabbia fine (particelle di diametro compreso tra 0.05 e 0.10 mm);
- **mc** = contenuto percentuale di argilla (particelle di diametro minore di 0.002 mm).

Il contenuto percentuale di sostanza organica, OM, di un layer può essere calcolato con la seguente espressione:

$$OM = 1.72 * orgC$$

Dove:

orgC = contenuto percentuale di carbonio organico del layer.

La struttura del suolo si riferisce all'aggregazione delle particelle elementari di suolo in particelle componenti, che sono separate dagli aggregati attraverso superfici di debolezza. Un aggregato naturale e individuale di suolo viene definito "ped".

La forma e la struttura dei ped vengono definiti come "struttura del suolo"; la grandezza dei ped come classe; e il grado di distinzione come grado. I codici della

struttura del suolo per l'equazione della K-USLE sono definiti dal tipo e dalla classe di struttura del suolo presente nel layer. La permeabilità è definita come la capacità del suolo di trasmettere l'acqua e l'aria attraverso il layer più restrittivo, in condizioni di umidità. Le classi di permeabilità del profilo sono basate sulla conducibilità idraulica più bassa del profilo.

Il fattore USLE di copertura e gestione, C-USLE, è definito come il rapporto tra la perdita di suolo, coltivato in specifiche condizioni, e la corrispondente perdita di suolo dai terreni in cui è stato effettuato il raccolto. La copertura vegetale, poiché intercetta parte della pioggia, riduce l'energia erosiva. Il tasso di riduzione dipende dalla densità della copertura fogliare, e poiché tale densità varia con il ciclo di crescita della pianta, SWAT permette di calcolare giornalmente la CUSLE usando la seguente equazione:

$$C_{USLE} = \exp\{[\ln(0.8) - \ln(C_{USLE,mn})] * \exp(-0.00115 * rds_{surf}) + \ln(C_{USLE,mn})\}$$

dove:

- **CUSLE_{mn}** = valore minimo per il fattore di copertura e gestione per i terreni coltivati;
- **rsdsurf** = ammontare del residuo sulla superficie del suolo [kg/ha].

Il fattore minimo C può essere stimato dalla conoscenza della media annuale del fattore C con la seguente equazione:

$$C_{USLE\ m,n} = 1.463 \cdot \ln(C_{USLEaa}) + 0.1034$$

dove:

- **CUSLE_{aa}** = fattore C medio annuale per la copertura del suolo.

I PROCESSI IN ATTO NELLA RETE IDROGRAFICA (ROUTING PHASE)

DEFLUSSO

Nella rete di drenaggio il quantitativo d'acqua varia costantemente ad opera di diversi fenomeni che ne causano la diminuzione o l'aumento e che sono simulati dal modello SWAT.

L'acqua che scorre all'interno del fiume, infatti, viene persa in parte per evaporazione e trasmissione attraverso il fondo dell'alveo, in parte a causa del prelievo di acqua ad uso civile. In altri casi può verificarsi un incremento del volume d'acqua dovuto alla pioggia caduta direttamente sul fiume o a immissione di scarichi puntuali (scarichi fognari, industriali ecc.).

Il movimento del flusso attraverso i canali è simulato nel modello con una doppia metodologia: attraverso un coefficiente di accumulo variabile (*Variable Storage*) (Williams, 1969), oppure utilizzando il metodo di Muskingum (Napiorkowski, 1981).

TRASPORTO DEI SEDIMENTI

Il trasporto dei sedimenti nel fiume è controllato dall'azione simultanea di due processi, deposizione e degradazione. Nel modello SWAT si considera che il carico massimo di sedimenti che può essere trasportato da una parte del fiume è funzione della velocità di picco nel fiume stesso. L'energia del canale disponibile è utilizzata per ristabilire i materiali persi e depositati fino a quando tutto il materiale viene rimosso. L'energia in eccesso provoca la degradazione del greto fluviale. Tale degradazione viene modificata in base alla copertura e all'erodibilità del fondo dell'alveo.

TRASPORTO DEI NUTRIENTI

Il trasporto e la trasformazione dei nutrienti nel corso d'acqua sono controllati dalle componenti del modello relative alla qualità dell'acqua. Il modello distingue tra i nutrienti disciolti e quelli adsorbiti dai sedimenti. Quelli disciolti vengono

trasportati dall'acqua, mentre quelli adsorbiti si depositano con i sedimenti sul letto del fiume.

TRASPORTO DEI PESTICIDI

SWAT simula il movimento dei pesticidi nella rete idrografica (in soluzione e adsorbiti dai sedimenti trasportati dal deflusso), nel profilo del suolo e negli acquiferi attraverso la percolazione (in soluzione).

Nella figura 11 sono schematizzati i processi “in stream” simulati da SWAT.

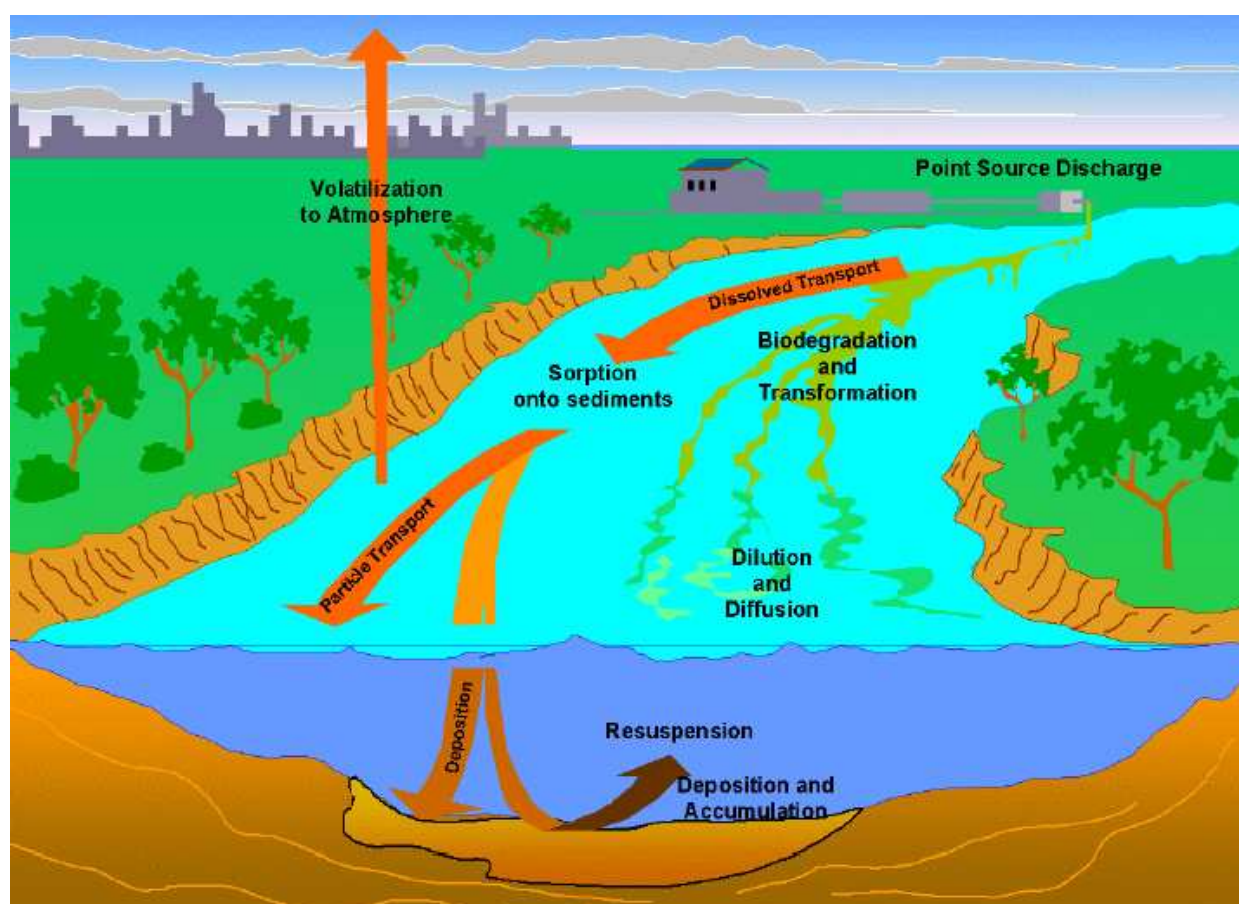


Figura 11: Schematizzazione dei processi in atto nella rete di drenaggio simulati da SWAT.

CRESCITA DELLE COLTURE

Il modello SWAT per simulare la crescita delle colture distingue tra piante annuali e piante perenni: le piante annuali crescono dalla data della piantagione fino a quella del raccolto (o fino a che la pianta ha accumulato la sua unità di calore potenziale), le piante perenni sono in crescita nei mesi primaverili-estivi diventando inattive nei mesi invernali (o ricominciano a crescere quando la media giornaliera della temperatura dell'aria è uguale o supera quella minima richiesta).

La simulazione per la crescita delle piante usata da SWAT è una versione semplificata di quella adottata dal modello EPIC. Nel modello EPIC così come in SWAt il processo di sviluppo delle piante è basato sull'accumulo giornaliero di unità di calore, il calcolo della biomassa potenziale è basato su un metodo sviluppato da Monteith (), il calcolo della produzione si basa su un indice di raccolta, e la crescita delle piante è considerata funzione della temperatura, della quantità d'acqua, della quantità di nitrati e di fosfati.

Per ogni coltura sono necessari una serie di parametri che sono raggruppati in un apposito database di SWAT nel quale sono già presenti le colture più comuni e le altre possono essere introdotte così come possono essere manipolati dall'utente i dati presenti di default.

La temperatura è uno dei fattori più importanti che governano la crescita delle piante. Ogni pianta ha il suo range di temperatura minima ottimale e massima. Per alcune piante la temperatura minima o di base, deve essere raggiunta prima della crescita. Una volta che si è raggiunta la temperatura di base, le temperature più alte permettono un tasso di crescita più rapido alla pianta. Raggiunta la temperatura ottimale la crescita della pianta rallenta e alla temperatura massima si ferma completamente. La teoria dell'unità di calore afferma che le piante necessitano di una quantità di calore che può essere valutata insieme al tempo di maturazione. Una pianta non può crescere quando la temperatura media è minore della sua temperatura base, pertanto gli unici valori della temperatura del giorno che contribuiscono allo sviluppo della pianta sono quelli che superano il valore della sua temperatura di base. Per misurare la quantità di calore totale richiesta dalla pianta, viene registrata, durante il periodo di crescita della pianta ed espressa in

termini di unità di calore, la somma dei valori medi giornalieri di temperatura dell'aria che superano il valore della temperatura di base della pianta. Per esempio, assumendo che i piselli crescano ad una temperatura base di 5°C, si ha che, se la temperatura media su un dato giorno è di 20°C, le unità di calore accumulate su quel giorno sono 15 ovvero 20-5. Conoscendo la data di piantagione di una determinata coltura, la data di maturazione, la temperatura di base e le temperature medie giornaliere, si può calcolare il numero totale di unità di calore richieste per portare la coltura alla maturazione. L'indice di calore usato da SWAT è un indice di sommatoria diretta. Ogni grado della temperatura media giornaliera al di sopra della temperatura di base è un'unità di calore. Questo metodo assume che il tasso di crescita è direttamente proporzionale all'incremento di temperatura. E' importante tenere in conto che la teoria delle unità di calore non considera l'impatto dannoso che le alte temperatura potrebbero avere sulle colture. Il numero totale di unità di calore potenziali richieste da una pianta per raggiungere la maturazione è calcolato con la seguente espressione:

$$PHU = \sum_{d=1}^m HU$$

Dove:

- **HU** = numero di unità di calore accumulate nel giorno d.

indicando con $d = 1$ il giorno della piantagione e con $d = m$ il numero di giorni richiesti dalla pianta per la maturazione.

Per calcolare dunque le unità di calore potenziali per una pianta, è necessario conoscere il numero di giorni in cui raggiunge la maturazione.

Pertanto, si può considerare come data di piantagione l'inizio della stagione di crescita e come data di maturazione la fine della stagione di crescita. SWAT

permette di settare le operazioni di gestione per giorni o per frazione di unità di calore potenziale. Per ogni operazione il modello consente di specificare il mese e il giorno. Se questi non vengono specificati, il modello richiede di specificare la frazione dell'unità di calore potenziale.

Questo metodo di calcolo è usato soprattutto quando si ha a che fare con dei bacini molto estesi, dove il clima varia molto da una parte all'altra. Tale metodo è anche valido da usare quando gli anni della simulazione presentano notevoli differenze climatiche. Usando le unità di calore è necessario un solo file con le pratiche gestionali che può essere applicato a tutto il bacino.

Per ogni giorno della simulazione, viene calcolata la crescita potenziale della pianta, cioè la crescita in condizioni ottimali. Le condizioni ottimali riguardano un'adeguata disponibilità di acqua e di nutrienti e condizioni climatiche favorevoli. La crescita delle piante è trattata dal modello con la simulazione dello sviluppo dell'area fogliare e dell'assorbimento di luce e con la conversione di quest'ultima in biomassa. L'ammontare della radiazione solare intercettata dall'area fogliare della pianta è calcolata usando la legge di Beer (Monsi e Saeki, 1953):

$$H_{\text{phosyn}} = 0.5 * H_{\text{day}} (1 - \exp(k_l * LAI))$$

- **H_{phosyn}** = quantità di radiazione fotosinteticamente attiva intercettata in un dato giorno (MJ m⁻²);
- **H_{day}** = incidenza solare totale (MJ m⁻²);
- **K_l** = coefficiente di estinzione della luce che pari a -0,65 per tutte le piante;
- **LAI** = indice di area fogliare.

La radiazione fotosinteticamente attiva è quella radiazione con una lunghezza d'onda compresa tra 400 e 700 nm (McCree, 1972). La radiazione diretta dei raggi solari contiene circe il 45% della radiazione fotosinteticamente attiva, mentre la

radiazione diffusa ne contiene all'incirca il 60% (Monteith, 1972; Szeicz, 1974; Stanhill e Fuchs, 1977).

L'efficienza della radiazione utilizzata è pari all'ammontare di biomassa prodotta per unità di radiazione solare intercettata. SWAT definisce tale efficienza nel database della crescita delle colture e la considera indipendente dalla loro crescita.

PRATICHE COLTURALI

SWAT include nella simulazione informazioni molto dettagliate sulle pratiche colturali il che lo rende un ottimo modello gestionale.

Le pratiche gestionali devono essere definite per ogni HRU e influenzano in maniera evidente tutti i processi fisici analizzati dal modello.

SWAT permette la definizione di rotazioni colturali anche per lunghi periodi di tempo, tutti i dati di input per la definizione di queste ultime devono essere inseriti su base annuale.

Le operazioni colturali in SWAT possono essere settate dall'utente sulla base delle caratteristiche dell'area agricola analizzata. Ogni operazione può essere innescata nel processo simulativo su base temporale (indicando le date di inizio e fine) o su una soglia di unità di calore accumulate. Inoltre, per ognuna di queste operazioni, sono necessari una serie di dati input.

Di seguito sono elencate le operazioni di management gestite dal modello:

- Piantagione o inizio della stagione attiva (*Planting/beginning of the growing season*)
- Applicazione di fertilizzanti (*Fertilizer application*)
- Applicazione di pesticidi (*Pesticide application*)
- Irrigazione (*Irrigation*)
- Lavorazione del suolo (*Tillage*)

- Raccolto (*Harvest operation*)
- Pascolamento (*Grazing operation*)
- Raccolto ed espianto (*Harvest and kill operation*)
- Fine del ciclo colturale o delle stagione attiva (*Kill/end of growing season*)

CAPITOLO 5: MATERIALI E METODI

5.1 Raccolta ed imputazione dei dati

La principale difficoltà che si riscontra lavorando con modelli matematici complessi ed a grande scala consiste, in tutta evidenza, nella disponibilità e nella fruibilità dei dati di input. Difatti, per poter concretizzare le elaborazioni, sono essenziali grossi volumi di dati sia in termini qualitativi (diversità di tipologia) che quantitativi: sono necessarie, infatti, lunghe serie storiche di dati a breve risoluzione temporale come, ad esempio serie storiche di dati giornalieri.

La realtà con la quale ci si riscontra è, nella gran parte dei casi problematica: in alcuni casi i dati non esistono, in altri non sono pubblici, oppure può accadere che siano caratterizzati da lacune spaziali o temporali di dimensioni variabili, anche importanti, che ne rendano impossibile l'utilizzo in uno studio scientifico. I dati, inoltre vanno adattati al modello cioè vanno imputati in un determinato formato e, spesso, anche questa operazione non è banale o priva di difficoltà.

In Italia, in particolar modo, questo è senza dubbio un problema sentito e comune negli studi di modellistica.

A disposizione degli utenti, perlopiù, non esistono enti centralizzati e correttamente funzionanti impegnati nella raccolta e diffusione pubblica di dati scientifici, oppure, gli enti esistenti non lo sono da un tempo sufficiente alla creazione di grosse banche dati. Ben diversa è la situazione di altri paesi tra i quali, primi fra tutti, gli Stati Uniti d'America dove, non a caso, si sviluppano i principali studi in ambito modellistico.

Il presente lavoro è stato possibile grazie all'utilizzazione di banche dati europee e mondiali realizzate in diversi progetti di ricerca internazionali. I dati utilizzati sono stati ricavati su grande scala ed alcuni con tecniche di interpolazione ma si adattano bene ad uno studio a scala nazionale.

A grandi linee, i dati necessari al modello SWAT sono:

- modello digitale del terreno (DEM)

- dati climatici giornalieri di precipitazione, velocità del vento, temperatura, radiazione solare e umidità relativa
- carta di uso del suolo
- carta dei suoli
- posizione e tipologia di depuratori, scarichi, dighe (se simulati)
- pratiche agricole
- dati misurati (portata, carichi di sedimenti e nutrienti ecc.) per la calibrazione e validazione del modello

Nei paragrafi seguenti sono descritti in dettaglio i dati utilizzati nel presente studio.

A MODELLO DIGITALE DEL SUOLO SRTM3

Il modello digitale del suolo è stato ricavato dai dati SRTM3 (Shuttle Radar Topography Mission). La Shuttle Radar Topography Mission ha prodotto il più completo modello digitale del suolo mai realizzato al mondo e con la più alta risoluzione. Il progetto è frutto del lavoro congiunto di tre partner leader di settore: la NASA (National Aeronautics and Space Administration), la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) (formalmente National Imagery and Mapping Agency, NIMA) del Dipartimento della Difesa degli Stati Uniti d'America (DoD) e l'agenzia spaziale Tedesca (DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) che ha collaborato con l'Agenzia Spaziale Italiana (ASI).

Il progetto è partito nel febbraio 2000 tramite l'acquisizione a bordo dello Space Shuttle Endeavour di due antenne Radar interferometriche SAR (Synthetic Aperture Radar) (Zebker and Goldstein, 1986; Massonnet, 1997; Madsen and Zebker, 1998; Rosen et al., 2000). Proprio questa nuova tecnologia ha permesso l'attuazione del progetto, infatti l'acquisizione di dati di elevazione con tecniche classiche come quella aerea erano il principale ostacolo alla realizzazione di un progetto di tale dimensione in quanto caratterizzate da costi proibitivi e anche da ostacoli burocratici politici da superare sulla scala internazionale.

L'obiettivo principale della missione è stato sviluppare un modello digitale del suolo di tutta la superficie compresa tra circa 60° nord e 56° sud di latitudine, pari a circa l'80% dell'intera superficie terrestre. Il prodotto cartografico derivato da questi dati è una griglia con risoluzione di 1 arco-secondo (corrispondente approssimativamente a 30m x 30m) di notevole precisione: è stato calcolato per l'errore associato alle quote un livello di confidenza pari al 90% che rientra negli standard NMAS (National Map Accuracy).

Si è voluto realizzare una base di conoscenza con queste caratteristiche in quanto fondamentale per una enorme serie di lavori scientifici a piccola e a grande scala.

I dati radar non sono capaci di rilevare le altezze al di sotto della volta arborea e quindi sono caratterizzati da questo errore, cioè le altezze dei suoli con copertura vegetale sono calcolate al di sopra della volta.

Per il presente studio sono stati scaricati i dati comprendenti la superficie italiana che in seguito sono stati ritagliati sul contorno nazionale digitalizzato. E' stato necessario convertire i dati in formato GRID, formato accettato dall'interfaccia ArcView-SWAT e proiettarli in un sistema di riferimento appropriato.

La scelta della proiezione è ricaduta sull' UTM (Universal Trasversal Mercatore) GRS 80 fuso 33, questo sistema di proiezione è stato adottato anche per tutte le altre tipologie di dato (fig. 12).

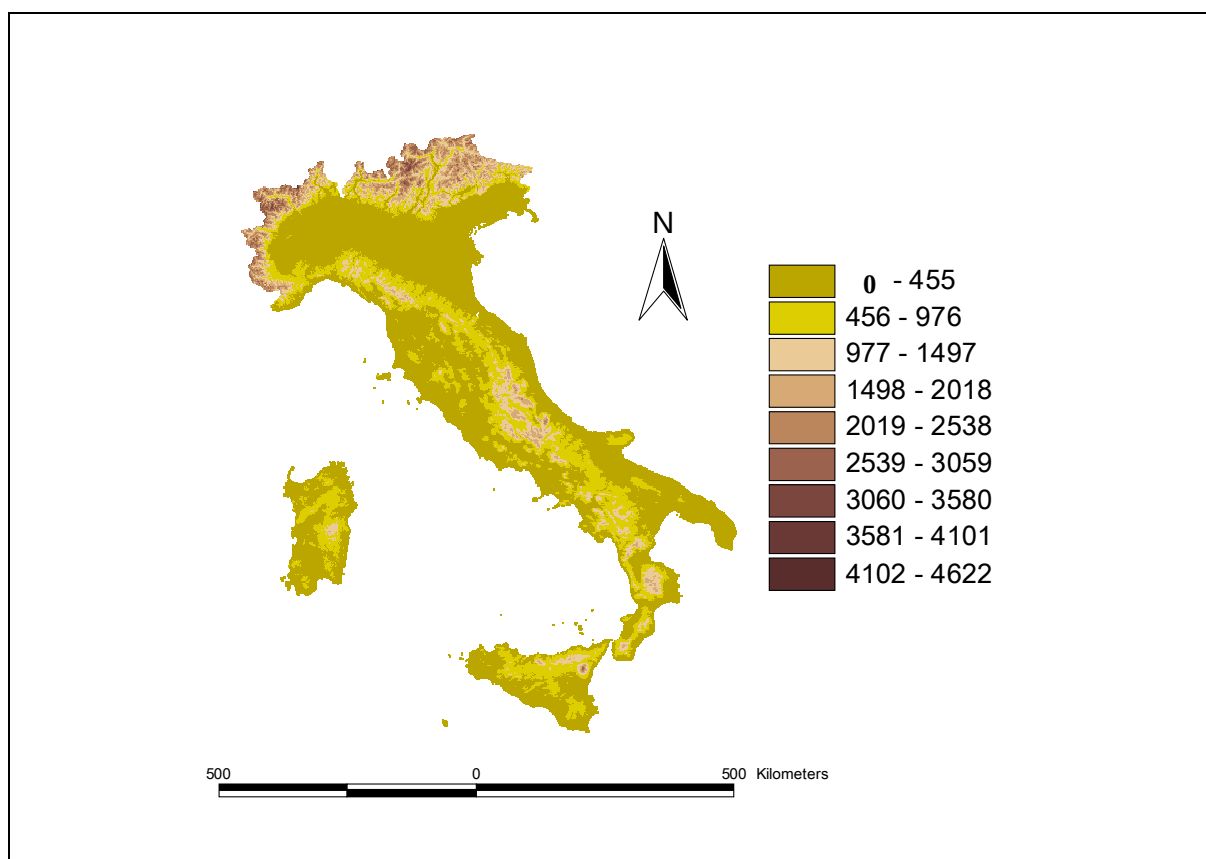


Figura 12: Modello digitale del suolo ricavato dai dati SRTM3.

B CARTA USO SUOLO CORINE LAND COVER

I dati sull'uso del suolo sono stati estrapolati dalla carta tematica CORINE LAND COVER.

Il programma CORINE (COoRdination de l' INformation sur l' Environnement), approvato dal Consiglio della Comunità Europea nel 1985, ha lo scopo primario di verificare dinamicamente lo stato dell'ambiente nell'area comunitaria, al fine di orientare le politiche comuni, controllarne gli effetti, proporre eventuali correttivi.

All'interno del programma CORINE, è stato sviluppato il progetto CORINE-Land Cover destinato al rilevamento e al monitoraggio, ad una scala compatibile con le necessità comunitarie, delle caratteristiche del territorio.

Il progetto è partito nel 1986, con un intervento pilota sul Portogallo, nel corso del quale sono state individuate e messe a punto le esigenze strumentali e le

metodologie. In seguito, il programma è stato esteso a tutto il territorio europeo e, ad oggi, è in fase di completamento anche per i Paesi dell'Est europeo e del bacino del mediterraneo non appartenenti all'Unione.

Il progetto CORINE Land Cover ha previsto la realizzazione di una cartografia della copertura del suolo in scala 1:100.000, con una legenda di 44 voci su 3 livelli gerarchici che fa riferimento ad unità spaziali significativamente omogenee rispetto alla scala utilizzata in modo da raggiungere un buon rapporto costi/benefici per coprire le esigenze tematiche del progetto e agevolare il processo di digitalizzazione.

Ciò premesso, la superficie minima cartografabile è stata indicata in 25 ettari che corrisponde ad un quadrato di 5 mm di lato o ad un cerchio di 2,8 mm di raggio. La carta finale risultante, in formato digitale, costituisce la base di riferimento geografico e tematico del Sistema Informativo CORINE.

I dati della copertura del suolo sono stati ricavati da immagini satellitari (di norma Landsat D-TM Spot-HRV), in falso colore, per lo più con la combinazione, per il Thematic Mapper delle bande 4,5,3, che è quella che consente la miglior discriminazione degli oggetti identificati nella legenda. La tecnica utilizzata per la discriminazione degli uso-suolo è stata la fotointerpretazione assistita da calcolatore seguita da una fase di validazione e digitalizzazione dei dati.

Questi ultimi, in fase finale, sono stati resi pubblici.

La legenda CORINE LAND COVER come soprascritto si articola su 3 livelli, il primo dei quali comprende 5 voci generali che abbracciano le maggiori categorie di copertura sul pianeta (territori modellati artificialmente, territori agricoli, territori boscati e ambienti semi-naturali, zone umide, corpi idrici), il secondo 15 voci, adatte ad una rappresentazione a scale di 1:500.000/1.000.000 e il terzo 44 voci, più dettagliate, adatte appunto ad una scala di 1:100.000 (tab. 14).

Tabella 14: Codici e numerazione delle classi di uso del suolo del progetto CORINE LAND COVER

NUM	CLASSE E CODICE
	1. Territori modellati artificialmente
	1.1. Zone urbanizzate
1	1.1.1. Tessuto urbano continuo.
2	1.1.2. Tessuto urbano discontinuo.
	1.2. Zone industriali, commerciali e reti comunicazione
3	1.2.1. Aree industriali o commerciali.
4	1.2.2. Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori.
5	1.2.3. Aree portuali.
6	1.2.4. Aeroporti.
	1.3. Zone estrattive, discariche e cantieri
7	1.3.1. Aree estrattive.
8	1.3.2. Discariche.
9	1.3.3. Cantieri.
	1.4. Zone verdi artificiali non agricole
10	1.4.1. Aree verdi urbane.
11	1.4.2. Aree sportive e ricreative.
	2. Territori agricoli
	2.1. Seminativi
12	2.1.1. Seminativi in aree non irrigue.
13	2.1.2. Seminativi in aree irrigue.
14	2.1.3. Risaie.
	2.2. Colture permanenti
15	2.2.1. Vigneti.
16	2.2.2. Frutteti e frutti minori.
17	2.2.3. Oliveti.
	2.3. Prati stabili
18	2.3.1. Prati stabili.
	2.4. Zone agricole eterogenee
19	2.4.1. Colture annuali associate a colture permanenti.
20	2.4.2. Sistemi culturali e particellari complessi.
21	2.4.3. Aree prev. occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti.
22	2.4.4. Aree agroforestali.
	3. Territori boscati e ambienti seminaturali
	3.1. Zone boscate
23	3.1.1. Boschi di latifoglie.
24	3.1.2. Boschi di conifere.
25	3.1.3. Boschi misti
	3.2. Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea
26	3.2.1. Aree a pascolo naturale e praterie d'alta quota.
27	3.2.2. Brughiere e cespuglieti.
28	3.2.3. Aree a vegetazione sclerofilla.
29	3.2.4. Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione.
	3.3. Zone aperte con vegetazione rada o assente
30	3.3.1. Spiagge, dune, sabbie (più larghe di 100 m).
31	3.3.2. Rocce nude, falesie, rupi affioramenti.
32	3.3.3. Aree con vegetazione rada.
33	3.3.4. Aree percorse da incendi.
34	3.3.5. Ghiacciai e nevi perenni.
	4. Zone umide
	4.1. Zone umide interne

35	4.1.1.	Paludi interne.
36	4.1.2.	Torbiere.
	4.2.	Zone umide marittime
37	4.2.1.	Paludi salmastre.
38	4.2.2.	Saline.
39	4.2.3.	Zone intertidali.
	5.	Corpi idrici
	5.1.	Acque continentali
40	5.1.1.	Corsi d'acqua, canali e idrovie.
41	5.1.2.	Bacini d'acqua.
	5.2.	Acque marittime
42	5.2.1.	Lagune.
43	5.2.2.	Estuari
44	5.2.3.	Mari e Oceani

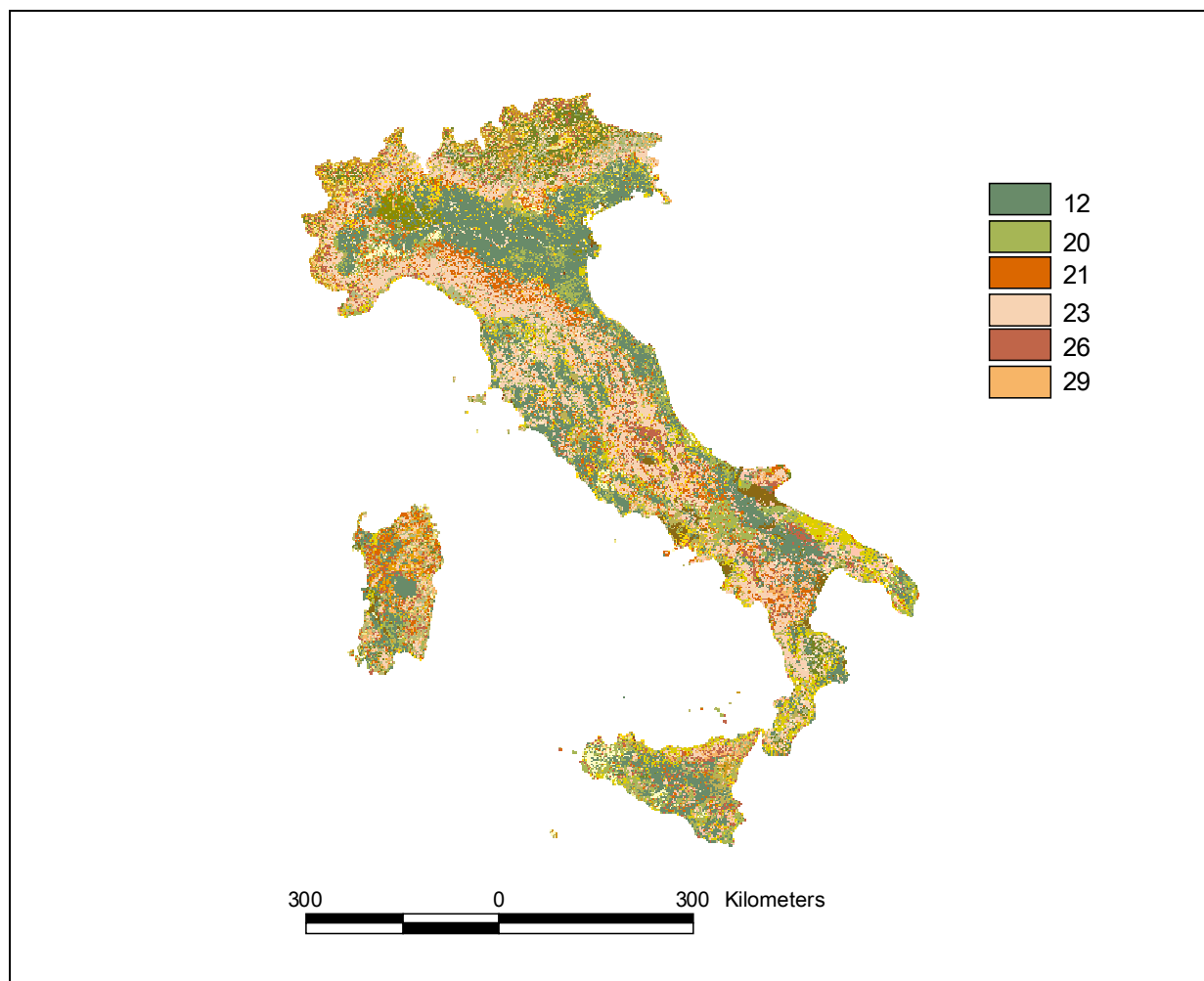


Figura 13: Carta dell'uso del suolo CORINE LAND COVER. La legenda è stata semplificata in modo da evidenziare solo gli usi del suolo prevalenti indicati con la rispettiva numerazione. Per il significato associato alle numerazioni si rimanda alla tabella 2.

La carta CORINE LAND COVER è stata ritagliata e proiettata per poter essere utilizzata nel modello (fig. 13).

Le classi Corine sono state adattate al modello SWAT per poter essere utilizzate nelle simulazioni matematiche: il modello ha bisogno per ogni classe di uso-suolo di una serie di parametri che devono essere imputati ed è dotato di un database di default con molti uso-suolo già caratterizzati. In molti casi è stato possibile associare le classi Corine a quelle presenti nel database del modello, ma per altre classi come ad esempio “oliveti” o “vigneti”, assenti nel database di SWAT, è stata necessaria l’implementazione dei dati e la rispettiva parametrizzazione.

C CARTA DEI SUOLI SGDBE

I dati sui suoli sono stati ricavati dal SGDBE (Soil Geographical Database of Europe) versione 4 realizzato in scala 1:100.000 in quanto inizialmente incluso nel progetto CORINE (versione 1) (Platou et al., 1989).

Dalla versione 1 del database alla attuale versione 4 il progetto è stato di volta in volta ampliato. Alla versione 2, difatti, si è passati negli anni 1990-1991 per l’immissione del database nel progetto MARS Monitoring Agriculture by Remote Sensing (Vossen e Meyer-Roux, 1995) del DG VI (Directorate General for Agriculture) della Comunità Europea che ha richiesto una serie di approfondimenti.

Proprio in questo ambito è stato inoltre creato un gruppo di esperti (Soil and GIS Support Group) attraverso il quale sono state dettate le più approfondite basi della versione 3 che ha coperto oltre a tutto il territorio della comunità europea e anche quello dei paesi candidati (King et al. 1994, Le Bas e Jamagne 1996 e Heineke et al. 1998).

Attualmente, con la versione 4, il fine del progetto è comprendere un’area molto più vasta cioè l’Eurasia e i paesi del mediterraneo ed infatti il nome del database è stato mutato in “Soil Geographical Database of Eurasia and the Mediterranean” ed è ancora in fase di completamento (fig. 14).

Lo scopo principale di questo database è quello di fornire una serie di parametri pedologici da utilizzare nelle modellazioni agrometeorologiche ed ambientali a scala regionale nazionale o continentale (Jamagne et al. 2002).

Per codificare i tipi di suolo è stato utilizzato il nuovo World Reference Base (WRB) for Soil Resources (FAO et al., 1998) e tutto il lavoro è stato coordinato dall' ESB European Soil Bureau (Montanarella e Jones, 1999).

Il database contiene una lista di Soil Typological Units (STU), che sono le unità di suolo che sono state identificate e descritte. Le STU sono caratterizzate da attributi che specificano la natura e le proprietà dei suoli (come ad esempio: tessitura, caratteristiche idrologiche ecc.). Alla scala selezionata non è stato possibile selezionare tutte le unità litologiche presenti al suolo e quindi sono state create delle associazioni di suoli le SMU (Soil Mapping Units) (fig. 15).

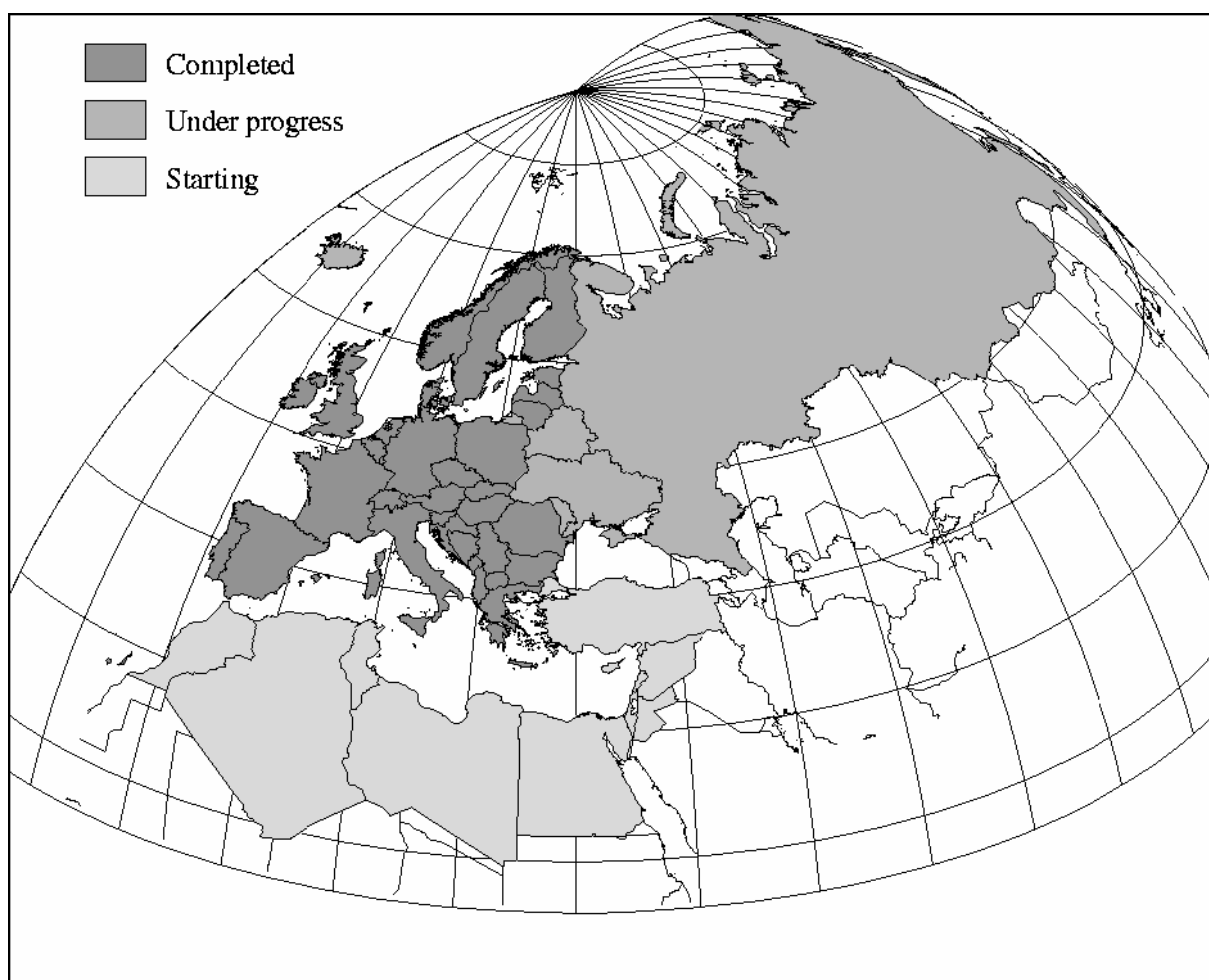


Figura 14: Paesi inclusi nel SGDBE ver. 4; nelle tre tonalità di grigio sono indicati, a partire dalla più scura, i paesi che hanno informazioni complete, quelli che stanno completando il progetto e quelli che saranno aggiunti in futuro.

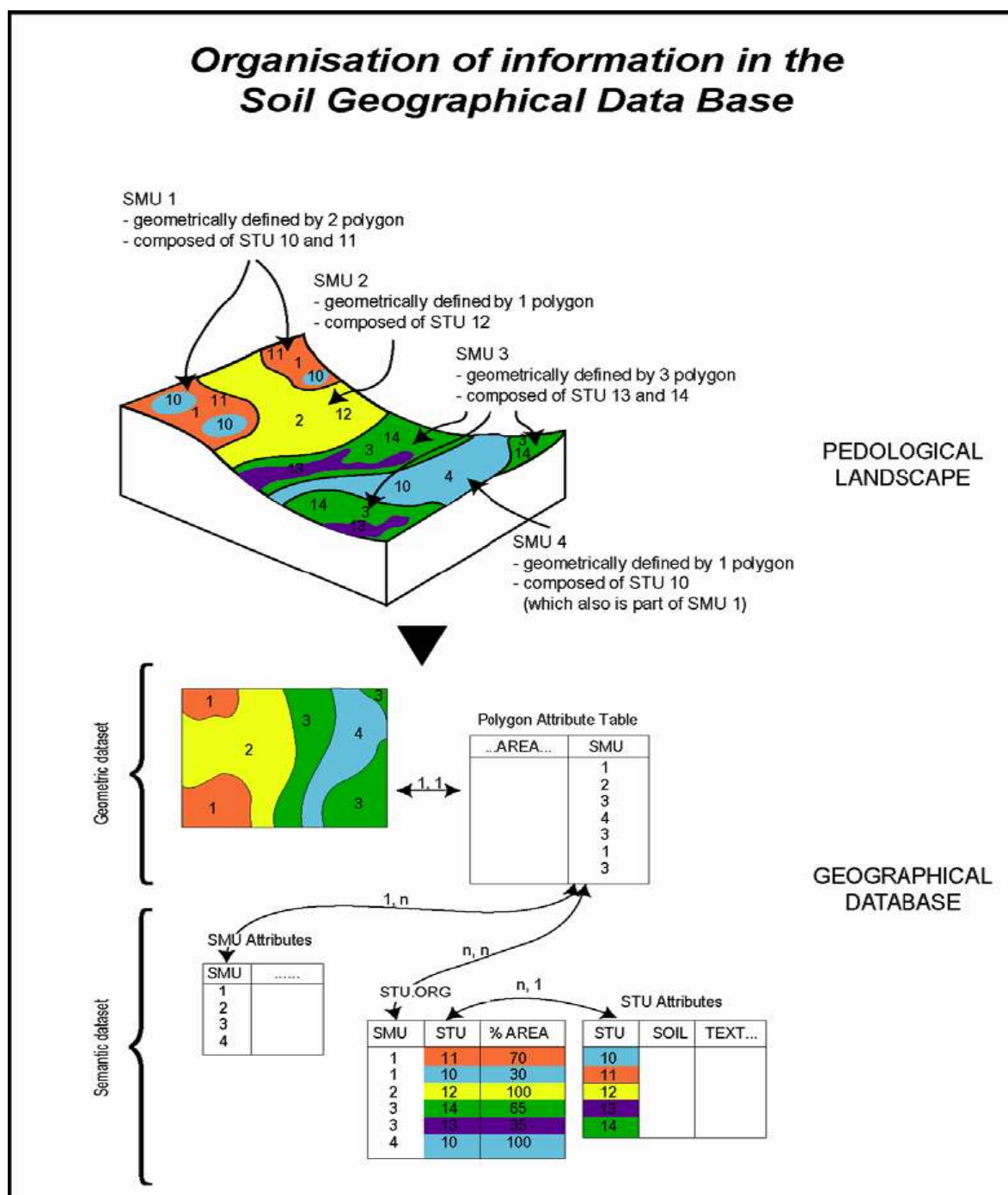


Figura 15: Schema della struttura del SGDBE e del significato di STU E SMU.

I parametri e la distribuzione delle STU ricadenti nel territorio italiano sono stati utilizzati per caratterizzare i suoli nella modellazione con SWAT.

Anche in questo caso la carta pedologica è stata ritagliata e proiettata, inoltre, tutte le tipologie di suolo sono state aggiunte nel database di default di SWAT mantenendo il codice numerico distintivo della STU (fig. 16)

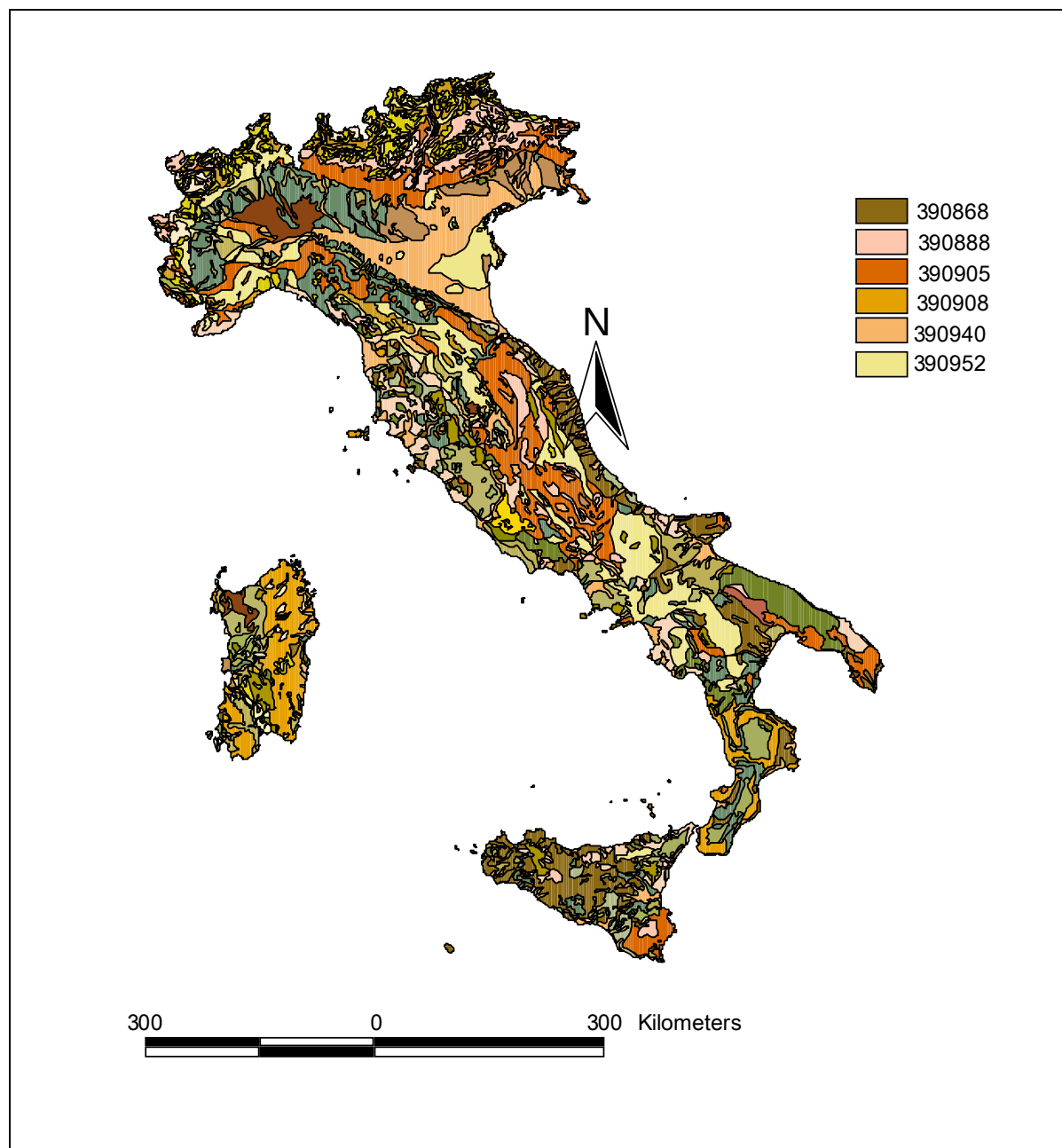


Figura 16: Carta dei suoli ricavata dal SGDBE. La legenda è stata semplificata in modo da individuare le STU (Soil Typological Unit) più rappresentate nel territorio italiano.

D BACINI IDROGRAFICI CCM

Al fine di individuare le esatte collocazioni ed estensioni dei bacini idrografici italiani sono stati utilizzati i dati del progetto “Catchments Characterization and Modelling” (CMM) dello JRC EuroLandscape project.

Questo progetto è nato dalla necessità di disporre a livello comunitario di una banca dati georeferita dei bacini idrografici europei soprattutto in seguito all’ingresso nelle politiche comunitarie di nuove direttive come la “Water Frame Directive” il cui fine ultimo è la compilazione dei “Piani di Bacino” (capitolo 2).

I Layer informativi ottenuti da questa attività riguardano la delineazione precisa dei bacini idrografici e del loro reticolo idrografico principale.

La scala utilizzata è 1.100.000 e di conseguenza i bacini idrografici di minori dimensioni non sono individuati come tali ma compresi in sistemi idrografici maggiori. Per questa ragione i dati ricavabili dal progetto sono adatti solo a studi a grande scala.

La tecnica utilizzata per l’individuazione dei bacini idrografici è basata su una procedura automatica di estrapolazione da un modello digitale del terreno.

I dati ricavati per l’Italia hanno permesso un confronto tra i bacini individuati dal progetto e quelli individuati dal modello funzionale alla valutazione di questa procedura in SWAT su grande scala. Inoltre i reticoli idrografici individuati in questo studio hanno permesso di localizzare in SWAT la corretta chiusura dei bacini idrografici.

Sempre sulla base di questi dati, l’Italia è stata divisa in zone su cui sono poi state effettuate le simulazioni come descritto più approfonditamente in seguito.

Per l’applicazione di SWAT all’Italia sono stati selezionati solo i bacini idrografici completamente ricadenti nel territorio nazionale escludendo i bacini internazionali. Di seguito sono elencati ed evidenziati i bacini selezionati ed il territorio coperto dalle simulazioni (fig. 17) (tab. 15).

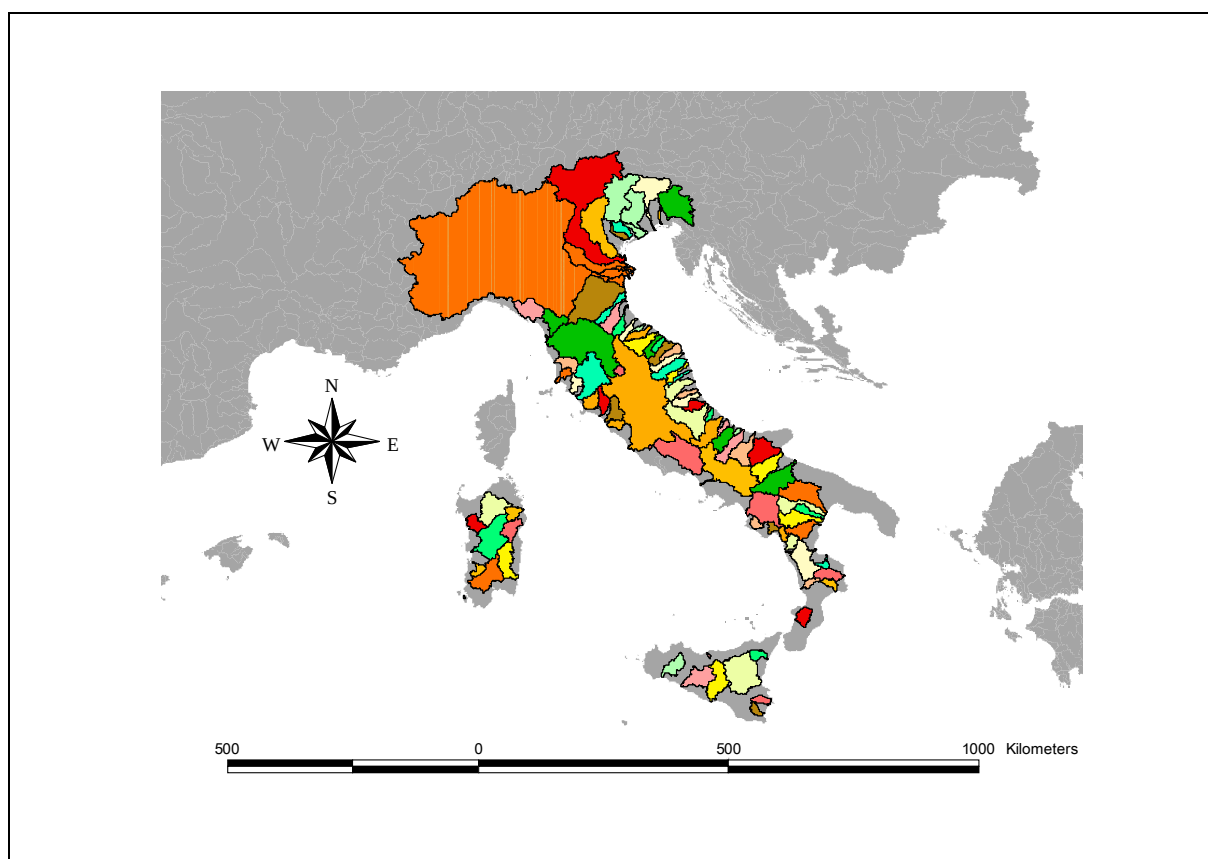


Figura 17: Bacini idrografici italiani digitalizzati nell'ambito del progetto CCM

Tabella 15: Bacini idrografici selezionati dal progetto CCM per le simulazioni matematiche

Bacini idrografici		
Adige	Fiora	Saline
Agri	Flumendosa	Salso
Albegna	Foglia	Sangro
Alcantara	Foro	Savio
Alento	Fortore	Savuto
Anapo	Garigliano	Sele
Arno	Isonzo	Serchio
Aso	Lamone	Sile
Basento	Lao	Simeto
Belice	Livenza	Sinarca
Biferno	Magra	Sinello
Bradano	Mannu1	Sinni
Brenta	Mannu2	Tacina
Bruna	Marecchia	Tagliamento
Bussento	Marta	Tellaro
Candelaro	Mesima	Temo
Carapelle	Metauro	Tenna
Castrocucco	Mignone	Tevere

Cavone	Misa	Tirso
Cecina	Musone	Tordino
Cedrino	Neto	Trigno
Cesano	Ofanto	Trionto
Chienti	Ombrone	Tronto
Coghinas	Pescara	Tupei
Conca	Piave	Uniti
Conella	Platani	Vaccuta
Cornia	Po	Volturno
Corno	Posada	Vomano
Crati	Potenza	Zero
Esino	Reno	

E DATI CLIMATICI MARS

I dati climatici necessari al modello sono stati ricavati dal progetto MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing Techniques) sviluppato dallo JRC-EC (Joint Research Centre).

Il progetto MARS, partito nel 1988 ha come obiettivo quello di fornire informazioni in tempo reale sulle aree agricole attraverso l'uso di moderne tecnologie come le tecniche di telerilevamento.

Nell'ambito di questo progetto è stato elaborato un software il CGMS (Crop Growth Monitoring System) in grado di restituire dati climatici per l'intero territorio europeo dal 1975 a scala temporale annuale, mensile, stagionale e giornaliera (tab. 16).

Il CGMS è stato ideato per seguire in maniera oggettiva e quantitativa lo sviluppo delle coltivazioni nella Comunità Europea. Il sistema è basato sul presupposto che lo sviluppo delle colture è condizionato principalmente dalle modificazioni climatiche, dalle caratteristiche del suolo e da una serie di parametri colturali. Questo approccio meccanicistico è in grado di descrivere il ciclo delle colture, in combinazione con lo sviluppo fenologico, dalla semina al raccolto a scala temporale giornaliera.

Tabella 16: Tipologia di dati climatici ricavabili dal progetto MARS e rispettive unità di misura. In rosso sono indicati i dati effettivamente usati nelle simulazioni.

Dati giornalieri	Unità di misura
Temperatura massima	°C
Temperatura minima	°C
Pressione di vapore media	hPa
Velocità del vento media a 10m	m/s
Precipitazione media	mm
Evaporazione potenziale di Penman da superficie acquosa	mm/giorno
Evaporazione potenziale di Penman da suolo nudo	mm/ giorno
Traspirazione potenziale di Penman da superficie vegetata	mm/ giorno
Radiazione globale	KJ/m ² /giorno
Altezza del manto nevoso	cm

La principale caratteristica del CGMS è la spazializzazione delle sue componenti ottenuta integrando i dati meteorologici ricavati con tecniche di interpolazione e i parametri dei suoli coltivati attraverso il mappaggio di unità elementari usate per le simulazioni in modelli matematici di crescita delle colture.

Il prodotto finale del CGMS è una griglia con celle quadrate che delineano una superficie di 50 x 50 km per la quale sono stati calcolati i dati climatici. I valori interpolati descrivono la più probabile condizione media per una cella della griglia in un determinato giorno. Per l'applicazione del modello SWAT al territorio italiano sono stati scaricati i dati delle celle della griglia del CGMS intersecanti il territorio italiano, queste sono risultate essere 200 (fig. 18).

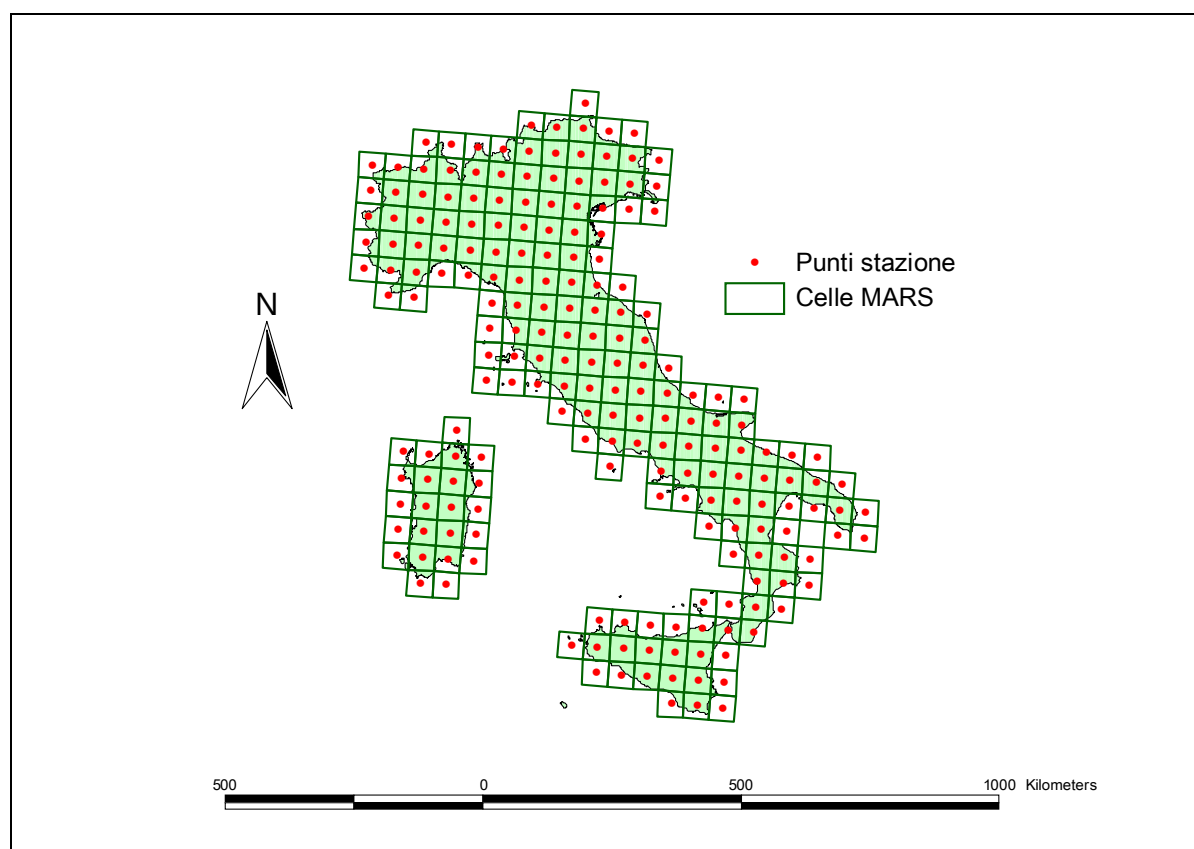


Figura 18: Celle della griglia MARS selezionate per l'Italia e relativi centroidi attribuiti al modello come punti-stazione.

Le celle sono state trattate come stazioni dislocate sul territorio in maniera sistematica e per l'assegnazione delle coordinate geografiche alla stazione sono stati calcolati i centroidi delle celle.

Per ognuna delle duecento celle-stazione sono stati preparati i files di input del modello per i dati di precipitazione, temperatura, radiazione solare e velocità del vento. Nel database sono assenti i dati di umidità relativa necessari per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale secondo Penman-Monteith quindi è stato scelto a questo scopo di utilizzare la formula di Hargreaves opzione possibile da modello. La scelta della formula è risultata idonea anche per la scala spaziale e la risoluzione dei dati di input.

I dati MARS sono stati scaricati in serie storiche di venti anni, dal 1986 al 2005 che rappresentano i dati più recenti nel database. Le serie storiche sono risultate complete data la loro origine dovuta a calcoli di interpolazione. Non è stata quindi necessaria la preparazione di file di input per il Weather Generator (capitolo 4).

F DATI CLIMATICI NCDC-NOAA

L' NCDC (National Climatic Data Center) è un ente nazionale statunitense che gestisce le informazioni climatiche lavorando a stretto contatto con scienziati e ricercatori di tutto il mondo.

In questo ente vengono sviluppati database climatici nazionali e globali che possono essere utilizzati sia da enti governativi che da associazioni private così come da singoli studiosi e ricercatori. Il fine ultimo è perseguire un controllo sui cambiamenti climatici in atto e sugli eventi estremi allo scopo di diminuire i rischi a questi legati.

Il NOAA National Oceanic and Atmospheric Administration dello United States Department of Commerce è l'agenzia statunitense che si occupa della gestione dei sistemi oceanici ed atmosferici.

I dati prodotti dal NCDC-NOAA sono utilizzati in tutto il mondo in numerose applicazioni quali: agricoltura, qualità dell'aria, ingegneria, gestione forestale e ambientale, gestione delle risorse idriche ecc. e sono restituiti in diversi formati alcuni dei quali scaricabili liberamente dalla rete (<http://www.ncdc.noaa.gov>). L'NCDC-NOAA attualmente rappresenta l'archivio attivo di dati meteorologici più grande al mondo.

Per il presente studio sono stati scaricati ed utilizzati i dati climatici provenienti da stazioni di misura terrestri (Land-based Data).

I Land-based data sono il prodotto di una raccolta-dati mondiale basata sullo scambio e organizzata dalla WMO (World Meteorological Organization), vi fanno parte dati di più di 9000 stazioni disseminate in tutto il mondo con serie storiche di differente ampiezza ma anche molto estese. I dati partono, per alcune stazioni, sin dal 1929 ma per la maggior parte delle stazioni i dati sono presenti dal 1973 e sono scaricabili gratuitamente dalla rete attraverso un apposito WebGis. Il download è consentito solo per scopi scientifici (fig. 19).

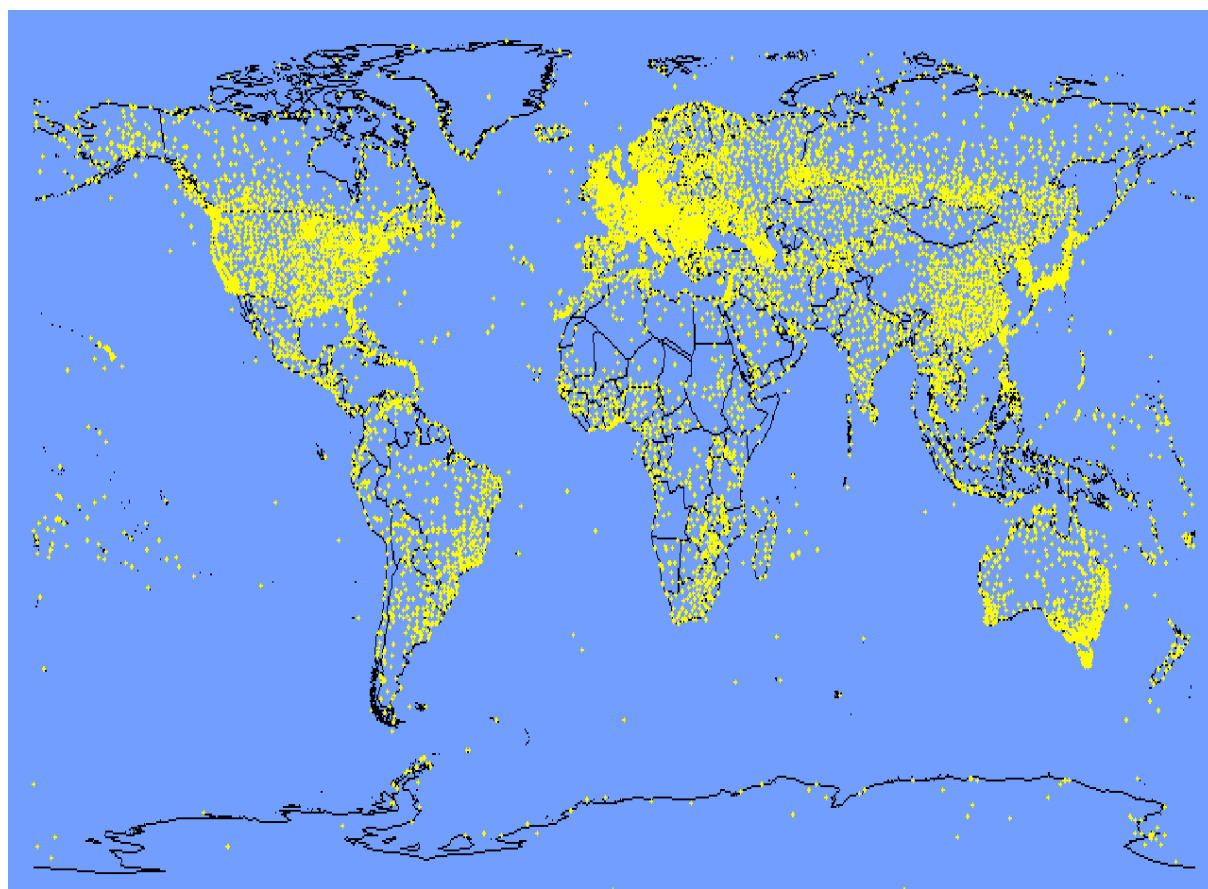


Figura 19: Stazioni NCDC- NOAA nel mondo.

I dati non sono completi e/o disponibili per tutti i paesi per l'esistenza di restrizioni alla fruizione dei dati o per problemi di lettura e trasmissione. Per derivare un dato da inserire nel database sono necessarie un minimo di quattro osservazioni sinottiche da cui viene ricavato il dato giornaliero (Summary Day of the Data), dopo aver subito una procedura di controllo della qualità.

In basso è mostrata una schermata comprensiva del territorio italiano e delle stazioni di afferenza dalle quali è possibile scaricare i dei dati, come da WebGis (fig. 20).



Figura 20: Le stazioni NCDC-NOAA nell'area italiana come visualizzato da WebGis.

Per le modellazioni con SWAT sono state scaricate serie storiche di venti anni, dal 1987 al 2006, ovvero i dati completi a livello annuale più recenti disponibili, di 61 stazioni meteorologiche distribuite sul territorio (fig. 21). Le stazioni presenti nel database per il territorio nazionale sono effettivamente 295 ma è stata necessaria un'attenta selezione per ottenere serie storiche di venti anni con lacune accettabili ai fini del presente studio; molte stazioni, infatti, sono caratterizzate da numerose lacune sia come dato mancante che come mancata lettura strumentale.

Proprio per le ragioni sovra esposte i dati NCDC-NOAA non sono stati considerati nella fasi di elaborazione e calibrazione dei risultati, fasi che sono state invece approfondite con i dati MARS come sarà evidenziato in seguito (cap. 6).

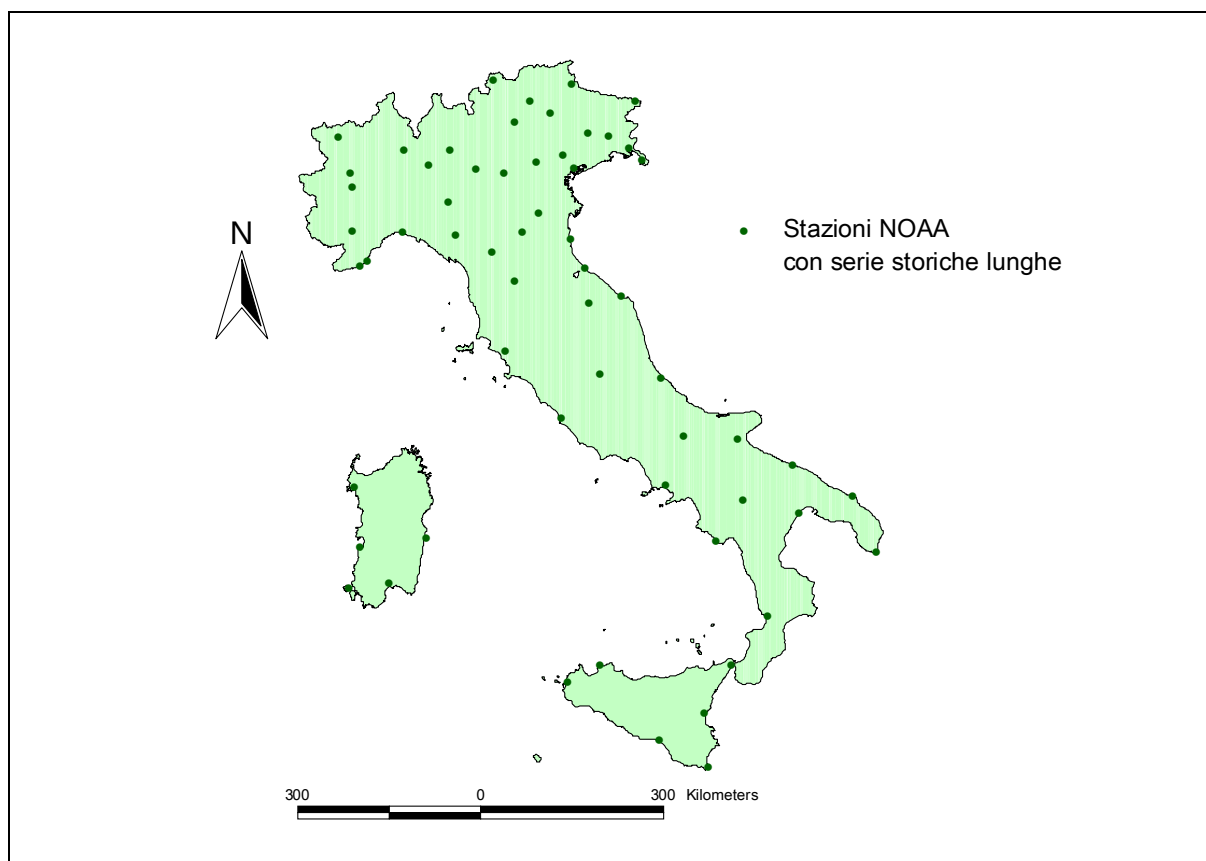


Figura 21: Stazioni NCDC selezionate per le simulazioni con SWAT.

Le tipologie di dati scaricabili sono elencate di seguito (tab. 17), tra questi i selezionati per lo studio sono stati adattati al modello sia attraverso la trasformazione nelle unità di misura accettate dallo stesso sia con la creazione dei file di input.

Tabella 17: Tipologia di dati climatici ricavabili dall'NCDC e unità di misura. In rosso sono indicati i dati effettivamente usati nelle simulazioni.

Dati giornalieri	Unità di misura	Conversione
Temperatura media	Fahrenheit	
Punto di rugiada medio	Fahrenheit	C°
Pressione media a livello del mare	mb	

Pressione media alla stazione	mb	
Visibilità media	miglia	
Velocità del vento media	nodi	m/s
Velocità massima del vento (sostenuta)	nodi	
Velocità massima del vento (raffica)	nodi	
Temperatura massima	Fahrenheit	C°
Temperature minima	Fahrenheit	C°
Precipitazione	pollici	mm
Altezza del manto nevoso	pollici	

G DATI CLIMATICI FAO

Per l'utilizzazione dei dati NCDC-NOAA è stato necessario preparare gli input del Weather Generator di SWAT (file .WGN) (capitolo 4); i dati, come riferito precedentemente, presentano lacune ed errori di lettura dalle strumentazioni.

A questo scopo sono stati utilizzati i dati del CLIMWAT database della FAO (United Nations Food And Agriculture Organization, AgroMet division) che sono scaricabili come medie mensili derivate da lunghe serie storiche e quindi risultano adatte allo scopo prefisso .

Il CLIMWAT è stato concepito per essere utilizzato all'interno di un software in grado di calcolare le reali esigenze idriche di diverse colture in base alla loro georeferenziazione: il CROPWAT.

Il database comprende dati climatici dal 1961 al 1990 di più di 30000 stazioni di rilievo dislocate in 144 paesi diversi. Un tool apposito permette il download di questi dati così come l'utilizzo del CROPWAT. Il software è gratuito e scaricabile dal FAO-FTP server ed è inteso come un sistema di supporto all'agricoltura e al corretto uso delle risorse irrigue.

I dati climatici sono pubblici e sono anche divisi in sei files continentali:

- Asia and the Pacific
- Sub-Saharan Africa
- Near East and North Africa
- Europe
- South America

Il database originale è stato implementato dall' Agrometeorological Group of FAO's Environment and Natural Resources Service.

I dati climatologici inclusi nel database sono elencati nella tabella seguente:

Tabella 18: Dati climatici inseriti nel database CLIMWAT, in rosso quelli utilizzati nella creazione dei file WGN

Dato in medie mensili	Unità di misura
Temperatura massima	C°
Temperatura minima	C°
Umidità Relativa	%
Velocità del vento	m/s
Ore di insolazione	num
Radiazione solare	KJ/m ² /giorno
Evapotraspirazione di riferimento secondo Penman Monteith	mm/giorno
Precipitazioni	mm
Pioggia effettiva	mm

Per la creazione dei file WGN, in totale sono stati utilizzati i dati di 30 stazioni climatiche situate nel territorio italiano (fig. 22).

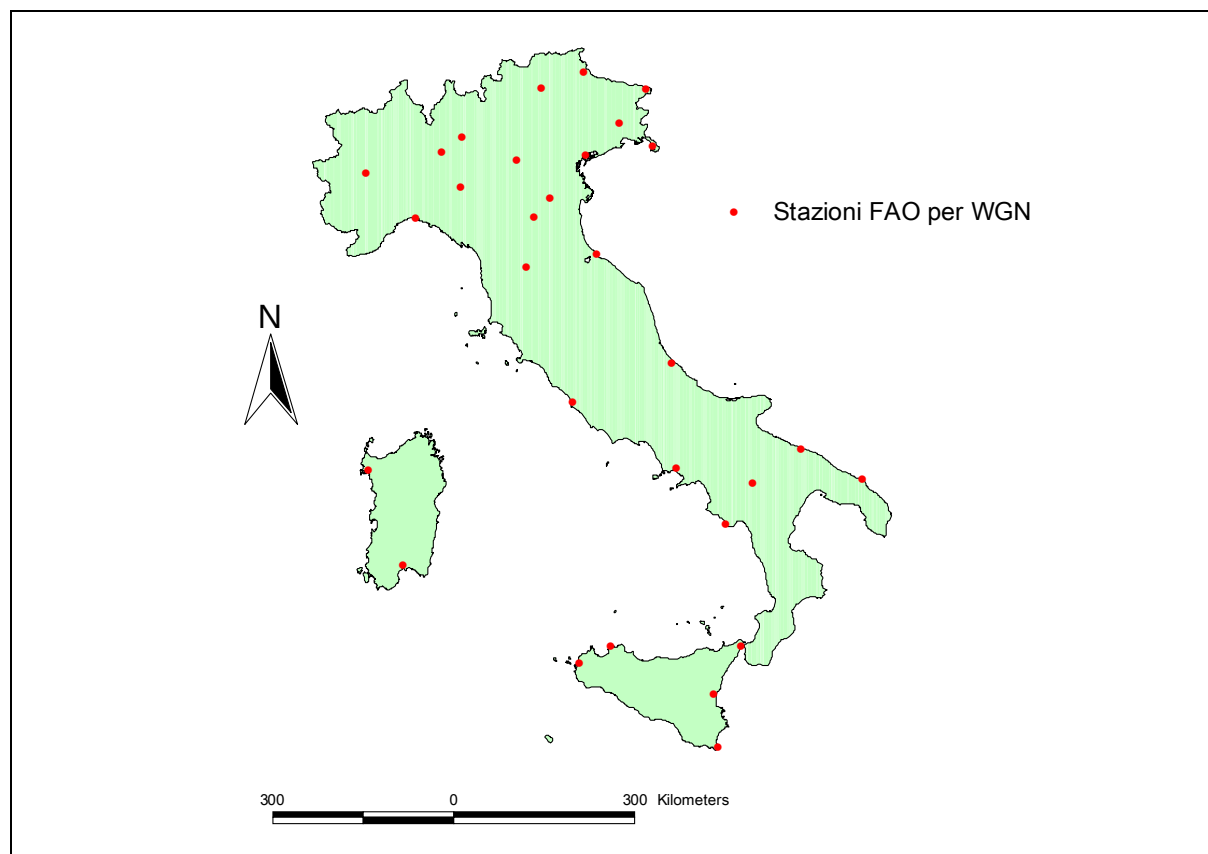


Figura 22: Stazioni climatiche FAO utilizzate per la creazione dei files WGN

IL 5° CENSIMENTO DELL'AGRICOLTURA ISTAT

Al fine di individuare in maniera più precisa e contestualizzata le colture diffuse nel territorio italiano sono stati utilizzati i dati ISTAT del “5° Censimento Generale dell'Agricoltura”.

E' stato necessario questo approfondimento per assegnare la coltura specifica e le pratiche agricole rispettive ad alcune classi CORINE troppo generiche ai fini modellistici. Un esempio è dato dalla classe indicata nella CORINE LAND COVER come “seminativi”.

Questa comprende una serie di colture molto eterogenee con altrettanto differenti lavorazioni e pratiche agricole, in grado di influenzare in maniera sensibile gli output finali delle modellazioni in termini di impatti sui suoli e sul ciclo idrologico.

I dati del censimento hanno consentito di individuare la coltura maggiormente presente per ogni sottobacino sulla base del censimento provinciale.

In particolare, i layer informativi delle province italiane e dei sottobacini dei bacini idrografici simulati sono stati incrociati per calcolare l'appartenenza di ogni sottobacino alla provincia predominante. In seguito, al sottobacino è stata assegnata la coltura maggiormente presente nella provincia come da censimento.

I DATI SULLE PRATICHE AGRICOLE

I dati sulle lavorazioni agronomiche attuate sono stati ricavati da diverse fonti.

Per gran parte del territorio italiano le lavorazioni attribuite sono state assegnate sulla base delle “Buone Pratiche Agricole” desunte da appositi studi agronomici.

Per determinate zone, invece si è disposto di informazioni contestualizzate alle realtà locali ricavate da studi sperimentali nell'ambito dei quali i dati sono stati raccolti empiricamente (Abruzzo, Puglia, Emilia Romagna, Campania).

L DATI DI PORTATA ANNALI IDROGRAFICI

Sono stati acquisiti anche dati di portata misurata necessari, come spiegato in seguito, nella fase di calibrazione del modello.

I dati sono stati ricavati dagli Annali dei Servizi Idrografici Nazionale e Regionali disponibili in rete. Questi, nella maggior parte dei casi, sono scaricabili solo in formato PDF il che ha reso necessaria una trasformazione in dato digitale.

I dati sono stati acquisiti, in particolare, per un bacino idrografico pilota ricadente all'interno di ogni zona di simulazione (paragrafo 5.2).

La scelta del bacino pilota non è stata casuale ma dettata da alcuni parametri.

In primo luogo la scelta è stata condizionata dalla disponibilità dei dati che è risultata estremamente incompleta: dati non aggiornati e molto spesso di anni precedenti a quelli delle simulazioni, assenza completa o parziale del dato, serie storiche brevi e frammentate.

In seconda analisi la scelta è stata guidata dalla posizione della stazione di misura: si è cercato di ottenere dati si portata da stazioni quanto più possibile vicine alla sezione di chiusura in modo da sviluppare la calibrazione sull'intero bacino idrografico.

In terza analisi sono stati privilegiati nella scelta i bacini idrografici di grossa estensione: data la grandezza dell'area di studio, così come anche delle zone operative, una calibrazione su bacini di grande estensione è risultata essere sicuramente più significativa di una operata su un bacino di medie o piccole dimensioni.

M PRECIPITAZIONI - ANNALI IDROGRAFICI

Al fine di individuare, in fase preliminare, le differenze esistenti tra i dati MARS interpolati utilizzati nelle simulazioni e i dati di precipitazione misurata, sono stati acquisiti anche dati di precipitazione dal Servizio Idrografico Nazionale per le stesse stazioni di misura da cui sono stati ricavati i dati di portata misurata utili nella fase di calibrazione. Questo affinché si potessero evidenziare le differenze specificamente delle zone calibrate in modo da avere informazioni aggiuntive per la calibrazione stessa.

5.2 La suddivisione in zone

Come sopra accennato, data l'estensione dell'area di studio e la mole di dati da elaborare, è stato necessario suddividere l'Italia in diverse zone per attuare le simulazioni. La decisione è scaturita in seguito a problemi verificatisi, con la strumentazione utilizzata, utilizzando il modello sull'intero territorio nazionale.

In particolare, dato che il modello SWAT lavora a scala di bacino, la suddivisione in zone è stata effettuata tenendo conto dei limiti e della forma effettiva dei bacini idrografici italiani simulati. In questo modo ogni zona di elaborazione è risultata essere pari, in ampiezza, alla somma delle estensioni di un gruppo di bacini idrografici ad eccezione della zona individuata nel NW corrispondente al solo bacino del Po.

I dati sulla effettiva dimensione e forma dei bacini sono stati ricavati dal progetto CCM come sopra descritto.

Il numero di bacini idrografici contenuti in ogni zona è risultato variabile, dato che si è cercato di ottenere zone di simulazione di dimensioni simili.

In totale l'Italia è stata suddivisa in 9 zone (fig. 23, 24) (tab. 19).

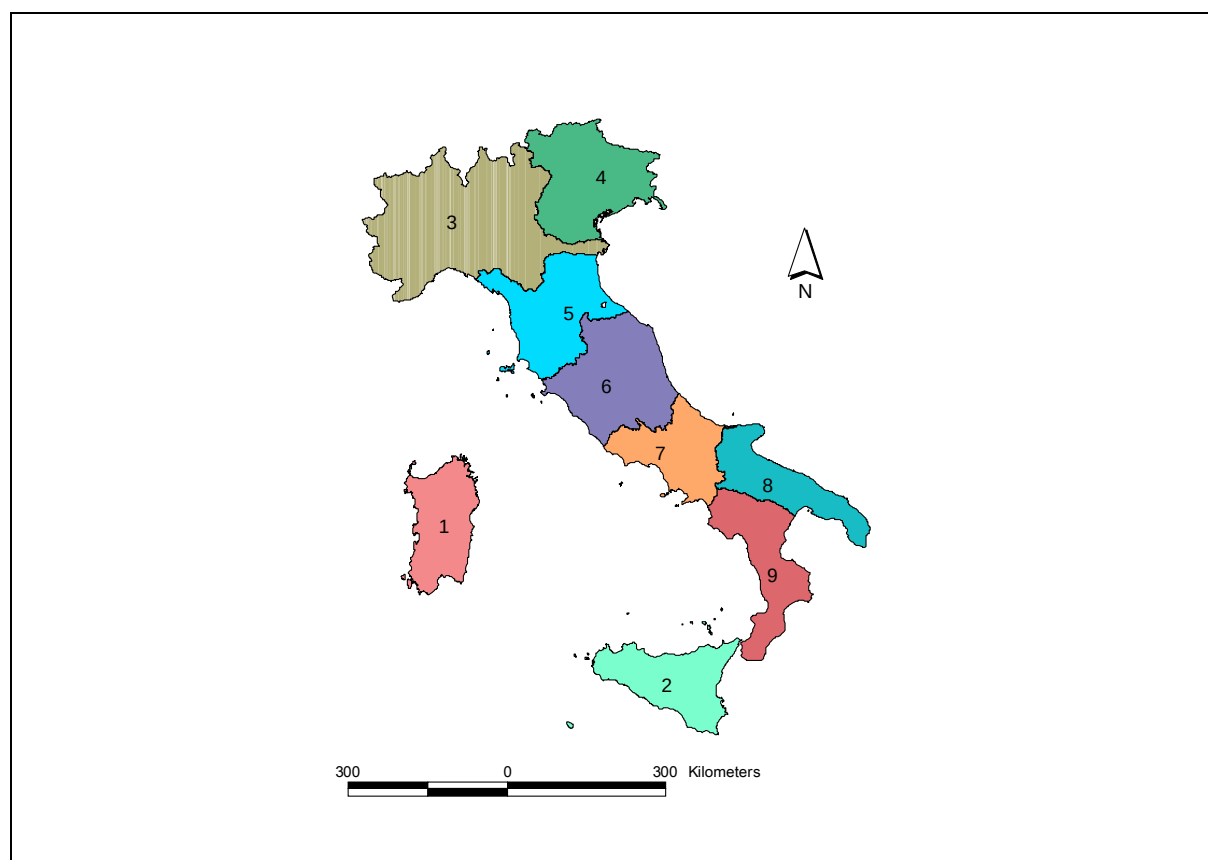


Figura 23: Suddivisione della superficie Italiana in zone per l'attuazione delle simulazioni.

Tabella 19: Zone di simulazione e bacini idrografici compresi

Fiume	Zona	Fiume	Zona	Fiume	Zona
Cedrina	1	Conca	5	Biferno	7
Coghinas		Cornia		Foro	
Flumendosa		Foglia		Fortore	
Mannu1		Lamone		Garigliano	
Mannu2		Magra		Sangro	
Posada		Marecchia		Sinarcia	
Temo		Ombrone		Sinello	
Tirso		Reno		Trigno	
Tupei		Savio		Volturno	
Alcantara	2	Serchio	6	Bradano	8
Anapo		Uniti		Candelaro	
Belice		Albegna		Carapelle	
Conella		Aso		Ofanto	
Platani		Cesano		Agri	9
Salso		Chienti		Alento	
Simeto		Esino		Basento	
Tellaro		Fiora		Bussento	
Po	3	Marta		Castrocucco	
Adige	4	Metauro		Cavone	
Brenta		Mignone		Crati	
Corno		Misa		Lao	
Isonzo		Musone		Mesima	
Livenza		Pescara		Neto	
Piave		Potenza		Savuto	
Sile		Saline		Sele	
Tagliamento		Tenna		Sinni	
Zero		Tevere		Tacina	
Arno	5	Tordino		Trionto	
Bruna		Tronto		Vaccuta	
Cecina		Vomano			

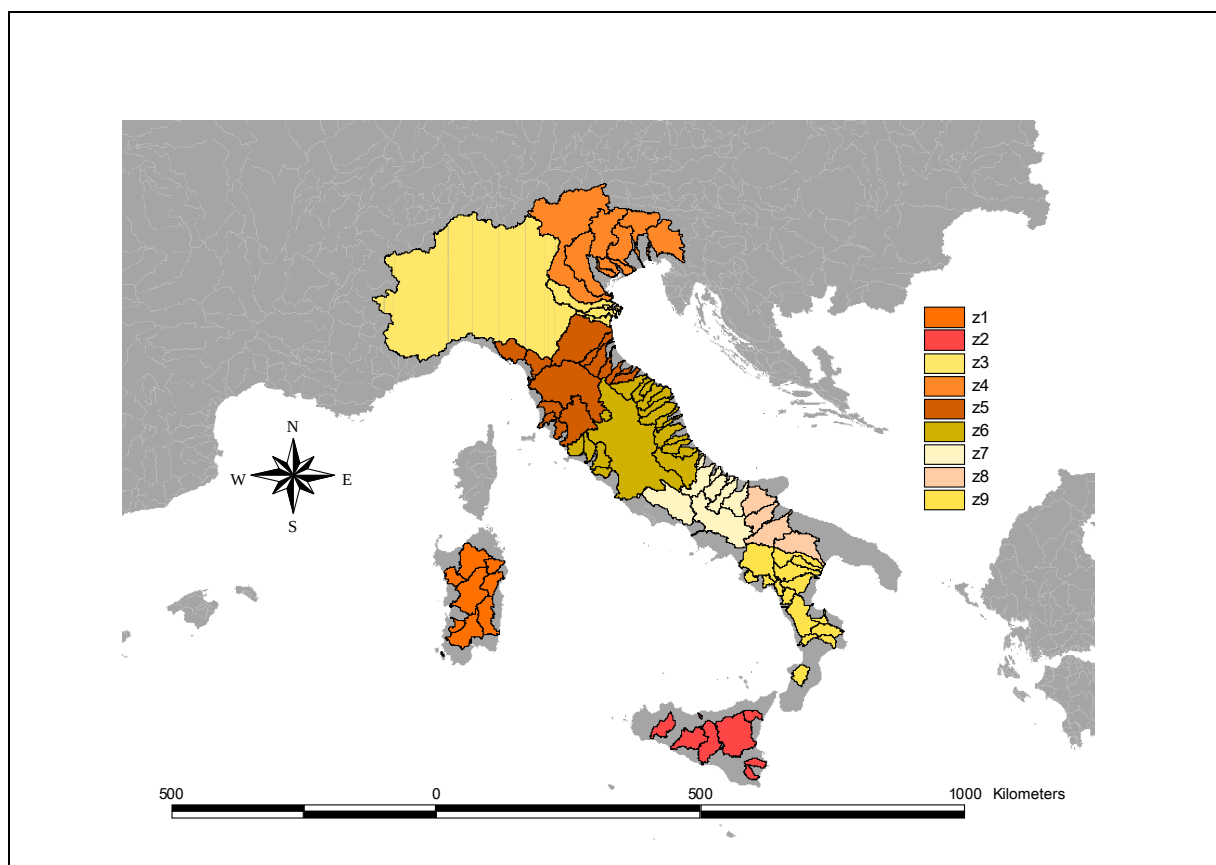


Figura 24: Bacini idrografici CCM suddivisi per zona di simulazione

5.3 Le fasi delle simulazioni

Il modello SWAT, versione 2000, è stato introdotto in ArcView con un'interfaccia che si avvia, in automatico, attraverso l'attivazione di una estensione, AVSWAT2000. L'interfaccia crea, inoltre, dei menù di comandi dedicati: il menù *Avswat* nella "Watershed View", dove avviene la delineazione del bacino idrografico e i menù *Input*, *Edit Input*, *Simulation* e *Reports* della "SWAT View", la vista in cui si sviluppano i processi simulativi veri e propri e che viene creata dall'interfaccia stessa in seguito alla conclusione della prima fase di delineazione (fig. 25).

Il presente paragrafo non ha la pretesa di illustrare in completo il processo simulativo del modello SWAT, scopo per il quale si rimanda al tutorial dello stesso, ma di soffermarsi sui passaggi principali al fine di evidenziare le diverse scelte elaborative effettuate nell'ambito del presente studio.

Dalla schermata principale sono stati creati 9 progetti, uno per ogni zona di elaborazione in cui è stata suddivisa l'Italia (fig. 26).

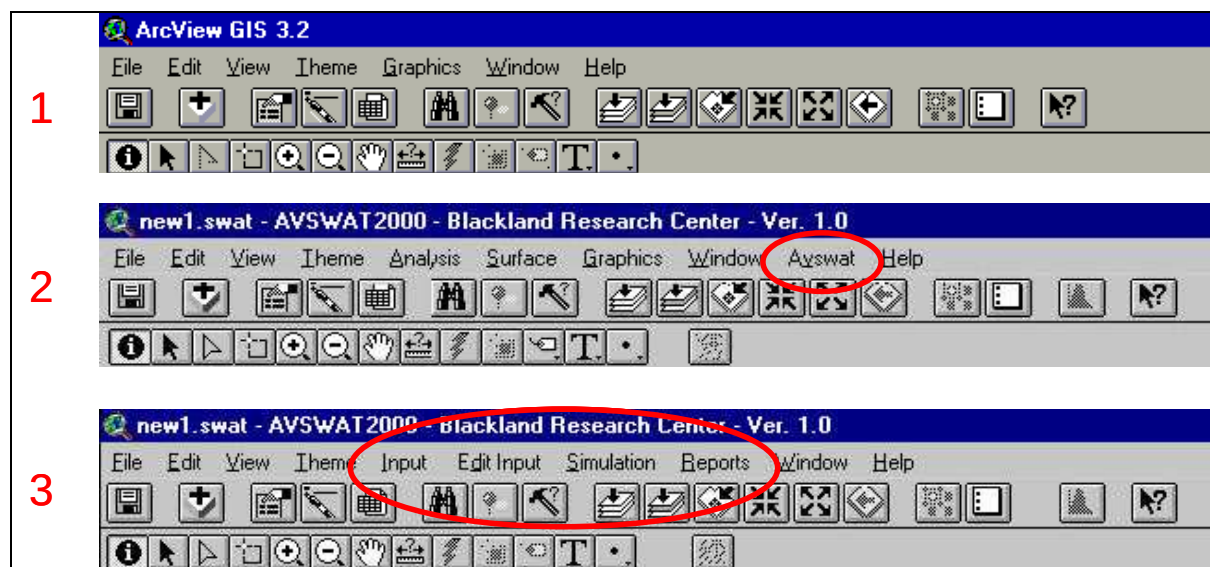


Figura 25: Menù di comandi inseriti dall'interfaccia AVSWAT2000 in ArcView (1) per la Watershed View (2) e per la SWAT View (3).

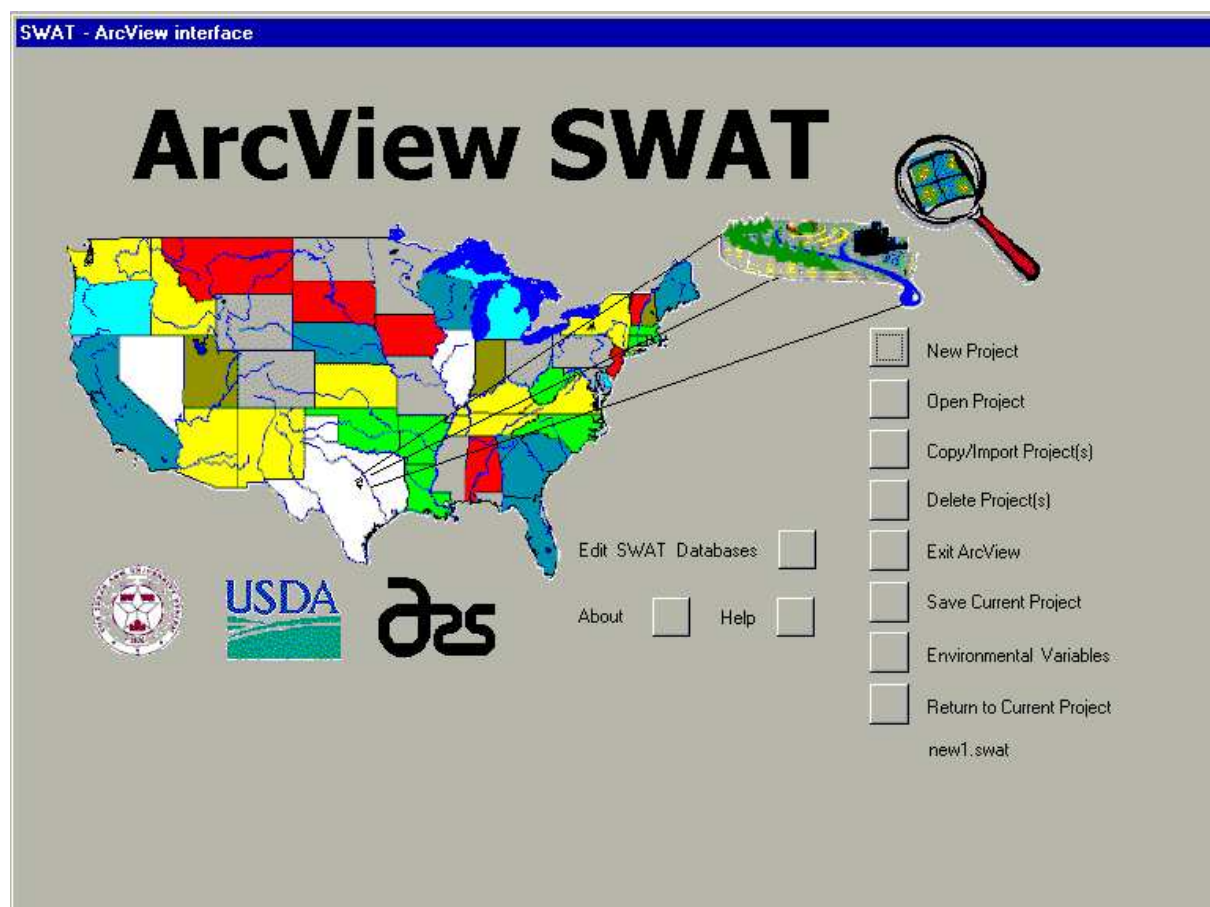


Figura 26: Schermata principale del modello AVSWAT 2000.

Creati i progetti, nella “Watershed View” si è prodeduto all’immissione dei dati geografici per la delineazione dei bacini idrografici, dei sottobacini e delle HRU, passaggi consequenziali del menù Avswat (fig. 27)

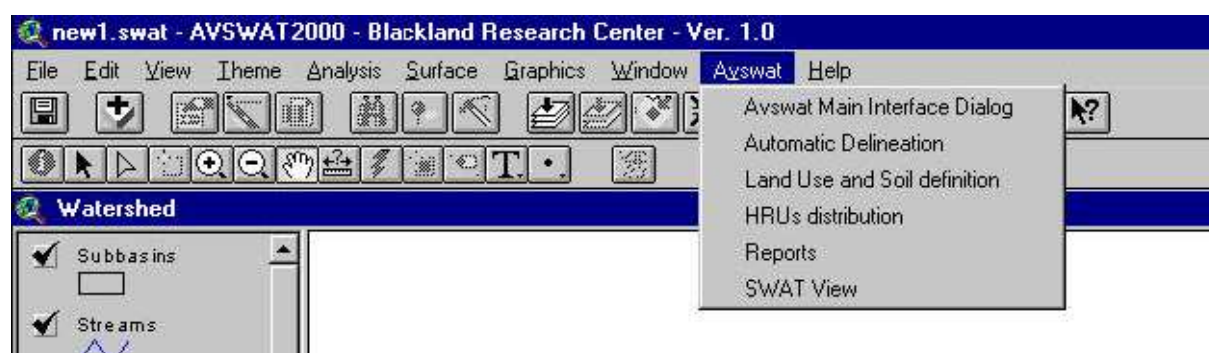


Figura 27: Sottomenù del Menù AVSWAT.

La prima operazione effettuata ha riguardato l’immissione del modello digitale del suolo a cui segue l’indicazione delle unità di misura e della proiezione geografica. Per questo studio l’unità di misura scelta è stata il metro e la proiezione geografica del dato, come sopra accennato, la UTM fuso 33.

Tutti gli altri dati georeferiti, devono essere immessi necessariamente con la stessa proiezione per essere accettati dal modello.

In seguito il modello consente l’utilizzazione di una “Mask” ovvero di un’area delimitante utile ad individuare la zona precisa su cui si intende concentrare le elaborazioni al fine di escludere le aree limitrofe che non ricadono nel bacino di simulazione. Questo consente di mitigare la complessità e la durata dei calcoli.

Questa opzione è stata utilizzata per incentrare ogni progetto ad una delle zone di elaborazione in cui è stata suddivisa l’Italia utilizzando i dati CCM. Le 9 zone individuate hanno consentito la creazione di altrettante *Mask* ognuna utilizzata per un progetto al quale è stato assegnato il nome della zona corrispondente.

Il modello consente inoltre, sempre in maniera opzionale, l'utilizzazione di un reticolo idrografico digitalizzato con il quale si "forza" matematicamente il processo automatico di delineazione del reticolo normalmente operato sulla base del DEM. Questa opzione di "Burn-in" è stata utilizzata nel presente studio (fig. 28).

Anche in questo caso sono stati utilizzati i dati CCM. In questo modo la delineazione dei bacini idrografici è stata operata su base reale ed è anche risultata congruente alla divisione del territorio in zone.

Una volta assegnato, il dem, la mask e il reticolo idrografico delineato per l'opzione di "Burn in" comincia la fase di pre-processamento del DEM alla fine del quale il modello assegna una soglia minima per la delineazione dei sottobacini. Per questo studio è stata sempre accettata la soglia suggerita dal modello.

I reticoli idrografici CCM sono stati utili anche alla delineazione precisa degli outlet principali dei bacini esaminati che sono assegnati nel passaggio successivo.

I bacini individuati da SWAT in questo modo corrispondono, in realtà, alla somma di tutti i bacini individuati all'interno di una Zona, questi ultimi sono raffigurati in SWAT come dei sottobacini (nel caso di bacini di piccole dimensioni) o come un insieme di sottobacini (in numero variabile a seconda dell'estensione).

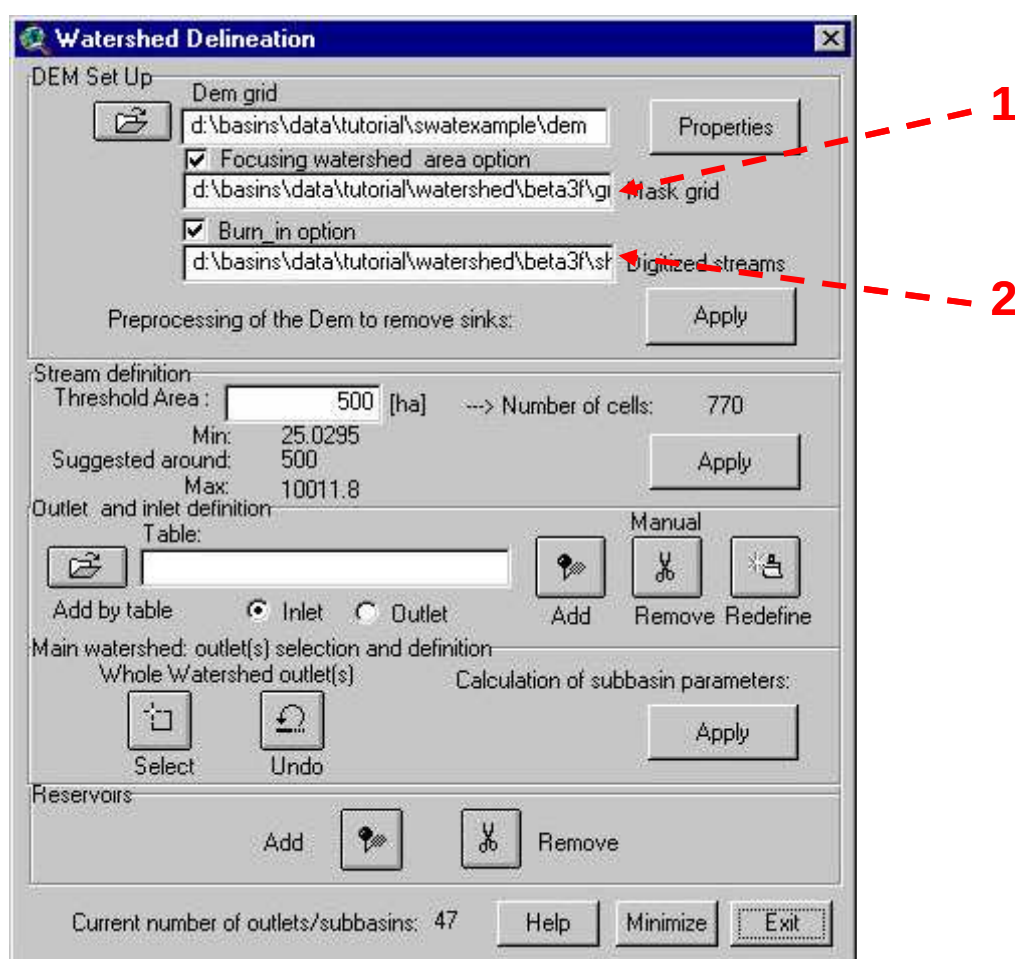


Figura 28: Finestra operativa per la delineazione del bacino idrografico e dei sottobacini. 1: immissione della Mask. 2: immissione del reticolo idrografico per l'opzione di Burn.in.

Una volta completata l'operazione di delineazione del bacino, si attiva il secondo sottomenù di Avswat che apre una finestra attraverso la quale si assegnano al bacino gli usi del suolo e i suoli. Questi dati vengono tra loro incrociati nella fase finale di overlay (figg. 29, 30).



Figura 29: Sottomenù per la delineazione degli usi del suolo e dei tipi di suolo.

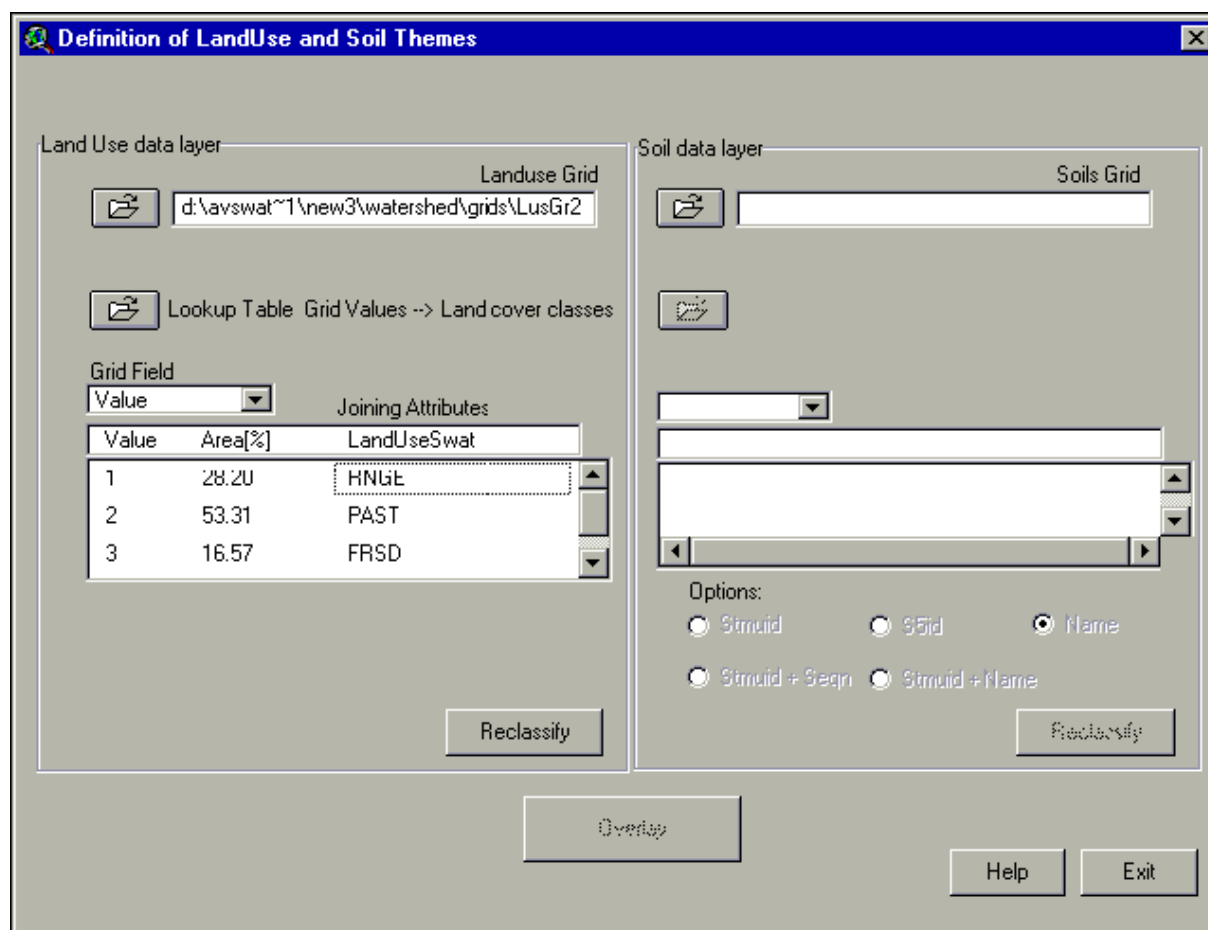


Figura 30: Finestra operativa per la delineazione degli uso-suolo e dei suoli.

L'overlay dei dati di cui sopra rapportato ai sottobacini delineati nella fase precedente rende possibile la definizione delle HRU (capitolo 4) che avviene attraverso una apposita schermata operativa (fig. 31).

In questa fase è possibile scegliere il criterio di distribuzione delle HRU: possono essere considerati solo l'uso del suolo e il suolo dominante all'interno di ogni sottobacino, in modo da creare un'unica HRU per sottobacino, oppure possono essere stabilite delle soglie minime di accettazione per le classi di uso-suolo o di suolo in modo da creare un numero variabile di HRU per sottobacino dipendente dal livello soglia scelto.

In questo studio si è optato per l'opzione "dominante".

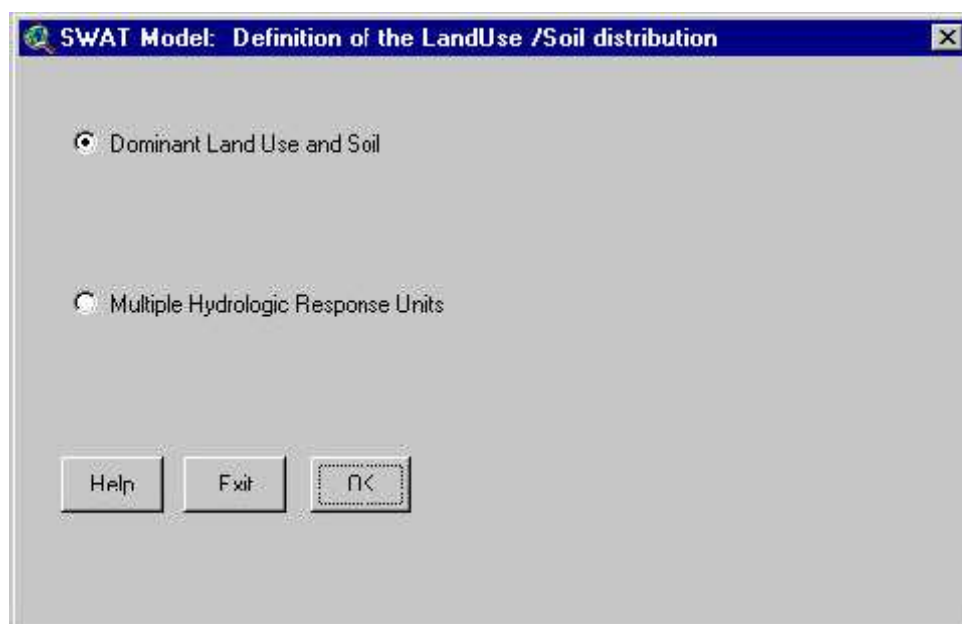


Figura 31: Menù e finestra operativa della distribuzione delle HRU

Una volta completata la distribuzione delle HRU, il programma crea una serie di reports consultabili sempre dall'interfaccia gis e attiva la SWAT view dove vengono creati tutti i file di input per la simulazione elencati nel menù *Input* (fig. 32).

Il primo passaggio richiesto è l'assegnazione dei dati climatici. Nel menù input questo è possibile con il primo sottomenù *Weather Station* che apre una finestra attraverso la quale si attribuiscono le stazioni climatiche al bacino e i dati afferenti (fig. 33).

In questa fase sono stati assegnati al bacino i dati di tutte le celle MARS che intersecavano l'area delimitata dalla *mask* della zona corrispondente.

Nella finestra operativa per l'attribuzione dei dati climatici il modello dà anche la possibilità di assegnare le stazioni per il "Weather Generator" (capitolo 4) che elabora su basi statistiche i dati eventualmente mancanti nelle serie storiche.

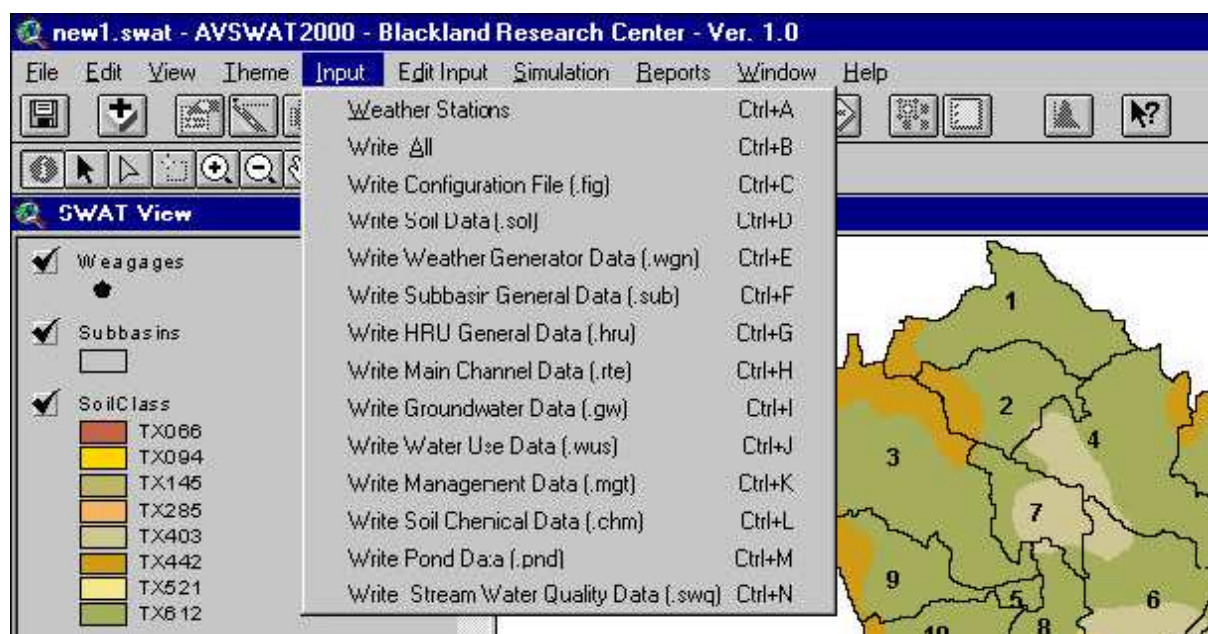


Figura 32: Menù input

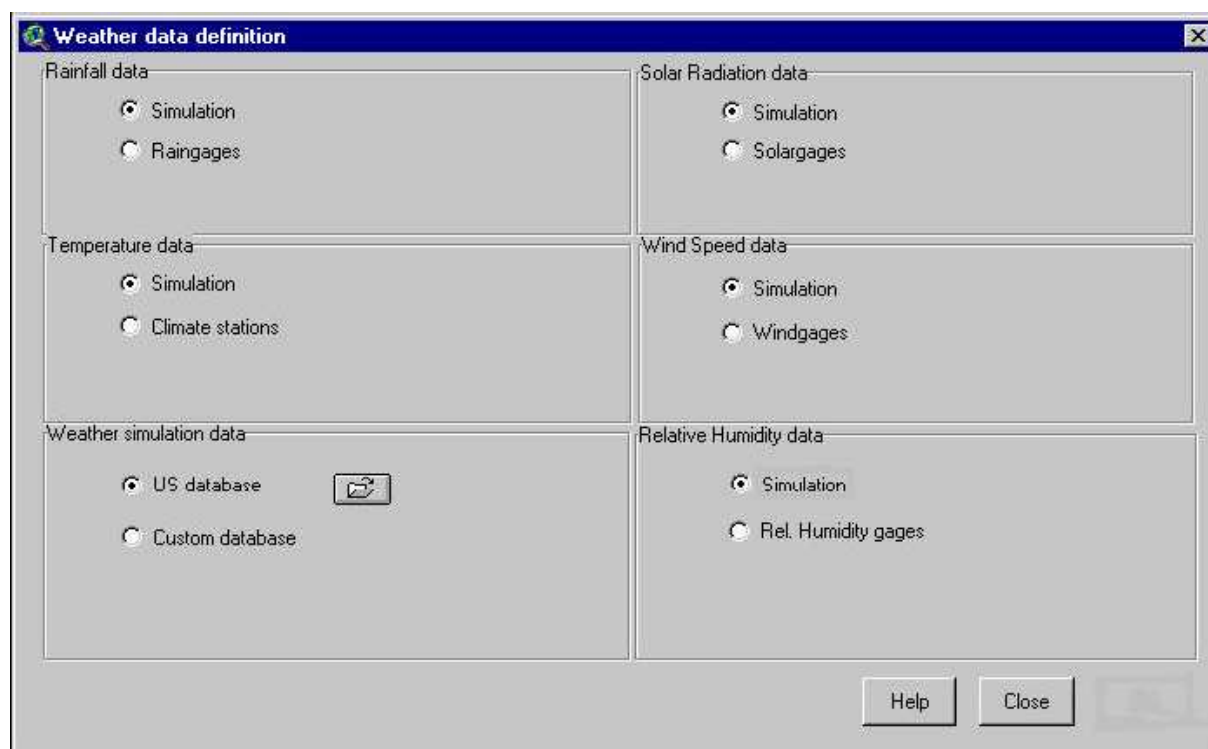


Figura 33: Assegnazione dei dati climatici

Nel presente studio, per i dati climatici MARS, non è stato necessario utilizzare il Weather Generator e di conseguenza non sono stati creati i necessari file WGN, in quanto si disponeva di serie storiche complete essendo state ricavate con tecniche di interpolazione.

Inoltre per questo studio si è scelto di calcolare l'evapotraspirazione potenziale con la formula di Hargreaves in quanto alla scala non è stato possibile esaminare il territorio ad un livello di dettaglio tale che il calcolo dell'evapotraspirazione con il metodo di Penman-Montheit fosse risultato significativo. Di conseguenza non è stato obbligatorio ripristinare i dati di umidità relativa non presenti nel database MARS con il simulatore.

Una volta assegnate le stazioni climatiche il modello è in grado di scrivere tutti i dati di input attraverso il comando *Write all*, che crea tutti i file di input oppure attraverso tutti gli altri comandi elencati nello stesso menù che creano separatamente le diverse categorie di input (fig. 32).

In seguito i file creati possono essere editati dal menù *Edit Input* per inserire ulteriori informazioni utili alla simulazione (fig. 34).

In questo studio, attraverso questo menù, sono stati inseriti i dati riguardanti le lavorazioni agrarie e quelli sull'uso irriguo come scritto nel paragrafo "i" del presente capitolo.

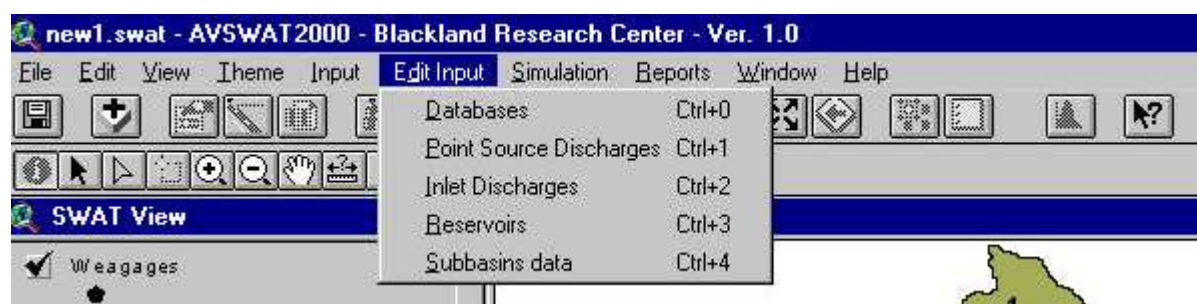


Figura 34: Menù Edit Input

I dati sulle pratiche agricole e sull'uso irriguo vengono assegnati per sottobacino in SWAT andando a modificare rispettivamente i file .wgn e .hru (fig. 35).

Per l'assegnazione delle colture dominanti al sottobacino sono stati utilizzati anche i dati del "5° Censimento Generale dell'Agricoltura" nella maniera illustrata al paragrafo "h", mentre per i dati di irrigazione è stata fatta una assunzione: per i sottobacini ricadenti a cavallo dell'asta fluviale si è presupposta la captazione dell'acqua a scopo irriguo da fiume, per gli altri da acquifero superficiale.

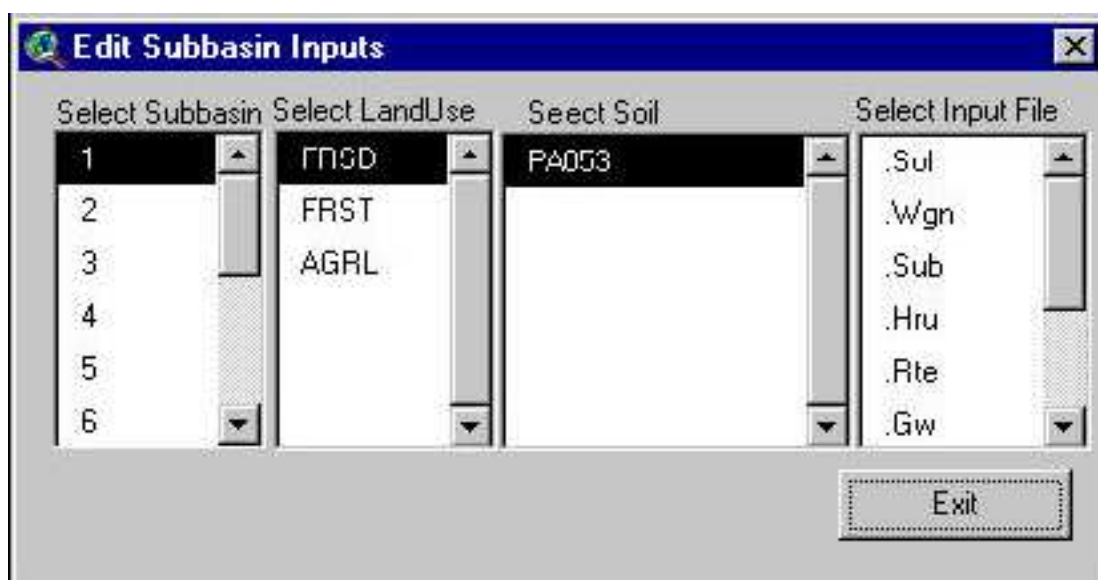


Figura 35: Finestra operativa per l'editing dei sottobacini.

Per il calcolo del ciclo colturale e l'assegnazione delle lavorazioni agronomiche si è optato per l'uso delle unità di calore (Heat Units, capitolo 4) (fig. 36). Anche in questo caso la scelta è stata dettata dalla grande scala, non idonea alla realizzazione del dettaglio necessario all'uso delle date, soprattutto in una realtà eterogenea come quella italiana.

Una volta completate queste operazioni, si è proceduto alla simulazione dal menù *Simulation* dove si possono avviare i run e leggere i risultati. L'interfaccia anche per il run e il setup del modello che apre una finestra nella quale si settano le diverse opzioni di simulazione (fig. 37).

Mgt: 5_FRSD_PA022

Management Data:

Load Scenario Save Scenario

NCRP
No Crop Curently Growing

BIO_MIN 0.00 CN2 66.00 Curve
BIDMIX 0.20 USLE_P 1.00

☒ Schedule by Date ☐ Schedule by Heat Units

Year	Operation	Crop	Month	Day
1	Plant/begin. growing season	CORN	May	3
1	Fertilizer application	CORN	June	18
1	Pesticide application	CORN	July	8
1	Harvest and kill operation	CORN	September	1
2	Tillage operation		January	1
2	Plant/begin. growing season	SOYB	March	1

Add Year
Delete Year
Add Operation
Delete Operation
Edit Operation

Help Cancel OK

Figura 36: Assegnazione delle pratiche culturali

Set Up and Run SWAT model simulation

Period of simulation:

Starting date: January 1 1995
Ending date: January 1 1998

Rainfall/Runoff/ROUTING: Daily rain /CN / Daily

Rainfall distribution:
☒ Skewed normal
☐ Mixed exponential

Potential ET method:
☒ Priestley-Taylor method
☐ Penman-Monteith method
☐ Hargreaves method
☐ Read in

Crack flow:
☒ Not active
☐ Active

Channel water routing method:
☒ Variable Storage
☐ Muskingum

Channel dimensions:
☒ Not Active
☐ Active

Stream Water Quality Processes:
☐ Not Active
☒ Active

Lake Water Quality Processes:
☐ Not Active
☒ Active

Printout frequency:
☒ Daily
☐ Monthly
☐ Yearly

Routing Pesticide: A-Rest

Watershed parameters:
Basin Input File: Bsn
General Water Quality Input File: Wwq

Help Exit Setup SWAT Run

Figura 37: Opzioni di simulazione e setup.

Occorre infatti definire oltre il metodo del calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, già citato precedentemente, il periodo di simulazione, la scala di tempo dei dati di pioggia, il metodo di calcolo dei deflussi, l'intervallo temporale di calcolo del routing e la frequenza di elaborazione degli output (giornaliera, mensile o annuale).

Per questo studio sono stati utilizzati dati giornalieri di pioggia, il metodo del Curve Number per il calcolo del runoff e gli output a scala giornaliera, il routing con il metodo Variable Storage.

Terminata la simulazione, in assenza di problemi, l'interfaccia rilascia un messaggio di avvenuta simulazione (fig. 38)



Figura 38: Messaggio di completamento della simulazione

Dall'interfaccia stessa è poi possibile esaminare gli output attraverso reports, tavole di dati ed anche grafici. (fig. 39)



Figura 39: Menù "Reports"

5.4 Calibrazione

La calibrazione del modello è stata eseguita per un bacino campione in ogni zona ad eccezione della zona 1 corrispondente alla Sardegna per mancanza di dati di portata misurata negli anni simulati. I bacini campione sono stati scelti anch'essi sulla base della disponibilità dei dati di portata misurata e come secondo parametro sulla maggiore estensione del bacino.

Infatti data la tipologia dei dati di input usati in questo studio è stata ritenuta più significativa una calibrazione eseguita su bacini idrografici di grossa estensione .

L'interfaccia è dotata di un tool apposito per la calibrazione manuale il "Calibration Tool". Questo permette di operare sui parametri normalmente più sensibili che possono essere modificati sia in maniera percentuale che assegnando nuovi valori.

Le modifiche, inoltre, possono essere assegnate a tutto il bacino o solo a determinati sottobacini o usi del suolo (fig. 40).

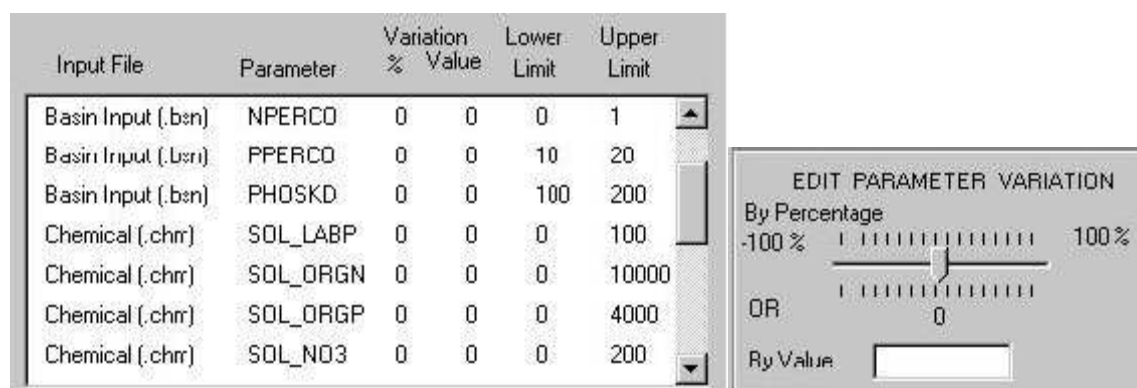


Figura 40: Finestra operativa del "Calibration Tool"

Una volta assegnate le modifiche, il programma riscrive tutti gli output sulla base di queste e fa partire un nuovo run. I risultati insieme ai nuovi file di input sono raccolti in una cartella separata per consentire la graficazione e il confronto con gli output precedenti e i dati misurati per poi proseguire con ulteriori modifiche fino al raggiungimento di risultati accettabili ove possibile.

5.5 Sensitivity analysis e autocalibrazione

Come elaborazione finale è stata utilizzata anche la versione AVSWAT-X (Extendable), interfaccia GIS successiva alla AVSWAT-2000 nella quale è possibile attivare *tool* aggiuntivi, per sperimentare la funzionalità dei moduli di “Analisi di Sensitività” e di “Autocalibrazione” su dei bacini di prova.

Questa versione di ArcView SWAT è stata definita extendable proprio in ragione del fatto che è stata ampliata con alcuni moduli aggiuntivi che possono essere attivati dal comando *Extention* del menù *Avswat* che apre una finestra operativa apposita (fig. 41).

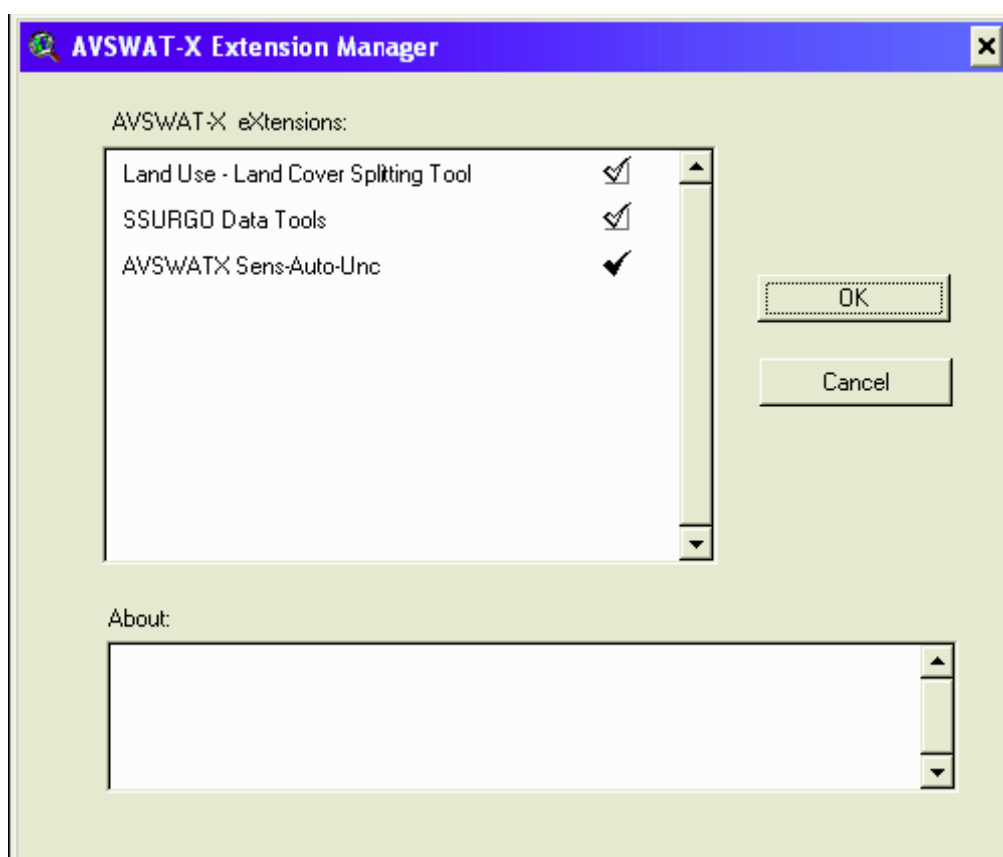


Figura 41: Moduli aggiuntivi di AVSWAT-X

Attivando l'estensione dell'analisi di sensitività si apre una finestra nella quale è possibile settare se concentrare le elaborazioni sui flussi, sui cariche o su entrambe ed, inoltre, scegliere se utilizzare un dataset di dati osservati per orientare l'analisi (fig. 42).

Per questa sperimentazione è stato scelto di operare solo sul flusso e di utilizzare un set di dati osservati presi dalla stazione di riferimento per la calibrazione manuale.

Le prime sei variabili risultate come più sensibili dall'analisi di sensitività sono state considerate per la autocalibrazione.

Per l'autocalibrazione è possibile scegliere se operare sull'intero bacino idrografico o su uno o più sottobacini, per questo studio l'autocalibrazione è stata eseguita solo sul sottobacino di chiusura utilizzando un corrispettivo file di dati osservati (fig. 43).

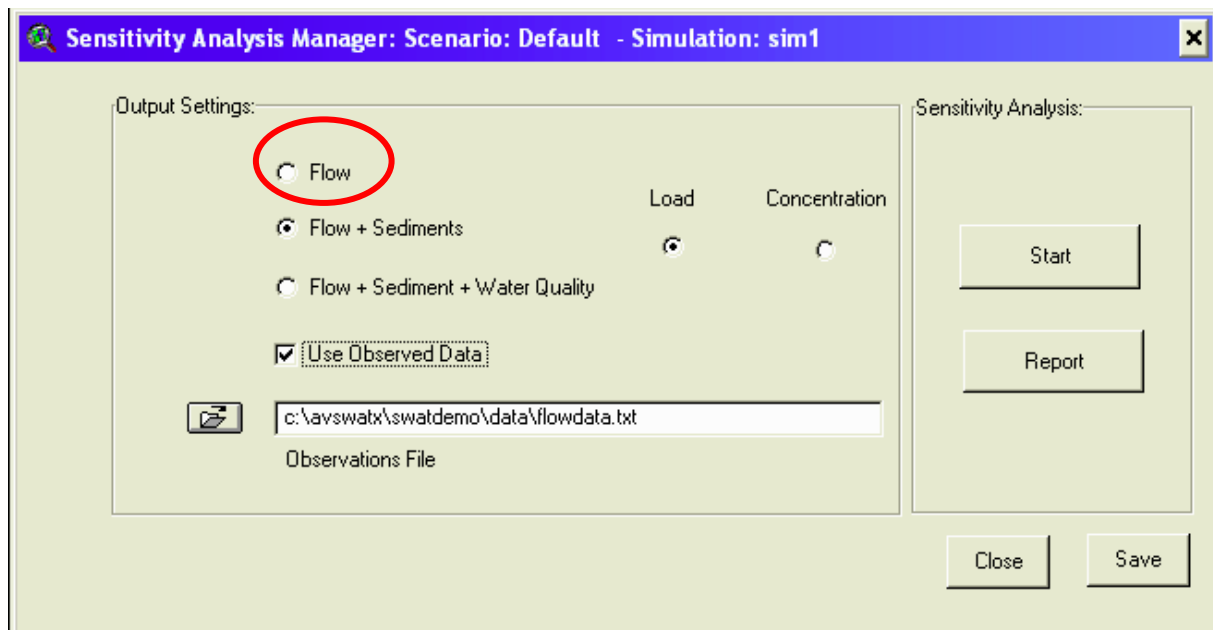


Figura 42: Finestra operativa per l'analisi di sensitività

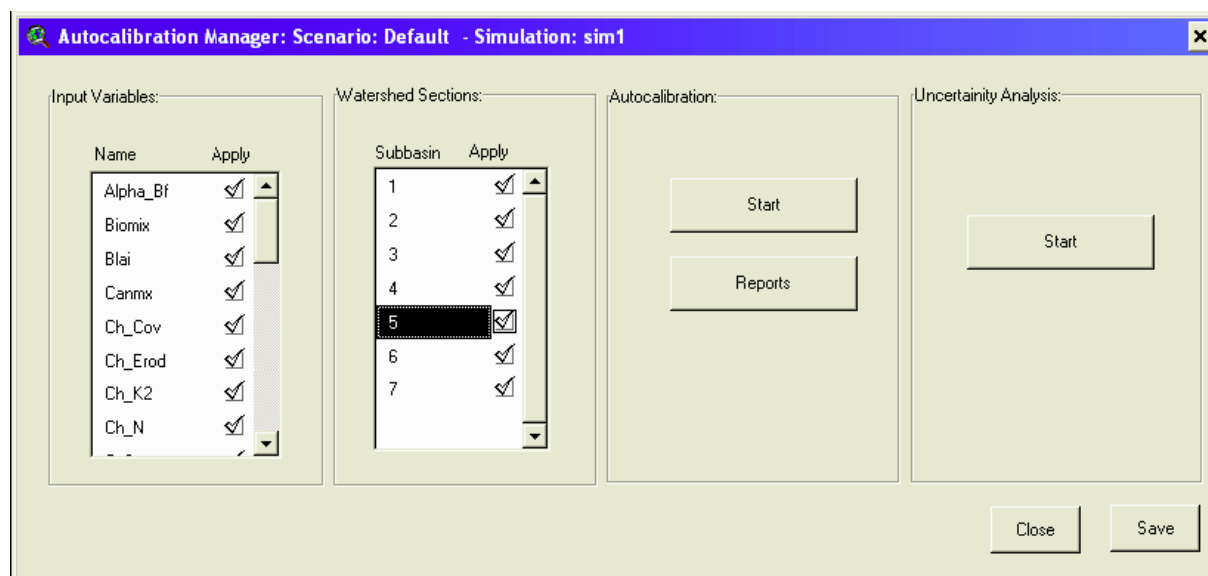


Figura 43: Finestra operativa per l'autocalibrazione.

CAPITOLO 6: RISULTATI

6.1 L'individuazione dei bacini idrografici

Il modello SWAT è stato in grado di simulare la gran parte dei bacini idrografici digitalizzati nel progetto CCM individuandoli con buona approssimazione (fig. 44). Per ogni zona di simulazione e per tutto il territorio italiano è stata calcolata la percentuale di territorio analizzata dal modello, ovvero quella ricadente nei bacini idrografici simulati. E' stato così stimato che SWAT ha simulato il 71,63% del territorio italiano (tab. 8).

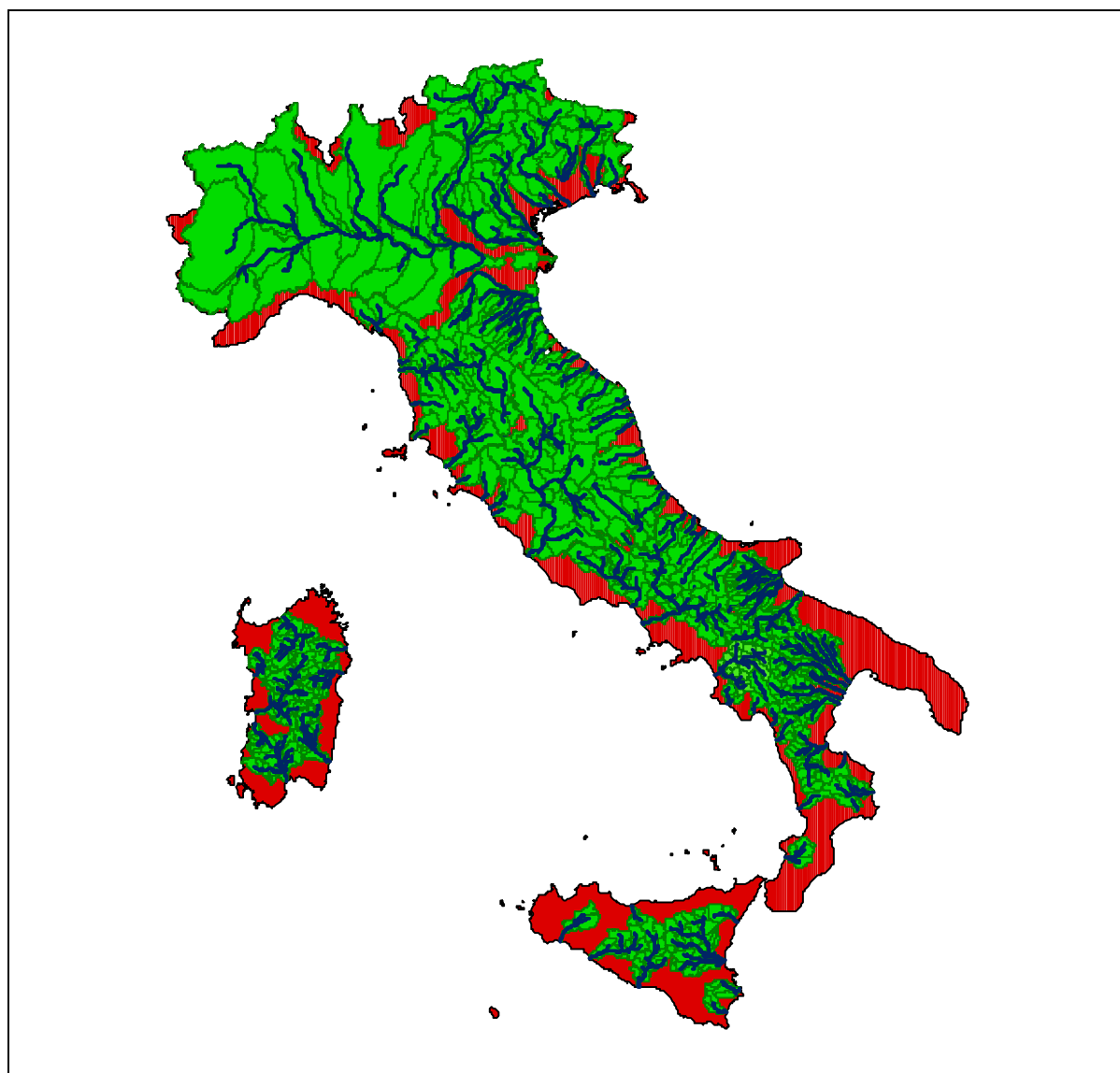


Figura 44: Bacini idrografici e sottobacini simulati dal modello SWAT

Questo dipende in particolar modo dal modello digitale del suolo utilizzato cioè dalla sua risoluzione. Disponendo di un DEM più accurato, infatti, è possibile ricoprire una maggiore percentuale di territorio ed incorporare nelle analisi anche i bacini idrografici minori che sono esclusi a questa scala.

Di seguito vengono illustrati i risultati ottenuti per l'individuazione dei bacini idrografici per ogni zona di simulazione: ogni immagine è accompagnata da una tabella riassuntiva (figg. 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53) (tabb. 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28).

I risultati sono presentati confrontando i bacini digitalizzati nel progetto CCM (sulla destra) con quelli individuati dal modello SWAT (sulla sinistra).

Per questi ultimi sono riportati i sottobacini e le aste principali dei reticoli idrografici.

Tabella 20: Totale dei bacini esaminati e simulati, dei sottobacini individuati e territorio italiano simulato in percentuale.

Zona	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini	Area zona (km ²)	Area simulata (km ²)	%
Z1	9	8	122	24336,61	13651,01	56,09
Z2	8	8	80	25976,80	10912,44	42,01
Z3	3	1	27	72762,09	62238,48	85,54
Z4	10	9	56	36683,42	30209,90	82,35
Z5	15	13	81	32474,26	26564,52	81,80
Z6	19	18	54	37987,64	33100,60	87,14
Z7	10	9	57	23600,72	15888,42	67,32
Z8	4	4	99	22781,26	9466,33	41,55
Z9	16	15	139	26203,78	14878,80	56,78
Italia	94	86	715	302806,57	216910,50	71,63

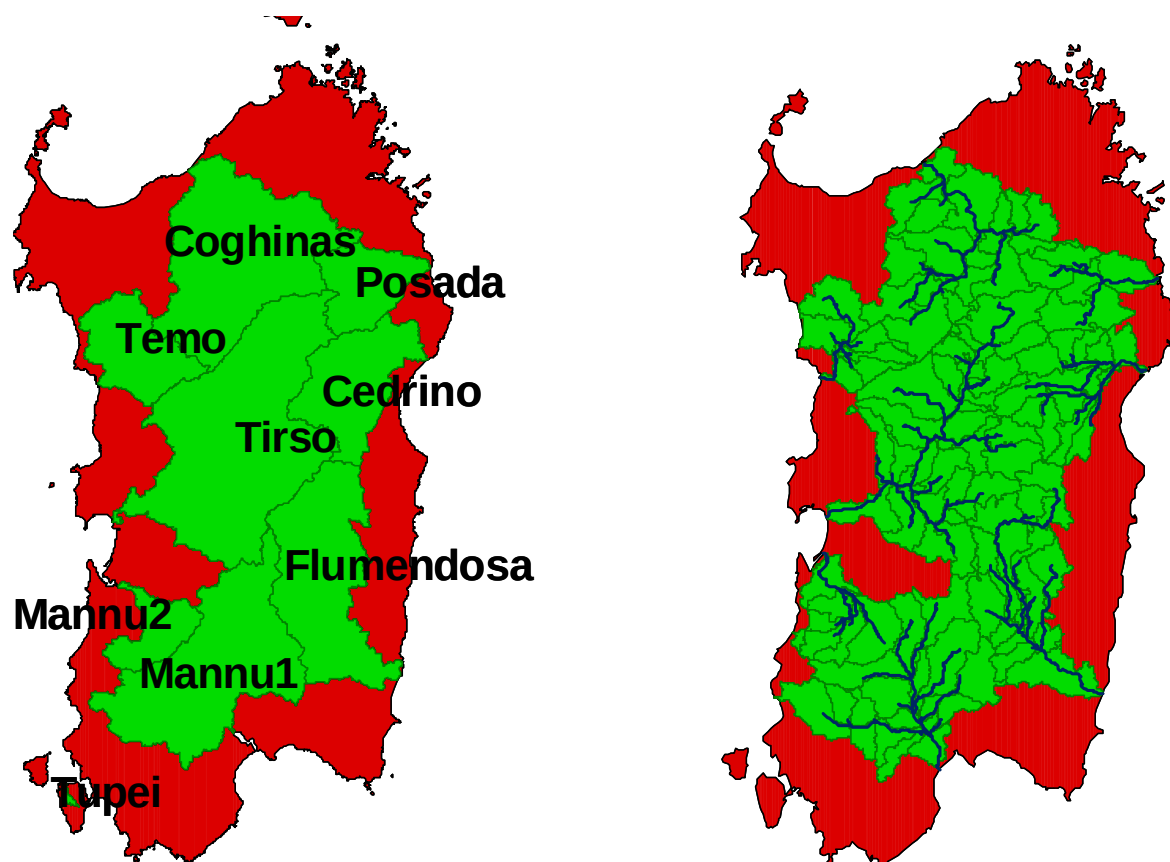


Figura 45: Zona 1. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 21: Dati riassuntivi zona 1

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 1	Cedrino	Cedrino	13
	Coghinas	Coghinas	21
	Flumendosa	Flumendosa	15
	Mannu1	Mannu1	21
	Mannu2	Mannu2	7
	Posada	Posada	5
	Temo	Temo	9
	Tirso	Tirso	31
	Tupei		
TOT	9	8	122

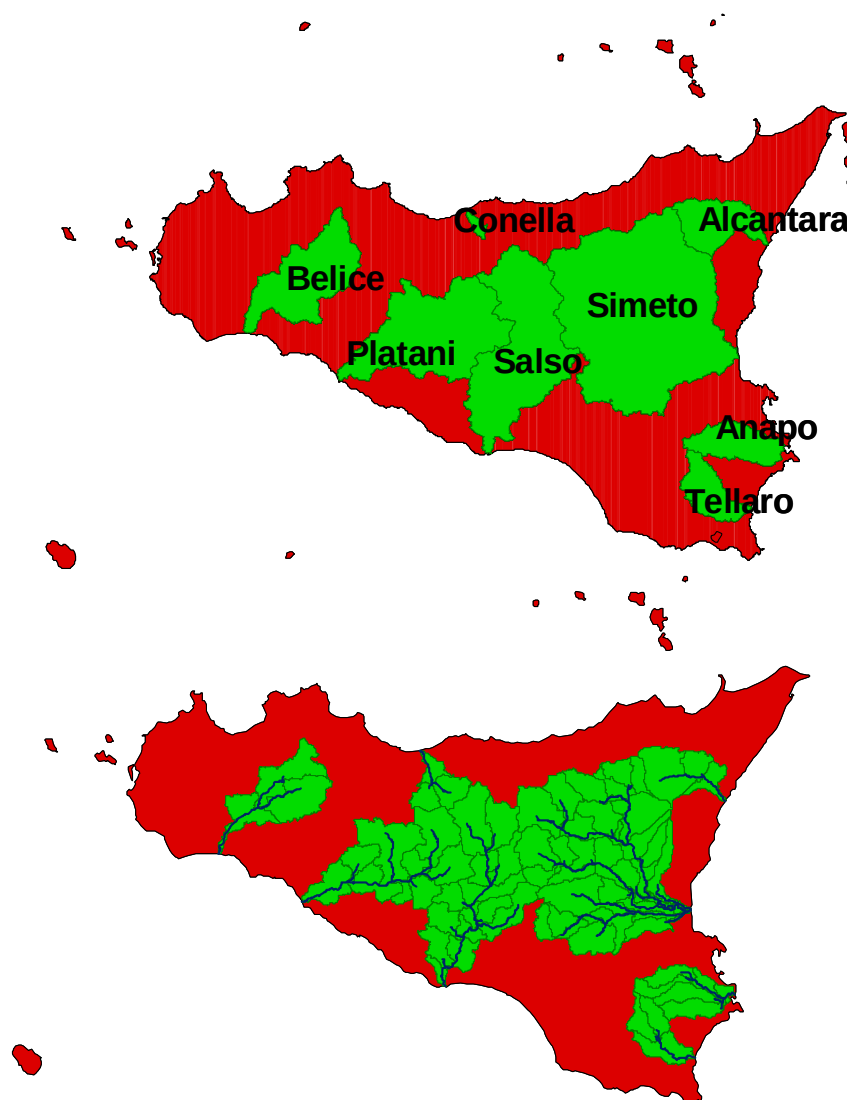


Figura 46: Zona 2. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 22: Dati riassuntivi zona 2

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 2	Alcantara	Alcantara	3
	Anapo	Anapo	7
	Belice	Belice	3
	Conella	Conella	3
	Platani	Platani	9
	Salso	Salso	15
	Simeto	Simeto	37
	Tellaro	Tellaro	3
TOT	8	8	80

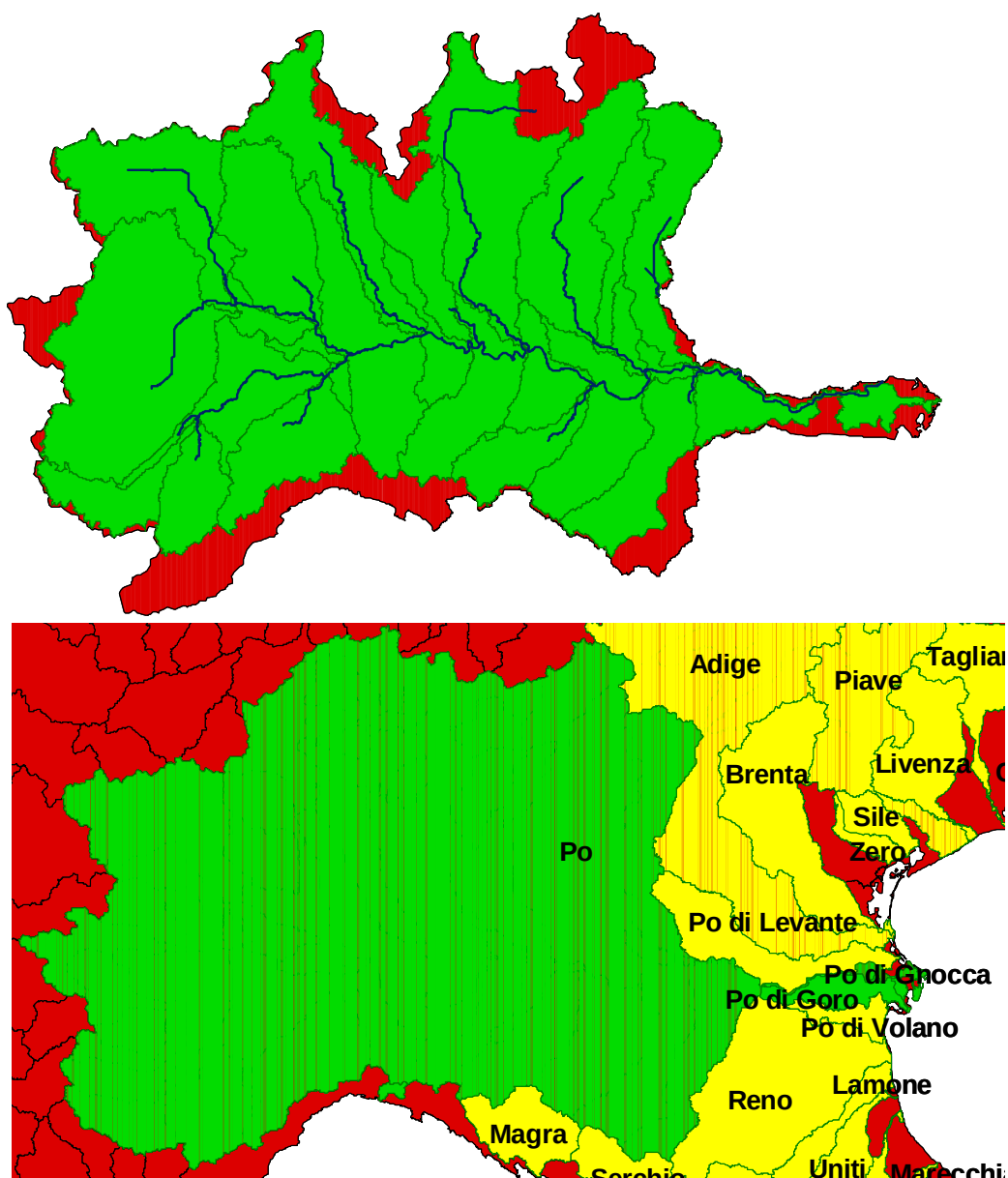


Figura 47: Zona 3. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 23: Dati riassuntivi zona 3

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 3	Po	Po	27
	Po di Gnocca		
	Po di Goro		
TOT	3	1	27

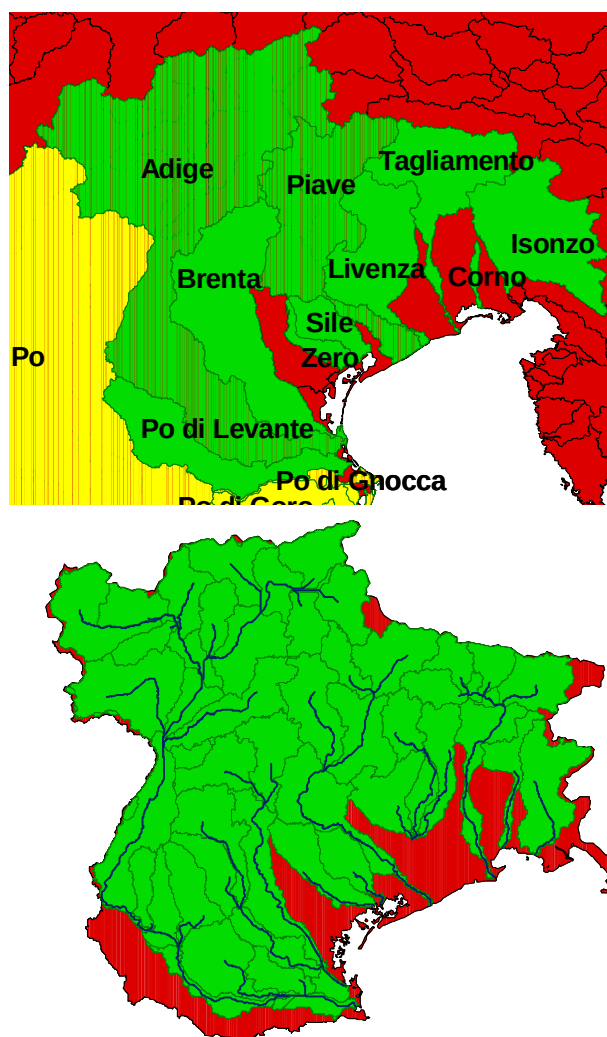


Figura 48: Zona 4. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 24: Dati riassuntivi zona 4.

ZONA 4	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
	Adige	Adige	29
	Brenta	Brenta	7
	Corno	Corno	1
	Isonzo	Isonzo	1
	Livenza	Livenza	4
	Piave	Piave	5
	Po di Levante		
	Sile	Sile	1
	Tagliamento	Tagliamento	7
	Zero	Zero	1
TOT	10	9	56

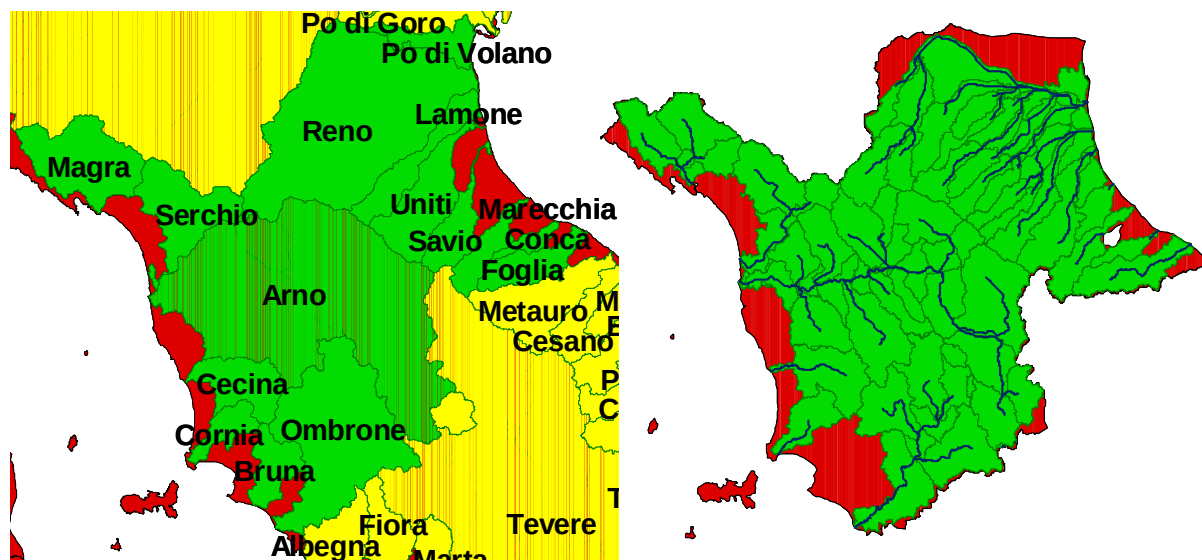


Figura 49: Zona 5. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 25: Dati riassuntivi zona 5

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 5	Arno	Arno	25
	Bruna		
	Cecina	Cecina	1
	Conca	Conca	1
	Cornia	Cornia	1
	Foglia	Foglia	1
	Lamone	Lamone	5
	Magra	Magra	5
	Marecchia	Marecchia	1
	Ombrone	Ombrone	7
	Po di Volano		
	Reno	Reno	22
	Savio	Savio	3
	Serchio	Serchio	4
	Uniti	Uniti	5
TOT	15	13	81

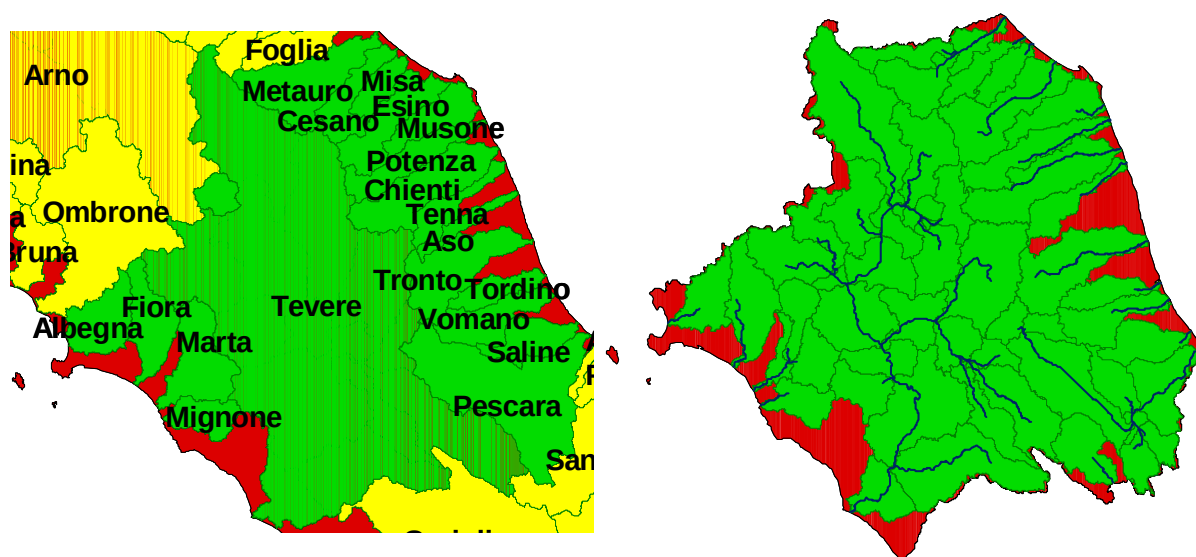


Figura 50: Zona 6. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 26: Dati riassuntivi zona 6

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 6	Albegna	Albegna	1
	Aso		
	Cesano	Cesano	1
	Chienti	Chienti	1
	Esino	Esino	1
	Fiora	Fiora	1
	Marta	Marta	3
	Metauro	Metauro	3
	Mignone	Mignone	1
	Misa	Misa	1
	Musone	Musone	1
	Pescara	Pescara	9
	Potenza	Potenza	1
	Saline	Saline	1
	Tenna	Tenna	1
	Tevere	Tevere	25
	Tordino	Tordino	1
	Tronto	Tronto	1
	Vomano	Vomano	1
TOT	19	18	54

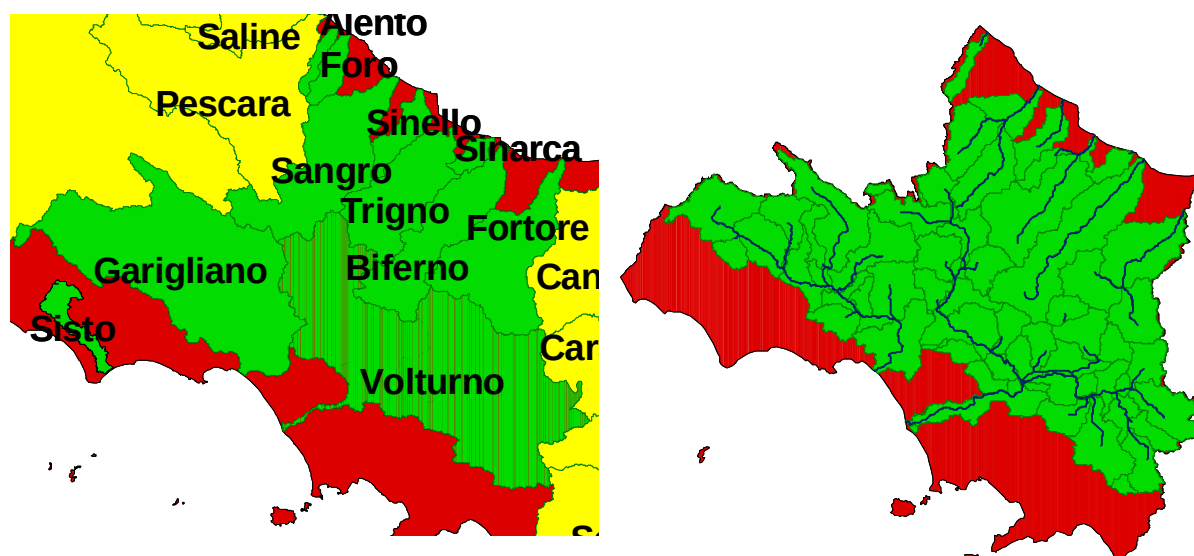


Figura 51: Zona 7. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 27: Dati riassuntivi zona 7

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 7	Biferno	Biferno	1
	Foro	Foro	1
	Fortore	Fortore	3
	Garigliano	Garigliano	15
	Sangro	Sangro	3
	Sinarca	Sinarca	1
	Sinello	Sinello	1
	Sisto		
	Trigno	Trigno	3
	Volturmo	Volturmo	29
TOT	10	9	57

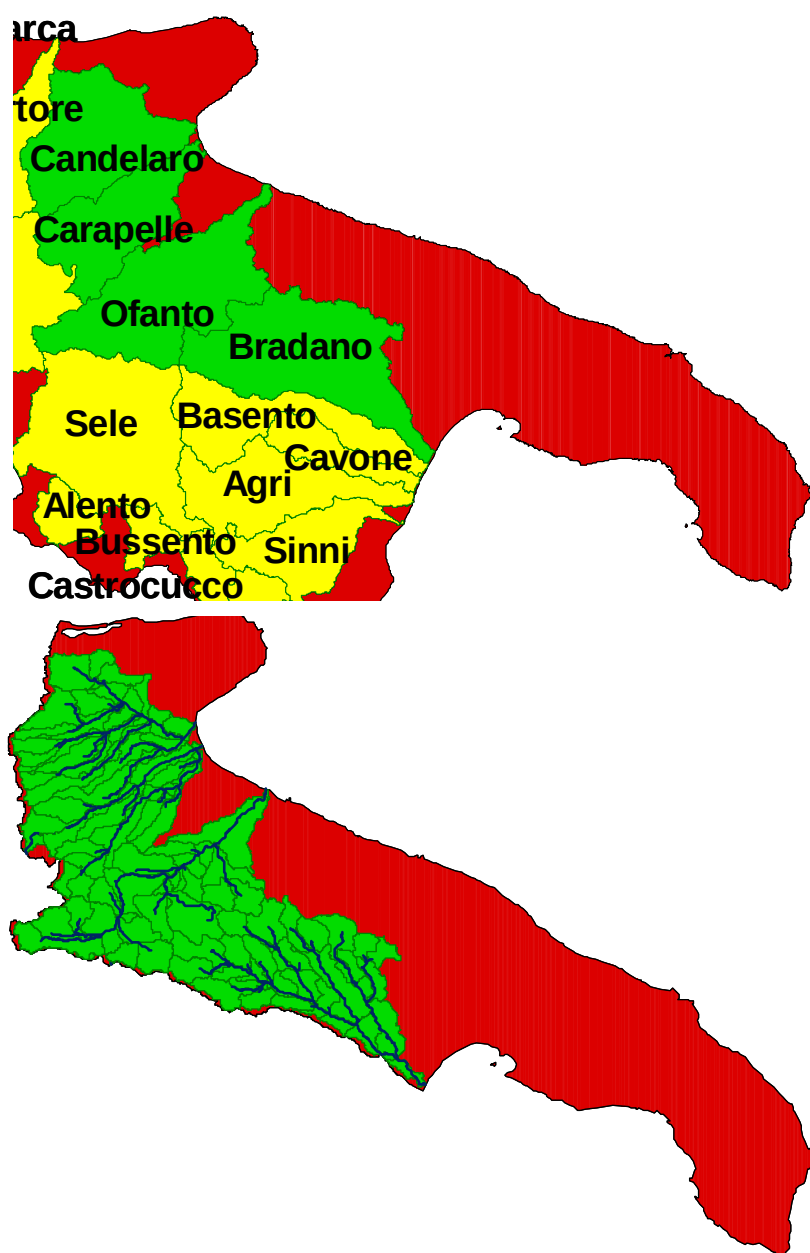


Figura 52: Zona 8. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 28: Dati riassuntivi zona 8

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 8	Bradano	Bradano	34
	Candelaro	Candelaro	25
	Carapelle	Carapelle	15
	Ofanto	Ofanto	25
TOT	4	4	99

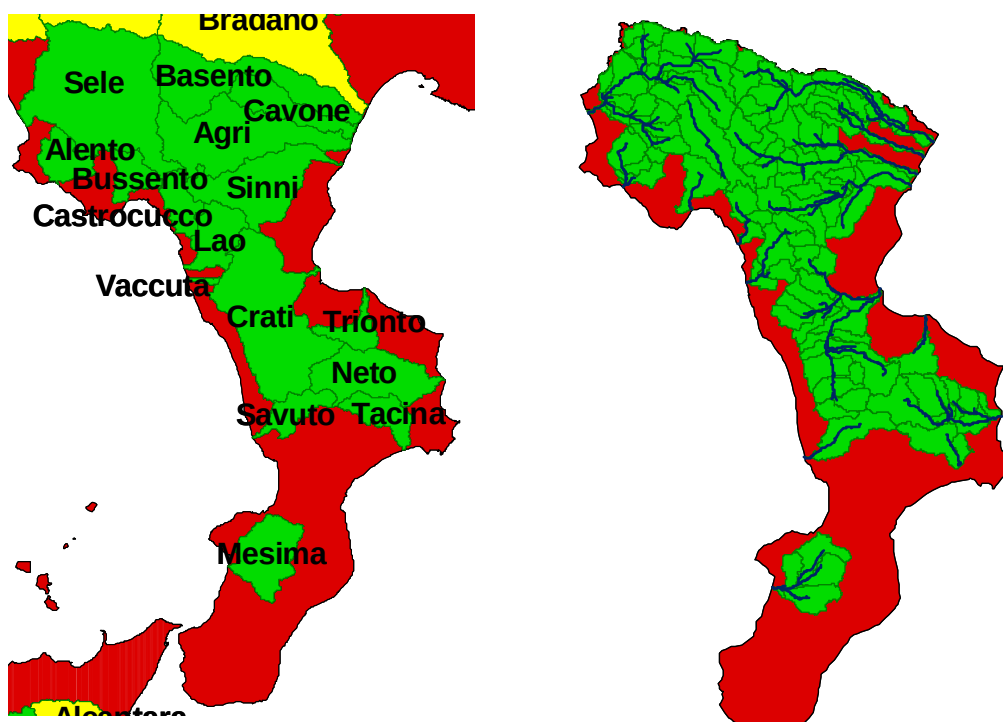


Figura 53: Zona 8. Bacini CCM e bacini simulati dal modello SWAT con rispettivi sottobacini e reticoli idrografici.

Tabella 29: Dati riassuntivi zona 8

	Bacini CCM	Bacini SWAT	Sottobacini
ZONA 9	Agri	Agri	15
	Alento	Alento	5
	Basento	Basento	13
	Bussento	Bussento	1
	Castrocuoco	Castrocuoco	3
	Cavone	Cavone	5
	Crati	Crati	23
	Lao	Lao	5
	Mesima	Mesima	7
	Neto	Neto	9
	Savuto	Savuto	1
	Sele	Sele	36
	Sinni	Sinni	13
	Tacina	Tacina	2
	Trionto	Trionto	1
	Vaccuta		
TOT	16	15	139

6.2 Il confronto tra dati MARS e dati misurati

Di seguito sono riportati per ogni zona nella quale sono stati avviati i processi di calibrazione matematica gli andamenti e le differenze per due anni di dati di precipitazione media giornaliera, 1986 e 1987, ovvero i primi due anni della serie storica utilizzata nelle simulazioni (fig. 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61).

Le stazioni pluviometriche scelte sono state confrontate con i dati della cella MARS in cui ricadono geograficamente scegliendole il più possibile vicine al centroide di quest'ultima.

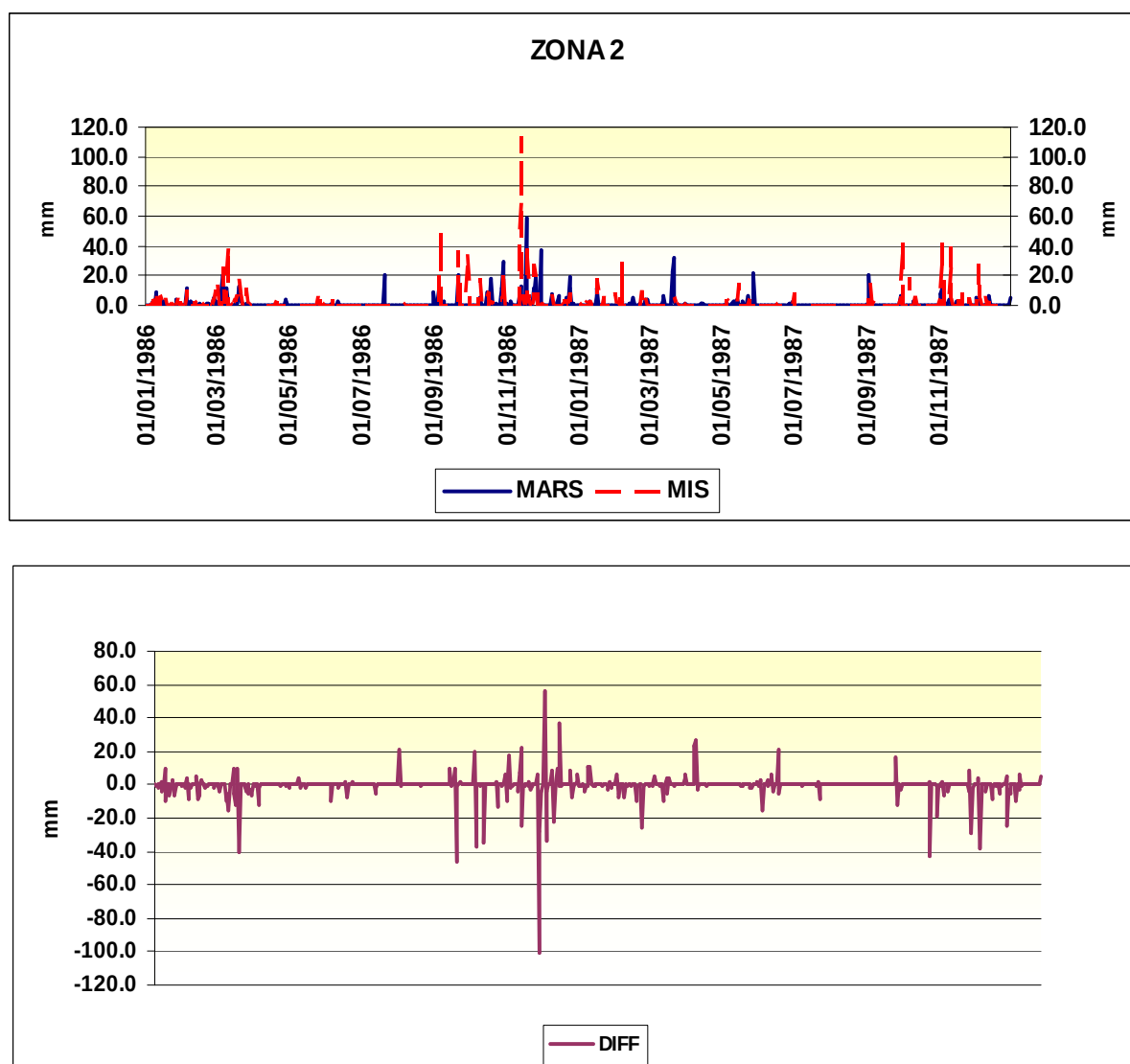


Figura 54: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 2 e graficazione delle differenze.

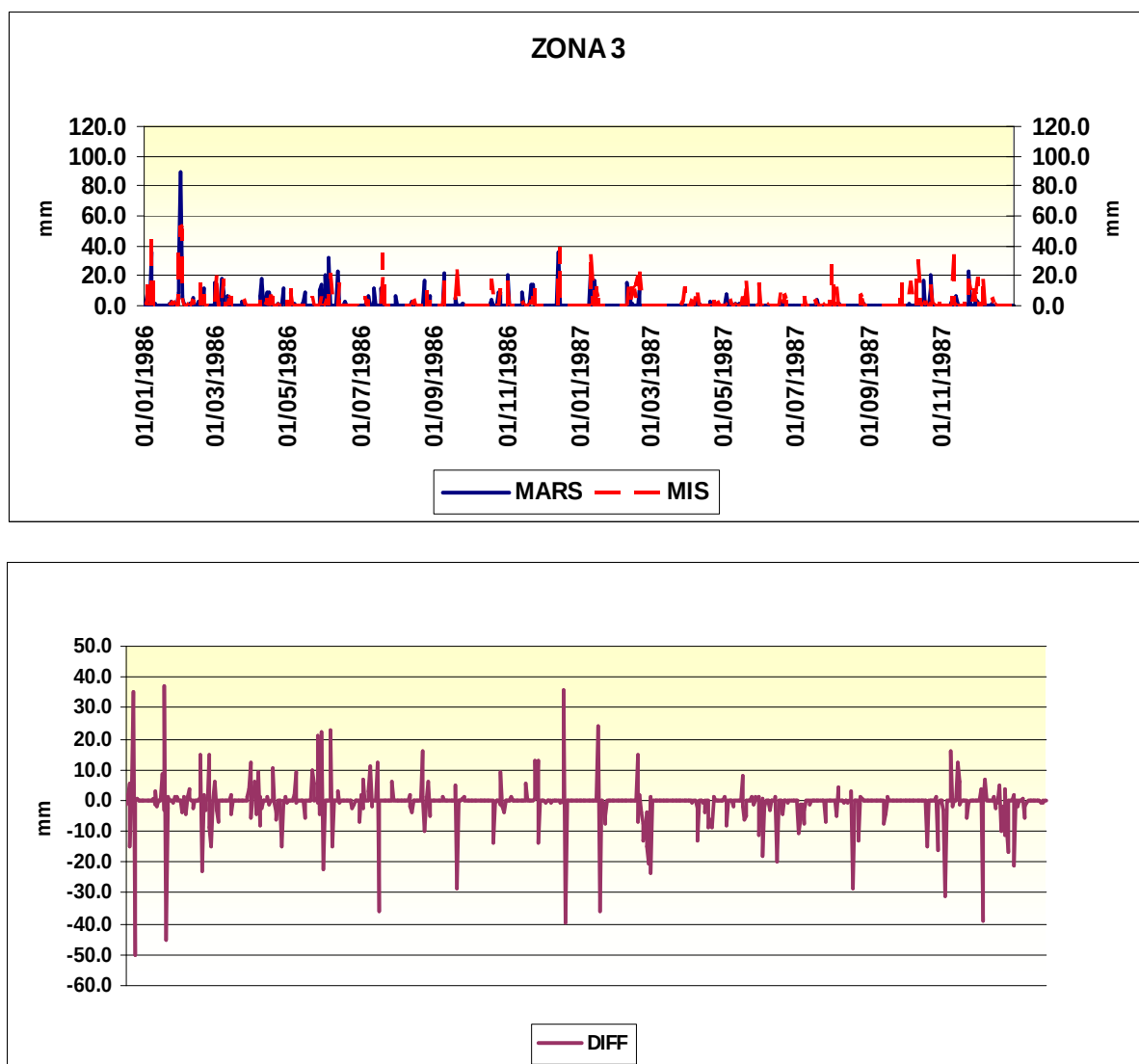


Figura 55: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 3 e graficazione delle differenze.

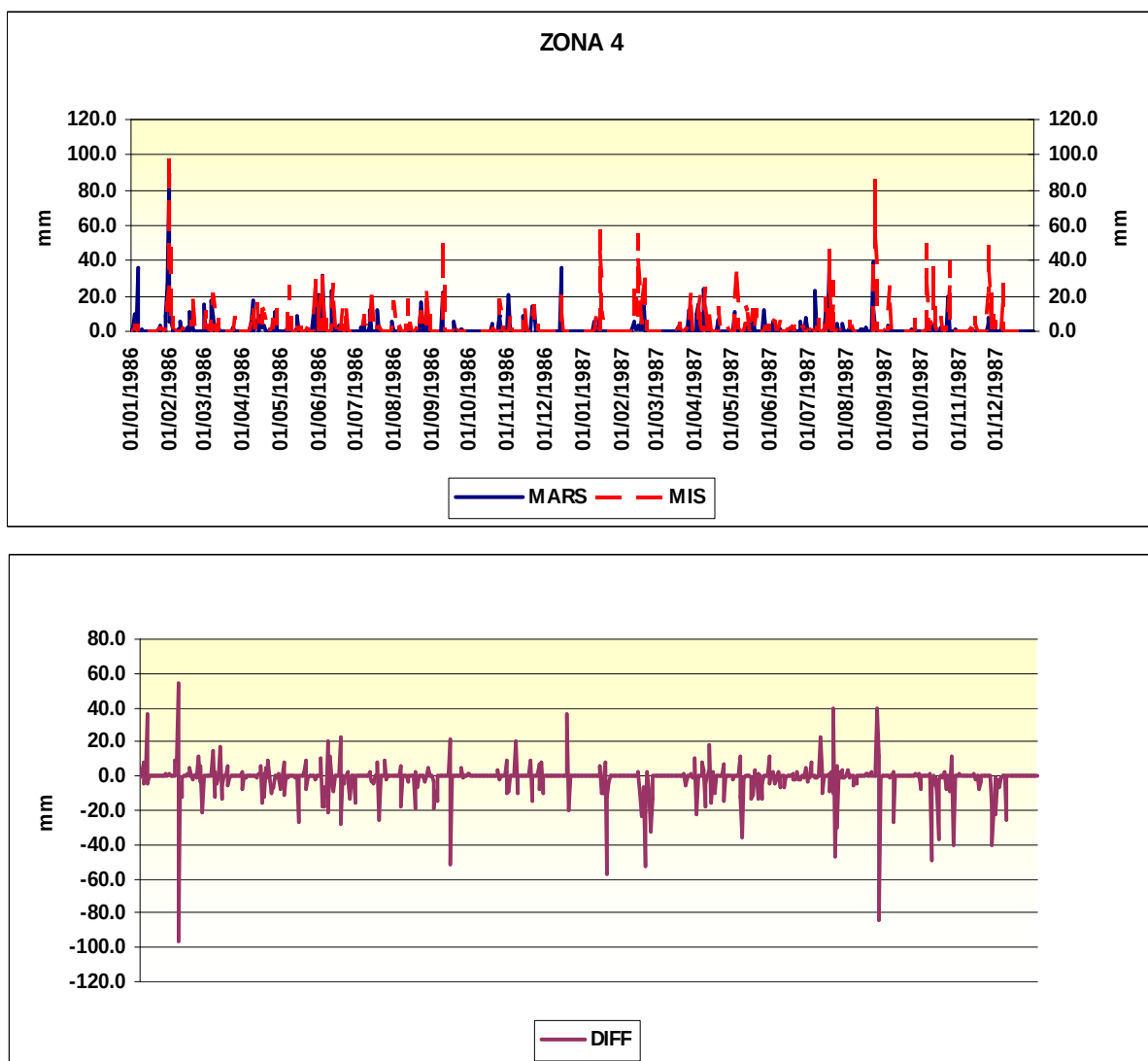


Figura 56: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 4 e graficazione delle differenze.

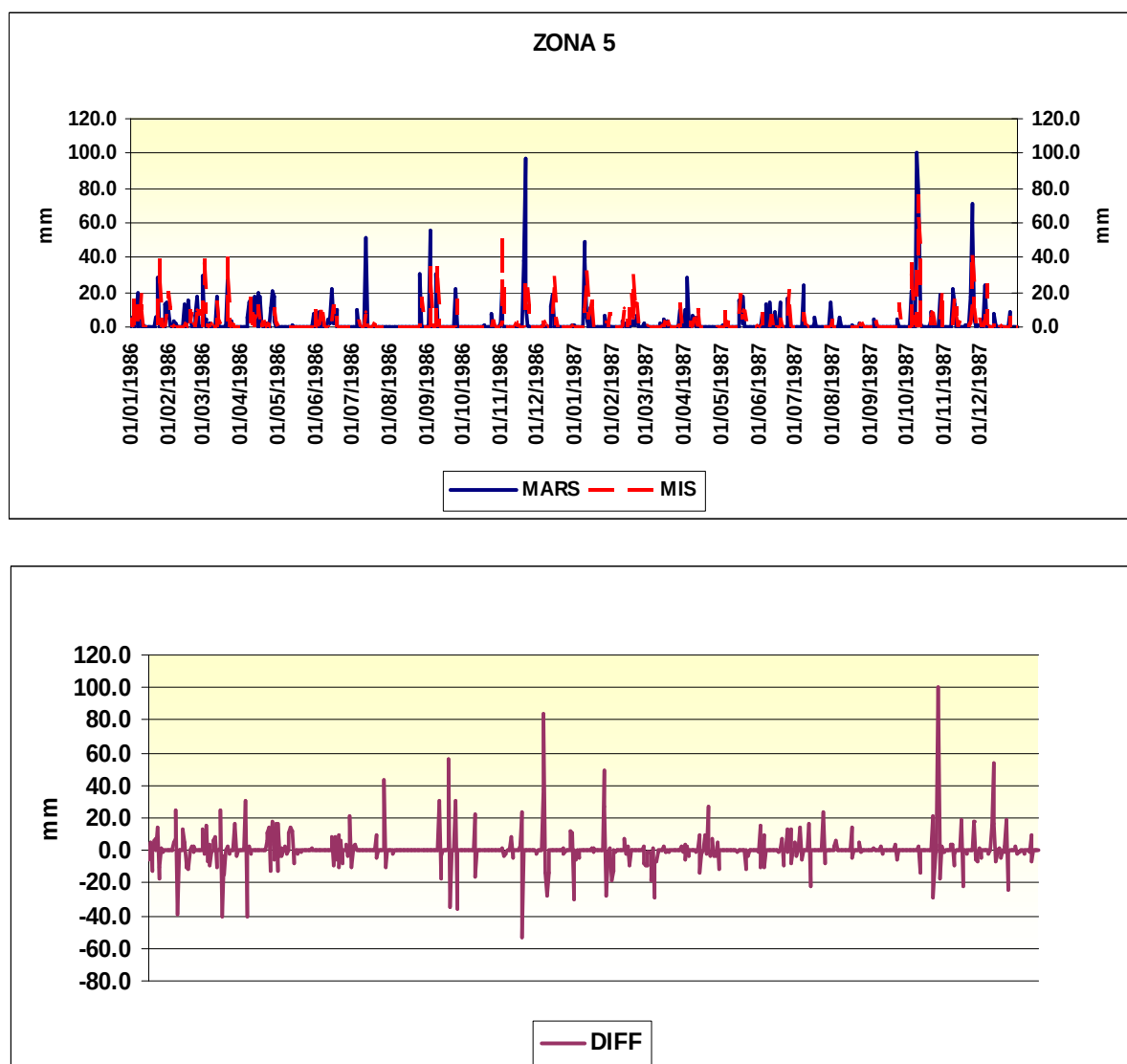


Figura 57: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 5 e graficazione delle differenze.

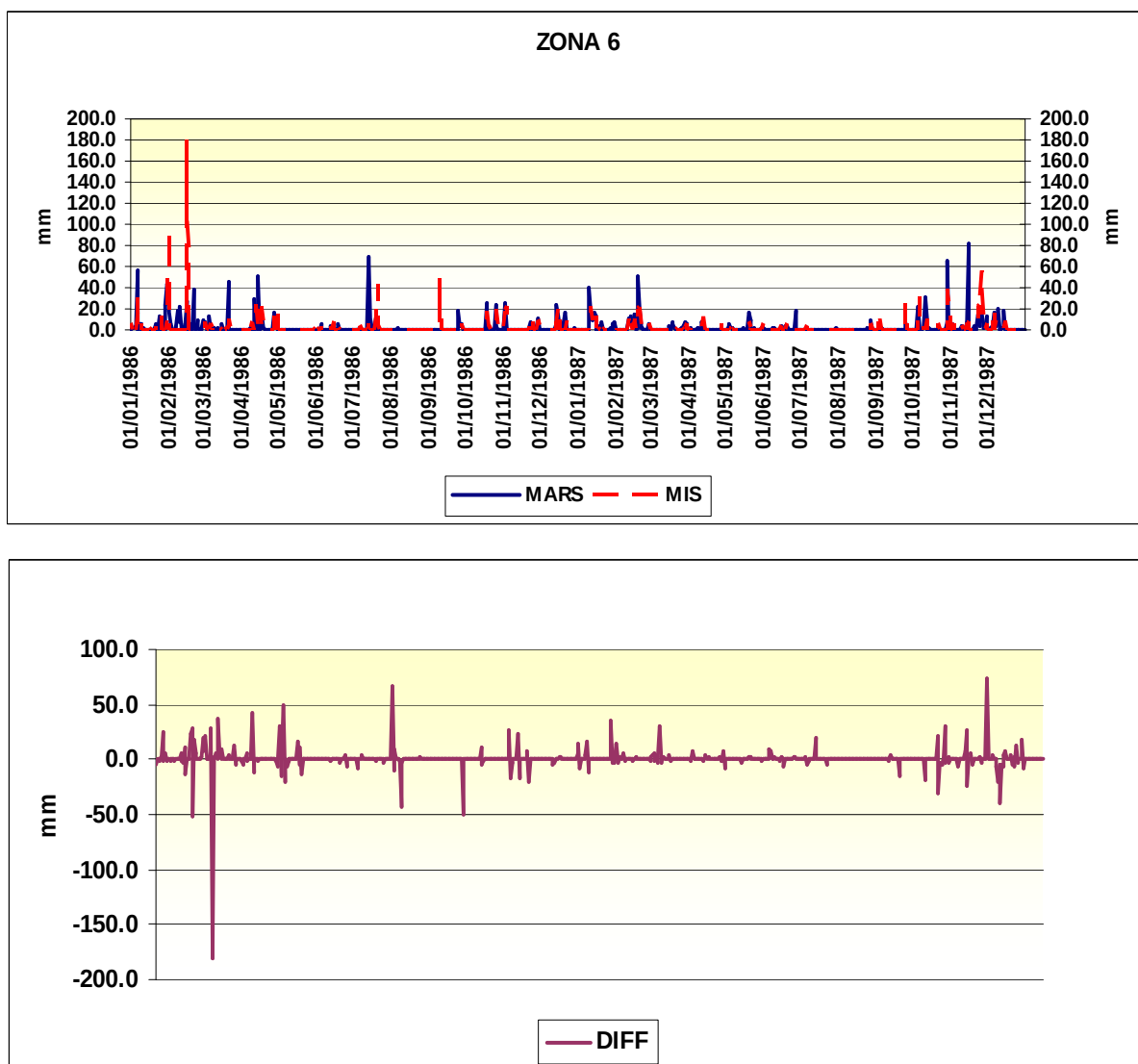


Figura 58: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 6 e graficazione delle differenze.

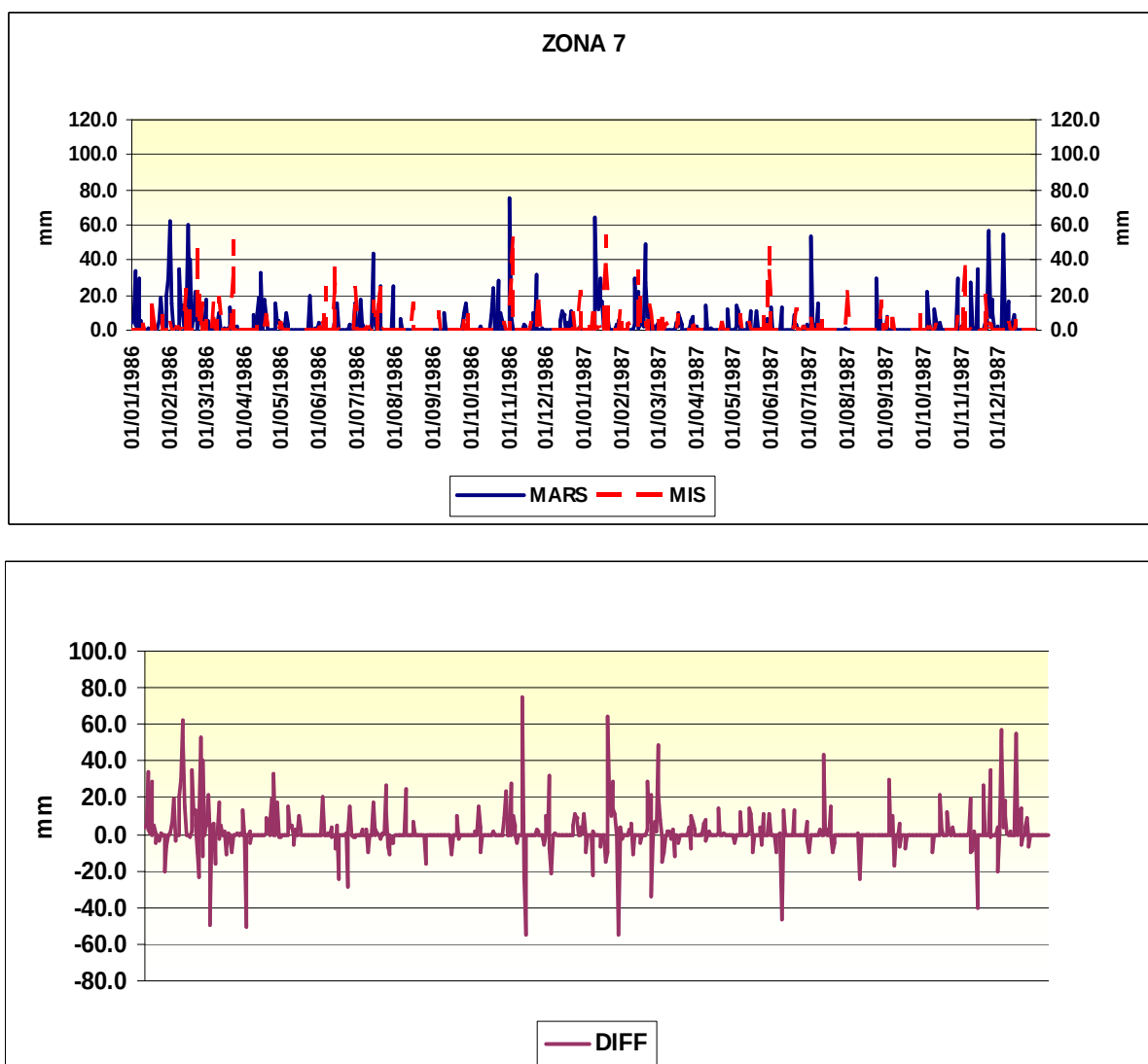


Figura 59: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 7 e graficazione delle differenze.

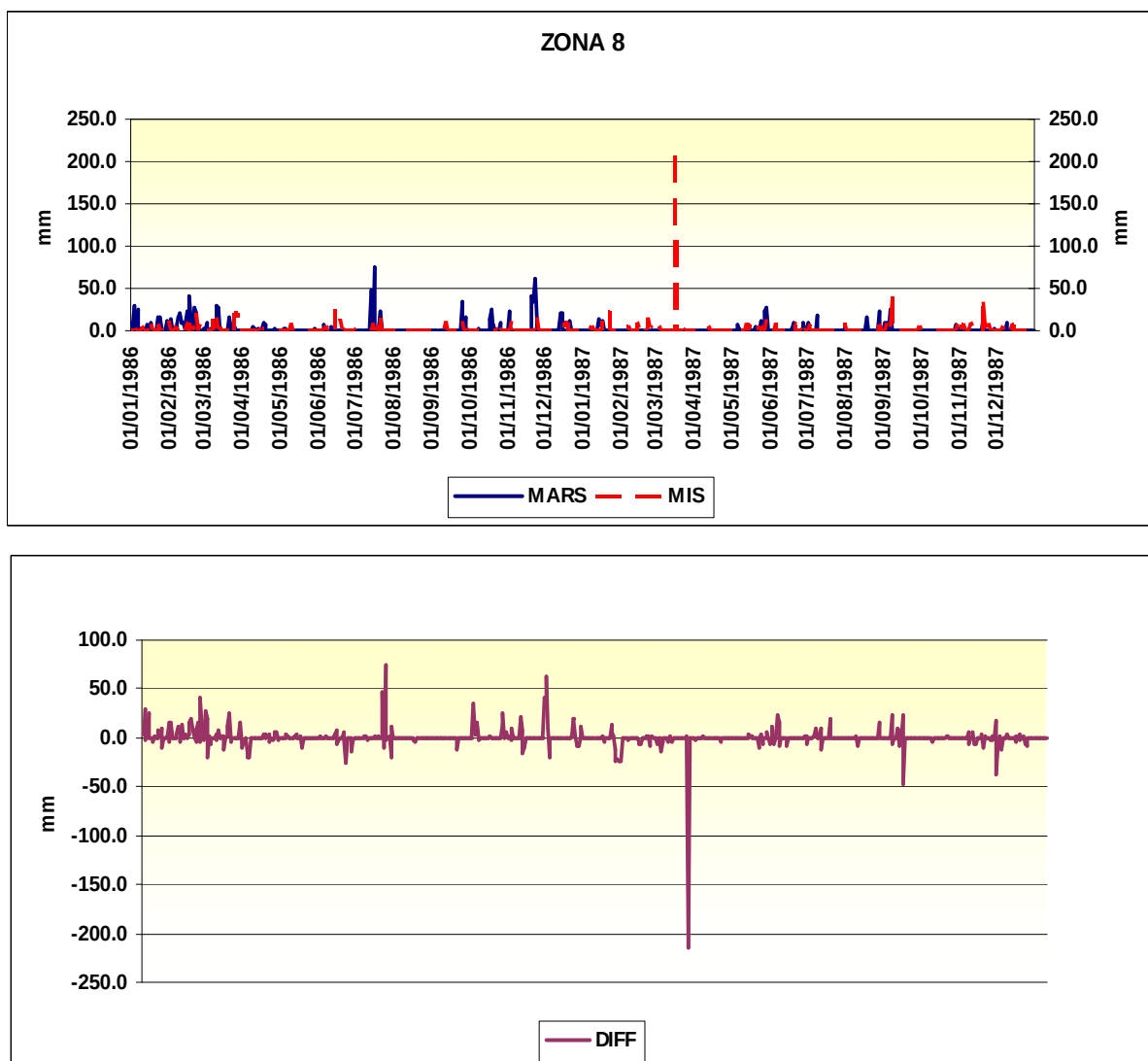


Figura 60: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 8 e graficazione delle differenze.

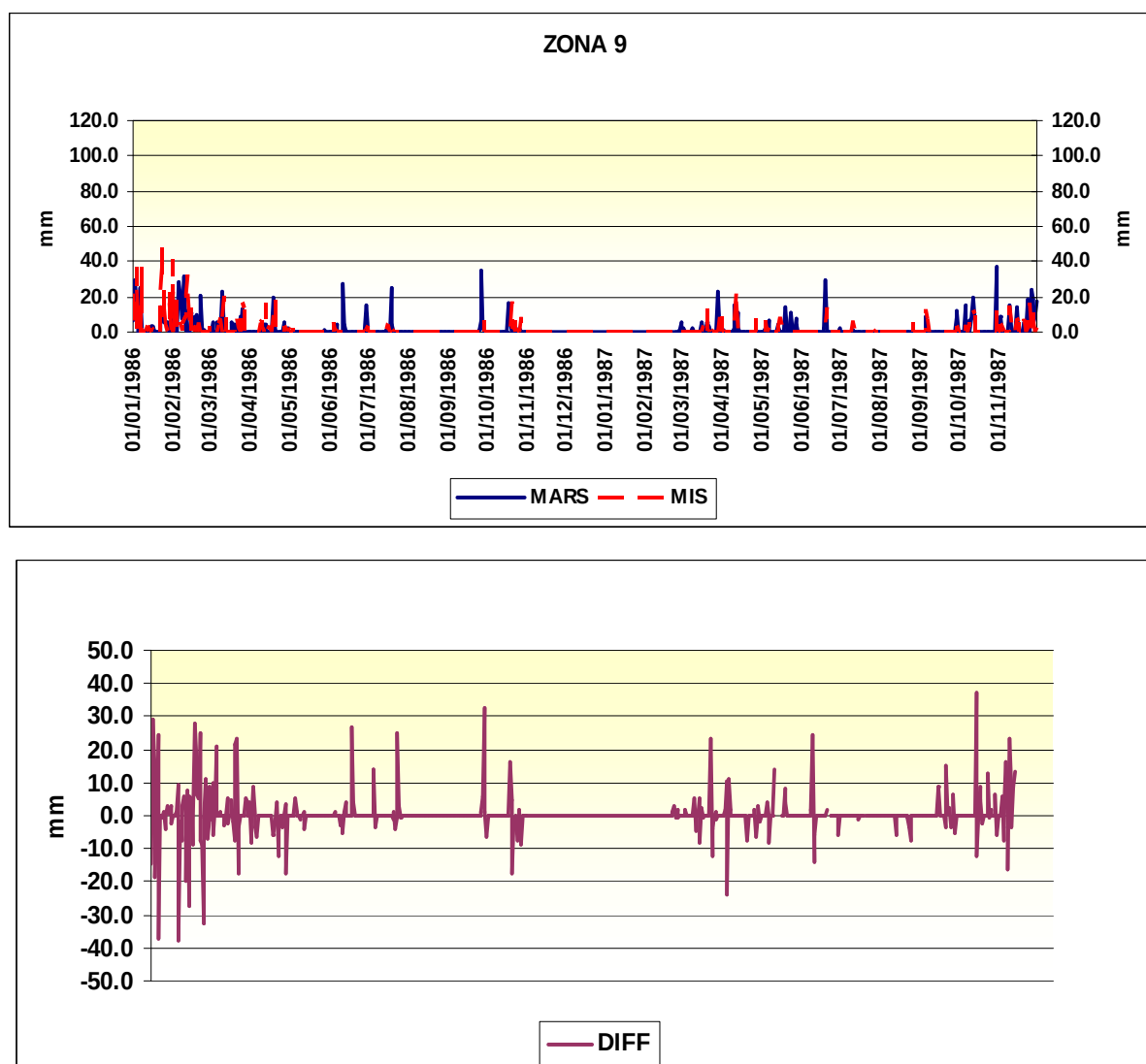


Figura 61: Confronto tra dati misurati e dati interpolati (MARS) di precipitazione per la zona 9 e graficazione delle differenze.

I grafici evidenziano come le medie delle precipitazioni desunte dal database MARS possono essere in generale considerate accettabili (non c'è una sensibile tendenza a sotto- o sovra- stimare le precipitazioni medie). Tuttavia troppo spesso i dati interpolati di MARS non colgono adeguatamente i picchi di precipitazione. In una simulazione in cui si fosse interessati al bilancio idrologico medio di lungo periodo ciò potrebbe anche essere forzosamente accettabile. Tuttavia questo non può che portare ad errori assai sensibili qualora si tratti di effettuare valutazioni sul bilancio di nutrienti e sedimenti: si pensi ad esempio alle evidenti possibilità di errore ottenibili nella stima di carico e concentrazione di sedimenti e fosforo, la cui

dinamica è governata (soprattutto nelle aree a clima mediterraneo) dai picchi di portata e dallo scorrimento superficiale che si manifesta in corrispondenza dei picchi di precipitazioni, spesso in tarda primavera o in autunno.

6.3 La calibrazione delle portate

Il modello è stato calibrato sulle portate, utilizzando dati di portata misurata del “Servizio Idrografico Nazionale” così come spiegato nel paragrafo “1”.

Per ogni zona di simulazione è stato individuato un bacino idrografico sul quale eseguire la calibrazione (anche per i criteri di scelta adottati in questa fase si rimanda al paragrafo “1”) corrispondente, tranne nel caso del bacino del Po che occupa interamente la zona di simulazione 3, ad un gruppo di sottobacini.

I dati delle stazioni scelte sono stati confrontati con quelli del sottobacino in cui ricadono geograficamente, corrispondente nella gran parte dei casi a quello di chiusura.

I bacini e le stazioni scelte a questo proposito sono le seguenti (fig. 62):

- Alcantara – Moio (zona 2)
- Po – Pontelagoscuro (zona 3)
- Brenta – Barziza (zona 4)
- Arno – S. Giovanni alla Vena (zona 5)
- Tevere – Ripetta (zona 6)
- Biferno – Altopantano (zona 7)
- Carapelle – Pontevecchio (zona 8)
- Sele- Albanella (zona 9)

La calibrazione è stata effettuata utilizzando il *Calibration Tool*; l'apposito strumento dell'interfaccia GIS AV-SWAT2000. Le modifiche alle variabili sono

state applicate all'intero bacino ed hanno riguardato principalmente i parametri che determinano le aliquote dei deflussi sotterranei (*groundwater*).



Figura 62: Stazioni di misura delle portate per i bacini idrografici scelti per la calibrazione matematica del modello

Di seguito per ogni bacino calibrato sono descritte le principali modifiche apportate ai parametri del modello, vengono elencati solo i passaggi riassuntivi della calibrazione che normalmente ha richiesto una serie considerevole di passaggi. In seguito alla calibrazione sono state confrontate tra loro sia le portate medie che mensili, misurate e simulate, dato che alla scala utilizzata risulta molto complessa la calibrazione su dati di portata giornaliera.

In fine, sono stati calcolati la correlazione matematica e l'indice di "Nash & Sutcliffe" molto utilizzato nella modellistica idrologica per verificare la "attendibilità" del modello utilizzato (Nash e Sutcliffe, 1970).

ZONA 2 ALCANTARA – MOIO

Per il bacino dell'Alcantara è stata riscontrata una sottostima del baseflow con i dati inputati per la quale è stato necessario aumentare il GW_REVAP (Coefficiente di “revap”: risalita dell'acqua sotterranea per capillarità dall'acquifero superficiale) ed anche il GWQMN (altezza della colonna d'acqua nell'acquifero superficiale per l'innescò del baseflow). Inoltre è stato necessario aumentare il CN2 (Curve Number) per aumentare i picchi di flusso. La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,49 per le giornaliere e 0,81 per le mensili. L'indice di Nash & Sutcliffe (di seguito indicato come NS) è risultato rispettivamente pari a 0,19 per le portate giornaliere e 0,61 per le mensili (fig. 63).

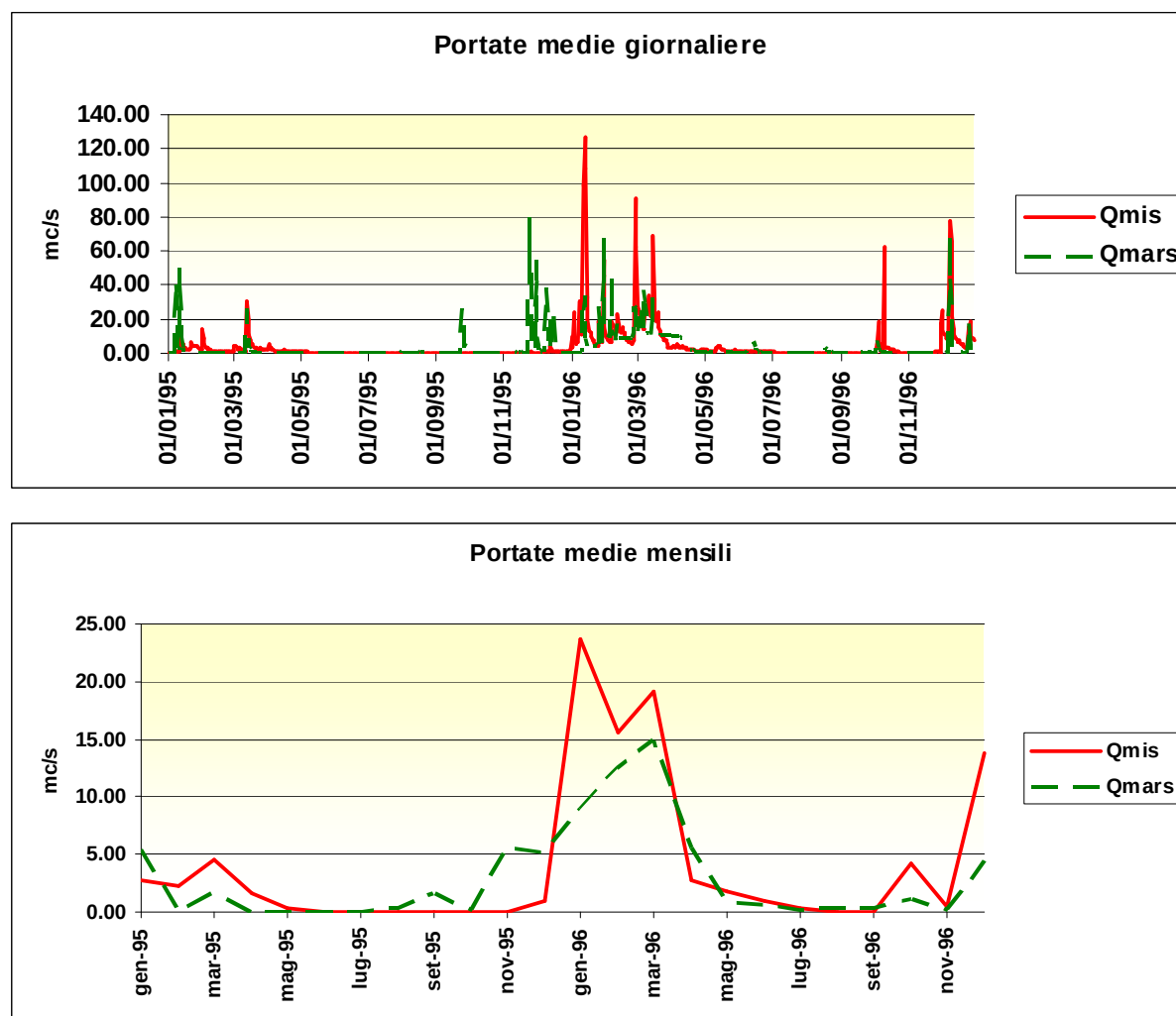


Figura 63: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell'Alcantara.

ZONA 3 PO- PONTELAGOSCURO

Per il bacino del Po è stato necessario aumentare il base flow incrementando il REVAPQMN (soglia minima di altezza dell'acqua nell'acquifero superficiale alla quale avviene il revap) e l'ESCO (fattore di compensazione di evaporazione del suolo) e diminuendo l'AWC (capacità di acqua disponibile).

Inoltre è stato necessario abbassare il CN2 per abbassare i picchi di flusso e aumentare il CH-COV (copertura vegetativa del canale) per ritardare gli afflussi.

La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,52 per le giornaliere e 0,82 per la mensili. Il NS è risultato rispettivamente pari a 0,11 per le portate giornaliere e 0,61 per le mensili (fig. 64).

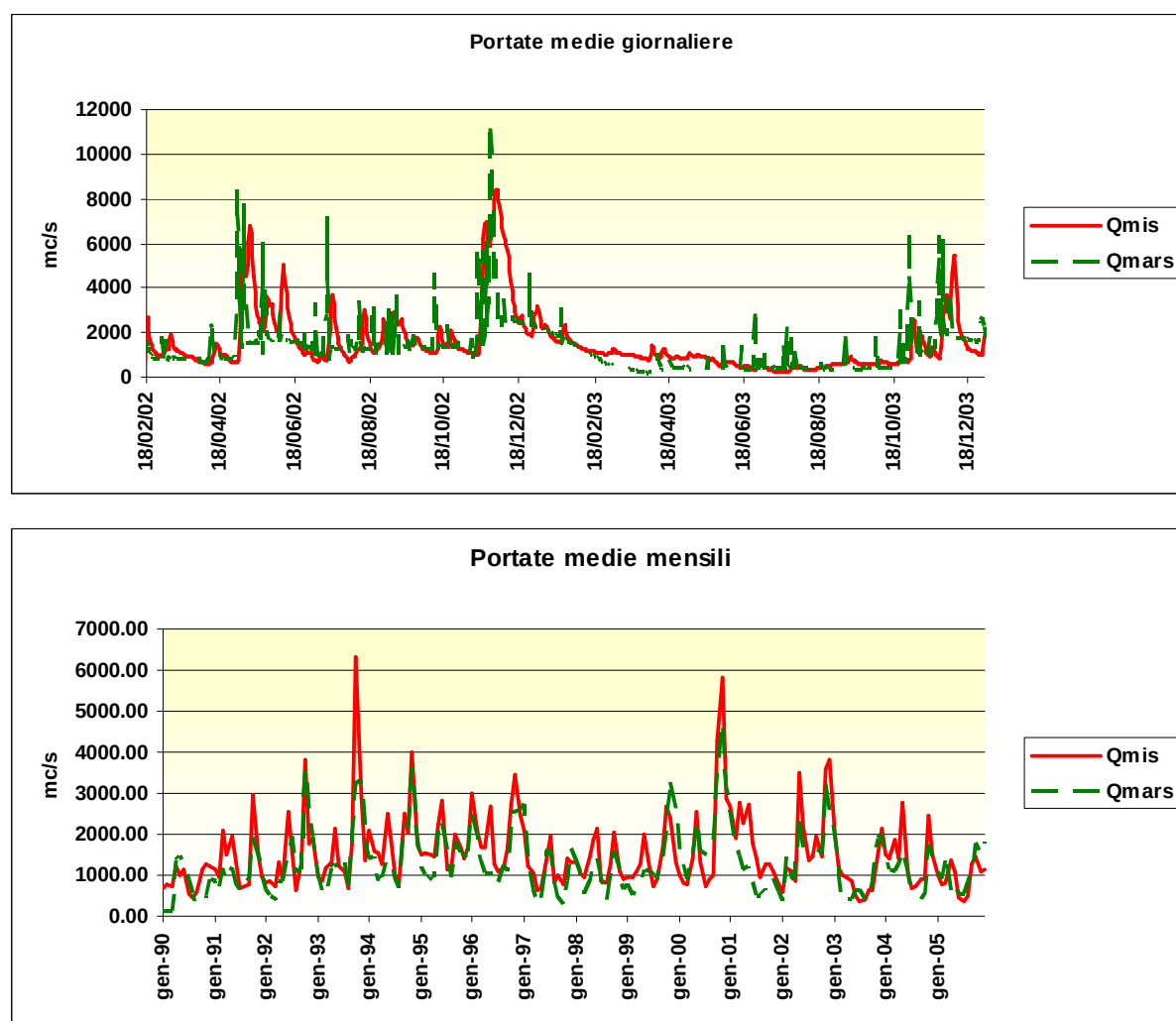


Figura 64: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Po.

ZONA 4 BRENTA – BARZIZA

La calibrazione di questo bacino è stata complicata dai fenomeni carsici che interessano la zona.

Da Cismon a Bassano il Brenta infatti scorre nella Valsugana ricevendo gli apporti del T. Oliero e del T. S. Nazario, le cui acque derivano dai fenomeni di carsismo dell'Altopiano di Asiago e del M. Grappa.

Di conseguenza una percentuale rilevante degli apporti al fiume è dovuta alle risorgive che non vengono simulate nel modello. Per questo motivo sono risultate delle portate simulate notevolmente più basse rispetto alle misurate ottenute sulla base degli apporti meteorici. E' risultato impossibile correggere le portate con la calibrazione. E' risultato anche complesso aggiungere le portate delle risorgive ai dati pluviometrici per la mancanza di dati medi di portata giornaliera delle sorgenti carsiche necessari per la notevolissima variabilità temporale.

La correlazione tra le portate misurate e simulate tuttavia non è scarsa in particolar modo per le portate medie mensili ed è risultata uguale a 0,34 per le giornaliere e 0,65 per la mensili. Il NS, invece, è risultato pari a -0,50 per le portate giornaliere e a -0,61 per le mensili (fig. 65).

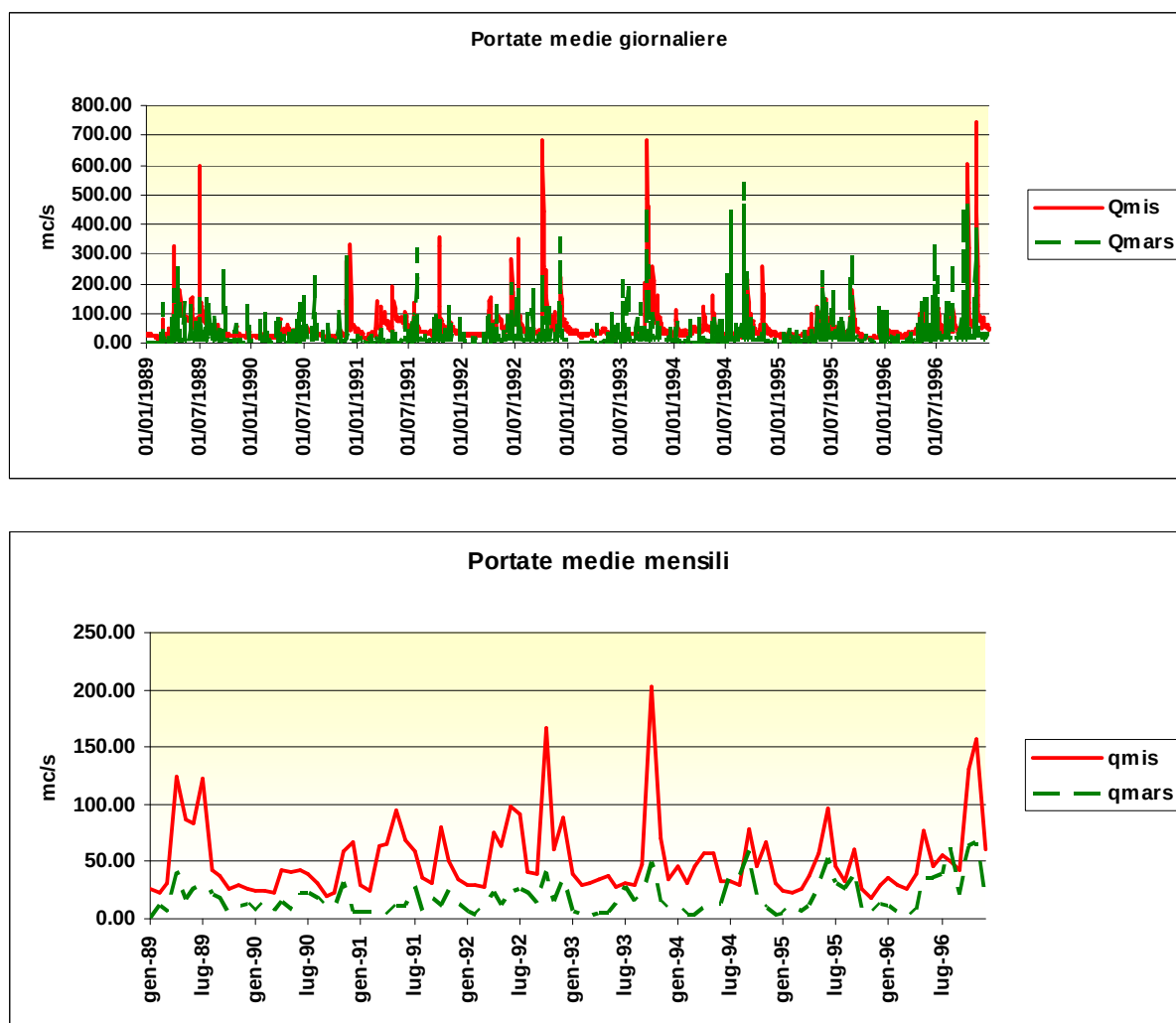


Figura 65: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Brenta.

ZONA 5 ARNO – SAN GIOVANNI ALLA VENA

Anche in questa zona è stato necessario correggere il baseflow, risultato troppo alto, incrementando il GW_REVAP ed il GWQMN ed abbassando il REVAPMN.

Inoltre è stato necessario alzare CN2 per la regolazione dei picchi di portata.

La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,57 per le giornaliere e 0,83 per le mensili. Il NS è risultato rispettivamente pari a 0,19 per le portate giornaliere e 0,67 per le mensili (fig. 66).

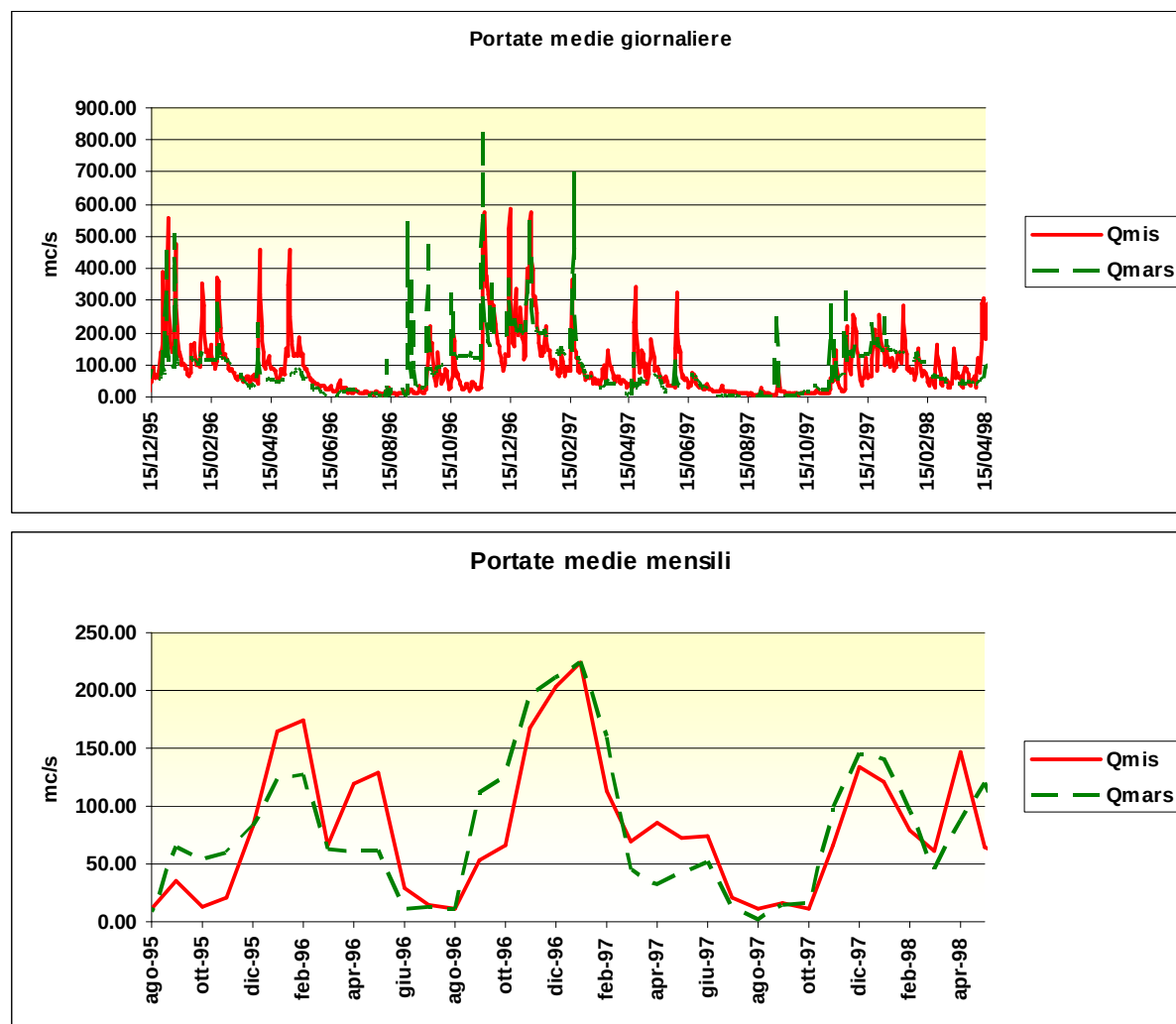


Figura 66: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell' Arno.

ZONA 6 TEVERE – RIPETTA

La stesse modifiche apportate nella zona precedente per abbassare il base flow sono state ripetute anche per la zona 6. E' stato incrementato il GW_REVAP ed il GWQMN ed abbassato il REVAPMN. Anche il CN2 è stato abbassato ed inoltre è stato necessario aumentare la SOL_AWC (Capacità di acqua disponibile nel suolo).

In questo caso la calibrazione è stata resa ancora più difficile ed aleatoria dall'evidente artefatto presente nelle serie misurate, responsabile dell'andamento a dente di sega vistosamente rilevabile nel grafico seguente. La correlazione è risultata uguale a 0,66 per le giornaliere e 0,48 per la mensili. Il NS ha dato risultati discordanti ed è risultato uguale a 0,18 per le portate giornaliere e -1,35 per le mensili (fig. 67).

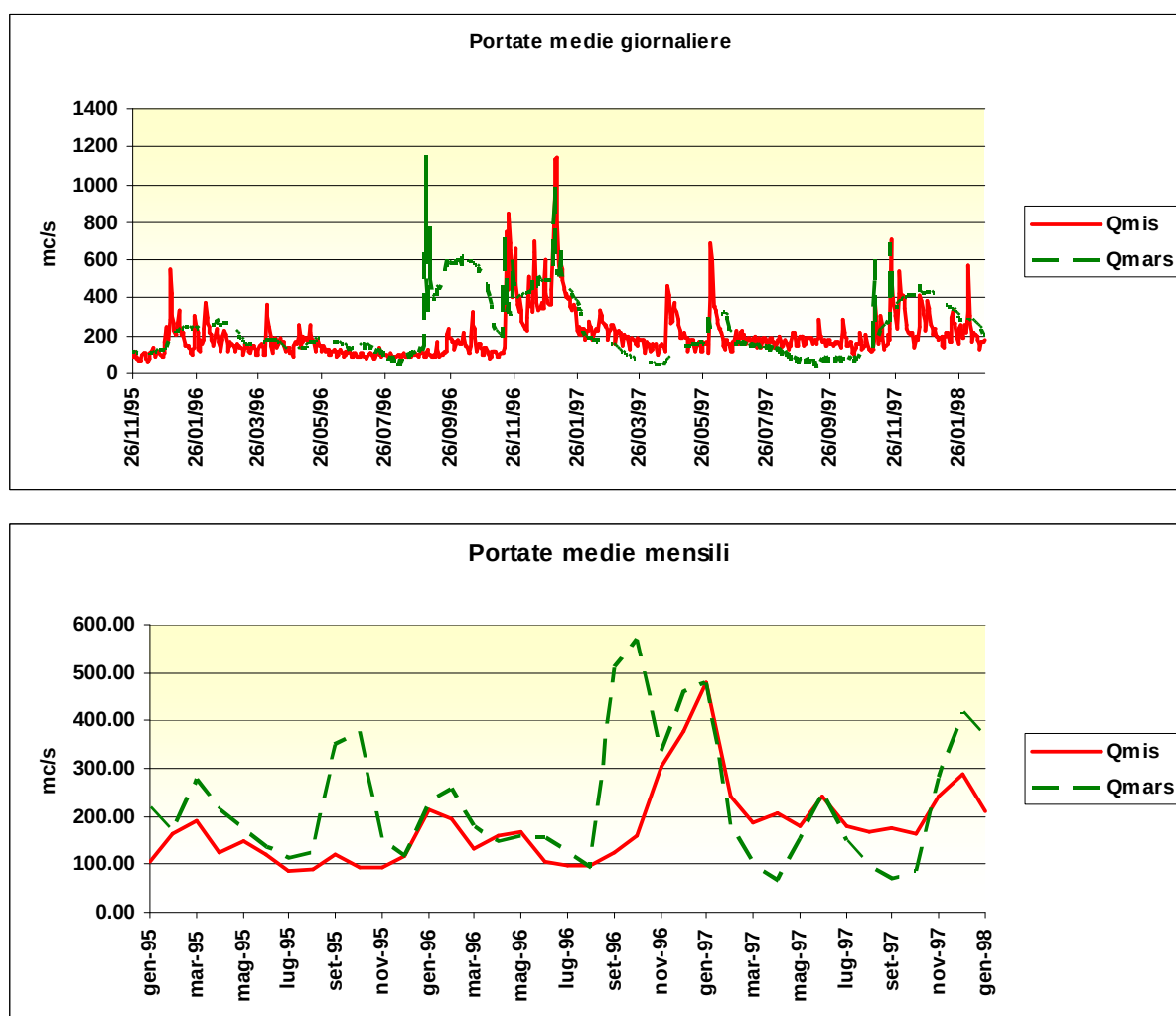


Figura 67: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Tevere.

ZONA 7 BIFERNO – ALTOPANTANO

La stesse modifiche attuate nella zone precedenti per abbassare il baseflow sono state Apportate anche per la zona 6: incremento del GW_REVAP e del GWQMN e decremento del REVAPMN.

Non sono stati modificati i CN2.

La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,46 per le giornaliere e 0,53 per la mensili. Il NS è risultato rispettivamente pari a 0,10 per le portate giornaliere e 0,04 per le mensili (fig. 68).

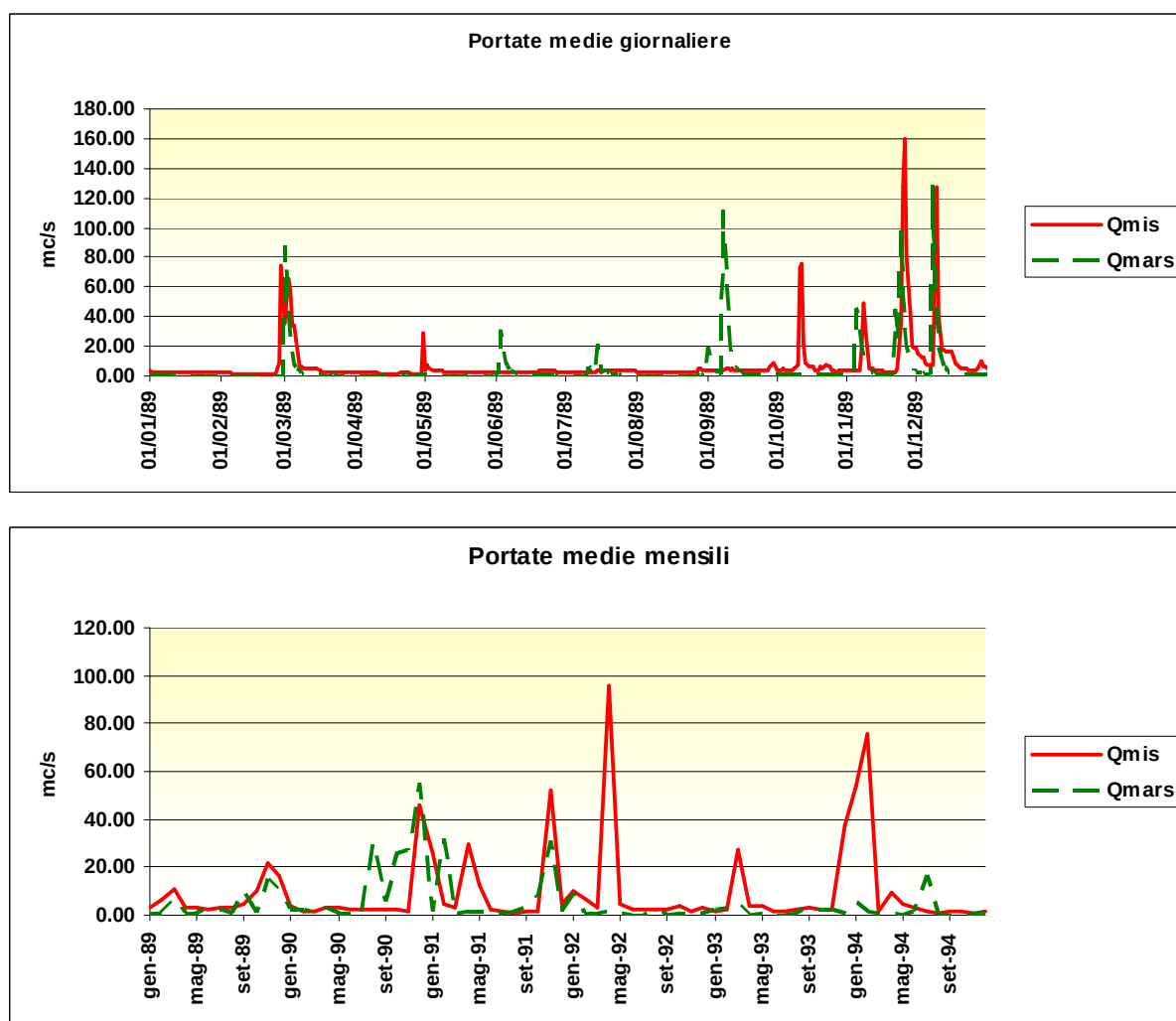


Figura 68: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Biferno.

ZONA 8 CARAPELLE – PONTEVECCHIO

Anche nella zona 8 si sono ripetuti i passaggi attuati precedentemente per abbassare il base flow: incremento del GW_REVAP e del GWQMN e decremento del REVAPMN. E' stato inoltre necessario allo stesso fine alzare l'ESCO e per aumentare la recessione aumentare l'ALPHA_BF (coefficiente di recessione).

La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,57 per le giornaliere e 0,85 per la mensili. Il NS è risultato scarso per la portate giornaliere con un valore pari a -0,01 e uguale a 0,60 per le mensili (fig. 69).

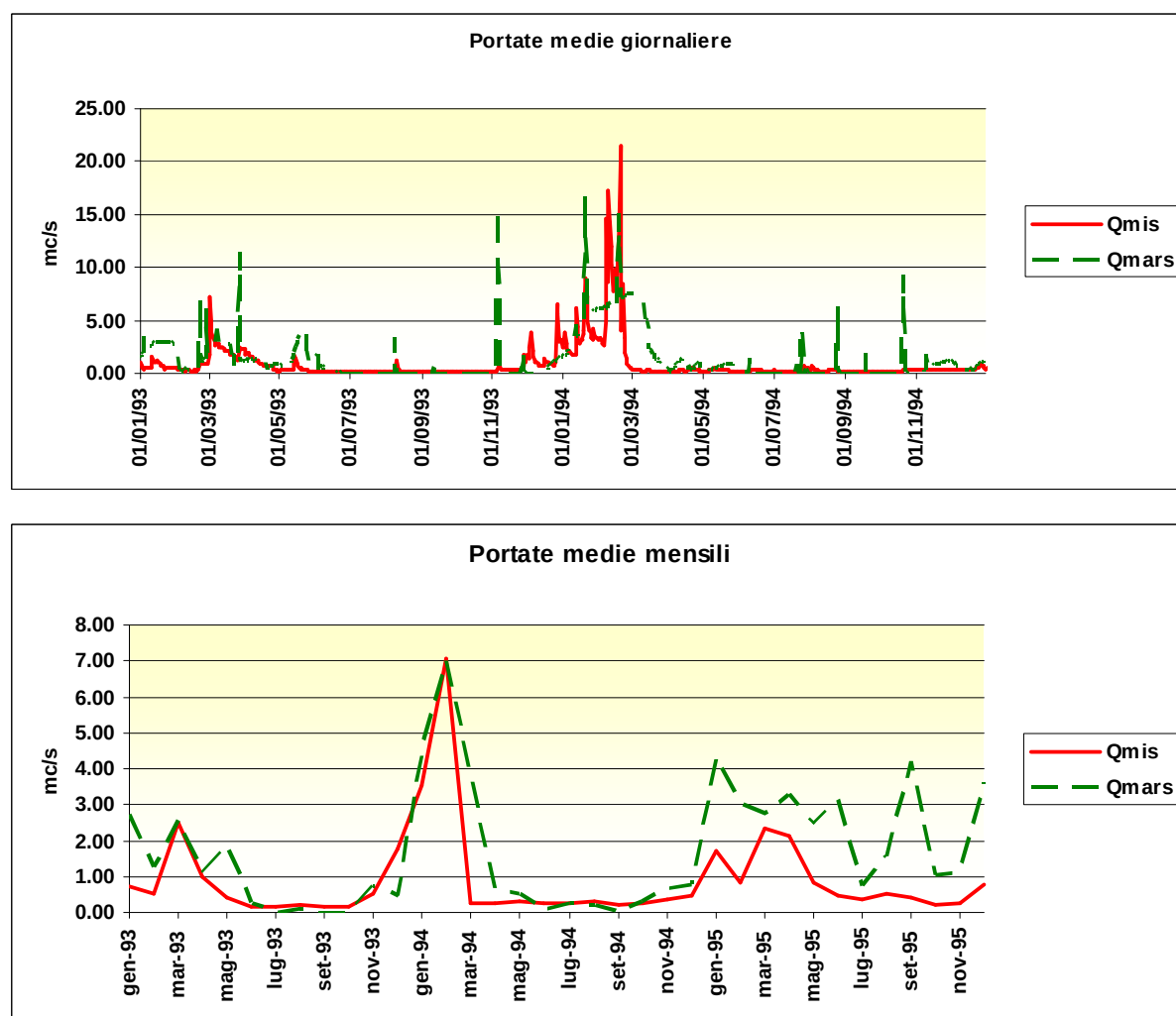


Figura 69: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.

ZONA 9 SELE – ALBANELLA

Anche nella zona 9 sono stati ripetuti i passaggi per abbassare il baseflow: incremento del GW_REVAP e del GWQMN e decremento del REVAPMN.

Inoltre è stato necessario alzare il CN2 ed abbassare il SOL_AWC.

La correlazione tra le portate misurate e simulate è risultata uguale a 0,33 per le giornaliere e 0,59 per la mensili. Il NS è risultato rispettivamente pari a 0,10 per le portate giornaliere e 0,33 per le mensili (fig. 70).

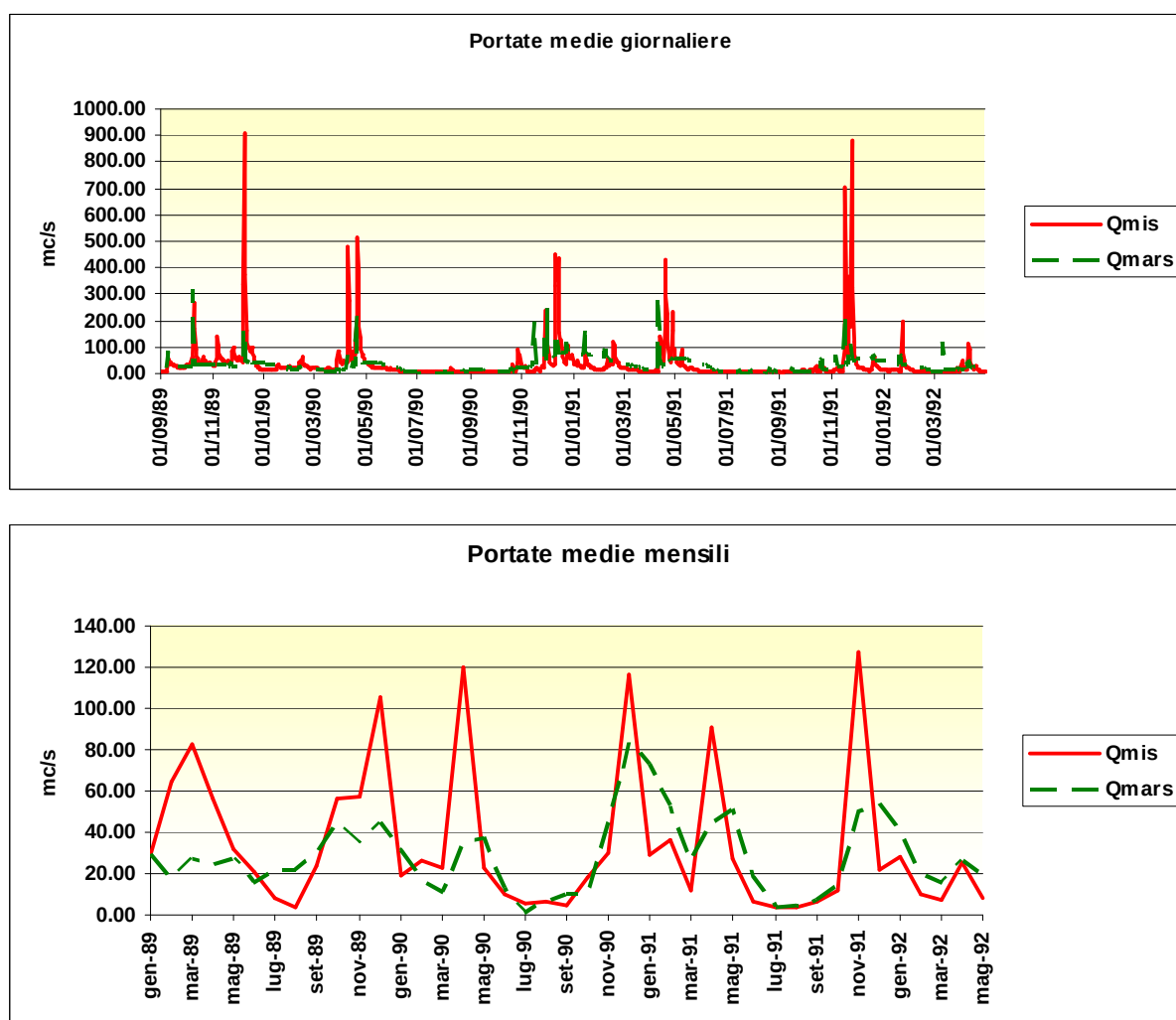


Figura 70: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.

6.4 Il bilancio idrologico

Di seguito sono riportati i valori della stima del bilancio idrologico calcolati dal modello SWAT per ogni bacino idrografico calibrato estrapolati dal file *output.out*; file riassuntivo generale degli output di simulazione. (tabb 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37).

Tabella 30: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Alcantara.

Alcantara	
PRECIP	537.8 mm
SNOW FALL	0.15 mm
SNOW MELT	0.14 mm
SUBLIMATION	0.00 mm
SURFACE RUNOFF Q	138.37 mm
LATERAL SOIL Q	4.05 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	46.69 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	144.97 mm
DEEP AQ RECHARGE	10.20 mm
TOTAL AQ RECHARGE	212.78 mm
TOTAL WATER YLD	187.66 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	215.07 mm
ET	190.4 mm
PET	1007.7 mm
TRANSMISSION LOSSES	1.44 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	20.932 t/ha

Tabella 31: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Po.

Po	
PRECIP	777.1 mm
SNOW FALL	15.99 mm
SNOW MELT	15.66 mm
SUBLIMATION	0.25 mm
SURFACE RUNOFF Q	52.37 mm

LATERAL SOIL Q	123.22 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	416.18 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	0.00 mm
DEEP AQ RECHARGE	0.00 mm
TOTAL AQ RECHARGE	417.28 mm
TOTAL WATER YLD	588.40 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	419.31 mm
ET	195.8 mm
PET	954.2 mm
TRANSMISSION LOSSES	3.37 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	4.496 t/ha

Tabella 32: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Brenta.

Brenta	
PRECIP	707.0 mm
SNOW FALL	46.23 mm
SNOW MELT	44.26 mm
SUBLIMATION	0.58 mm
SURFACE RUNOFF Q	32.73 mm
LATERAL SOIL Q	274.42 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	96.25 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	0.00 mm
DEEP AQ RECHARGE	0.00 mm
TOTAL AQ RECHARGE	98.84 mm
TOTAL WATER YLD	403.11 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	99.37 mm
ET	300.4 mm
PET	877.8mm
TRANSMISSION LOSSES	0.29 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	1.230 t/ha

Tabella 33: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Arno.

Arno	
PRECIP	817.8 mm
SNOW FALL	10.60 mm
SNOW MELT	9.39 mm
SUBLIMATION	0.09 mm
SURFACE RUNOFF Q	57.02 mm
LATERAL SOIL Q	10.35 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	157.29 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	210.95 mm
DEEP AQ RECHARGE	30.43 mm
TOTAL AQ RECHARGE	608.77 mm
TOTAL WATER YLD	223.17 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	613.27 mm
ET	153.0 mm
PET	1055.2 mm
TRANSMISSION LOSSES	1.49 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	3.027 t/ha

Tabella 34: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Tevere.

Tevere	
PRECIP	738.5 mm
SNOW FALL	14.10 mm
SNOW MELT	13.81 mm
SUBLIMATION	0.23 mm
SURFACE RUNOFF Q	18.11 mm
LATERAL SOIL Q	38.75 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	378.90 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	73.77 mm
DEEP AQ RECHARGE	17.16 mm

TOTAL AQ RECHARGE	471.58 mm
TOTAL WATER YLD	435.18 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	477.17 mm
ET	206.4 mm
PET	1022.0 mm
TRANSMISSION LOSSES	0.59 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	1.236 t/ha

Tabella 35: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Biferno.

Biferno	
PRECIP	693.9 mm
SNOW FALL	12.21 mm
SNOW MELT	12.00 mm
SUBLIMATION	0.21 mm
SURFACE RUNOFF Q	58.03 mm
LATERAL SOIL Q	28.88 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	55.36 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	189.47 mm
DEEP AQ RECHARGE	19.99 mm
TOTAL AQ RECHARGE	404.39 mm
TOTAL WATER YLD	141.18 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	409.67 mm
ET	273.0 mm
PET	1011.3 mm
TRANSMISSION LOSSES	1.09 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	5.744 t/ha

Tabella 36: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Carapelle.

Carapelle	
PRECIP	503.7 mm
SNOW FALL	7.95 mm
SNOW MELT	7.79 mm
SUBLIMATION	0.16 mm
SURFACE RUNOFF Q	17.17 mm
LATERAL SOIL Q	1.37 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	189.24 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	206.81 mm
DEEP AQ RECHARGE	21.32 mm
TOTAL AQ RECHARGE	426.50 mm
TOTAL WATER YLD	207.23 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	430.18 mm
ET	54.9 mm
PET	1034.2 mm
TRANSMISSION LOSSES	0.54 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	2.635 t/ha

Tabella 37: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Sele.

Sele	
PRECIP	649.8 mm
SNOW FALL	6.27 mm
SNOW MELT	6.13 mm
SUBLIMATION	0.14 mm
SURFACE RUNOFF Q	105.10 mm
LATERAL SOIL Q	11.35 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	286.28 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	38.41 mm
DEEP AQ RECHARGE	18.62 mm
TOTAL AQ RECHARGE	372.66 mm

TOTAL WATER YLD	401.52 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	375.91 mm
ET	172.4 mm
PET	966.6 mm
TRANSMISSION LOSSES	1.21 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	8.638 t/ha

6.5 Analisi di sensitività

Pur avendo effettuato la procedura di calibrazione in maniera classica, si è voluto provare ad utilizzare l'accoppiata analisi di sensitività / autocalibrazione per verificare l'effettivo miglioramento reso eventualmente possibile da questi strumenti.

L'analisi di sensitività è stata eseguita sui flussi ed utilizzando un set di dati osservati di riferimento. In particolare, sono stati utilizzati i dati delle stazioni di portata misurata utilizzati anche nella calibrazione manuale.

Si è scelto di sperimentare il modulo per la *Sensitivity Analysis* ed in seguito quello dell'*Autocalibrazione* sui bacini dell'Arno (zona 5) e del Carapelle (zona 8) che hanno fornito risultati contrastanti con la calibrazione manuale i primi sufficientemente accettabili al contrario dei secondi. Di conseguenza le stazioni di portata misurata scelte per questa sperimentazione sono state: San Giovanni alla Vena per l'Arno e Pontevecchio per il Carapelle.

I moduli sopracitati sono presenti nella versione AV-SWATX (ArcView Swat Extendable) successiva alla AV-SWAT2000 utilizzata nel presente studio e quindi i progetti "Zona 5" e "Zona 8" sono stati reimpostati nella nuova versione per potere eseguire le analisi.

Nelle tabelle 38 e 39 sono riportati i risultati dell'analisi di sensitività con i parametri ordinati, così come forniti nel file di output *sens.out*. I primi sei parametri evidenziati in rosso sono stati inputati nel modulo di Autocalibrazione.

Tabella 38: Risultati dell'Analisi di Sensitività per il bacino dell'Arno

Arno					
parname	rank	mean	parname	rank	mean
CN2	1	2.94	sol_k	15	0.05
rchrg_dp	2	1.28	REVAPMN	16	0.04
GWQMN	3	0.91	SMFMX	17	0.03
SOL_AWC	4	0.74	sol_alb	18	0.02
surlag	5	0.66	SFTMP	19	0.02
CH_K2	6	0.51	TIMP	20	0.01
GW_REVAP	7	0.39	SMTMP	21	0.01
ALPHA_BF	8	0.30	SLSUBBSN	22	0.01
GW_DELAY	9	0.26	epco	23	0.00
sol_z	10	0.24	ch_n	24	0.00
canmx	11	0.14	SMFMN	25	0.00
ESCO	12	0.08	TLAPS	26	0.00
SLOPE	13	0.06	blai	27	0.00
BIOMIX	14	0.05			

Per il bacino dell'Arno i parametri più sensibili sono risultati:

- CN2 - Curve Number per le condizioni di umidità;
- rchrg_dp - Frazione di percolazione nell'acquifero profondo;
- GWQMN – Soglia di altezza dell'acqua nell'acquifero profondo richiesta per il “return flow”;
- SOL_AWC - Capacità di acqua disponibile nel suolo;
- surlag – Coefficiente di ritardo nello scorrimento superficiale;
- CH_K2 – Conduttività idraulica effettiva nei materiali alluvionali dei canali principali.

Tabella 39: Risultati dell'Analisi di Sensitività per il bacino del Carapelle.

Carapelle					
parname	Rank	mean	parname	rank	mean
CN2	1	5.66	sol_k	15	0.02
CH_K2	2	0.78	SLSUBBSN	16	0.01
surlag	3	0.67	canmx	17	0.01
SOL_AWC	4	0.44	BIOMIX	18	0.01
GWQMN	5	0.41	GW_DELAY	19	0.01
ALPHA_BF	6	0.39	SMFMN	20	0.00
rcharg_dp	7	0.09	ch_n	21	0.00
ESCO	8	0.09	REVAPMN	22	0.00
SMFMX	9	0.08	sol_alb	23	0.00
Sol_z	10	0.08	epco	24	0.00
TIMP	11	0.07	GW_REVAP	25	0.00
SMTMP	12	0.05	TLAPS	26	0.00
SLOPE	13	0.03	blai	27	0.00
SFTMP	14	0.02			

Per il bacino del Carapelle i parametri più sensibili sono risultati in ordine:

- CN2- Curve Number per le condizioni di umidità;
- CH_K2- Conduttività idraulica effettiva nei materiali alluvionali dei canali principali;
- surlag – Coefficiente di ritardo nello scorrimento superficiale;
- SOL_AWC- Capacità di acqua disponibile nel suolo;
- GWQMN – Soglia di altezza dell’acqua nell’acquifero profondo richiesta per il “return flow”;
- ALPHA_BF – Fattore α di recessione del baseflow.

Per il significato degli altri parametri compresi nelle tabelle si rimanda al manuale del modello.

6.6 Autocalibrazione

Le prime sei variabili dell'analisi di sensitività sono state indicate al modello per eseguire la calibrazione automatica (*Autocalibration*). Anche in questo caso in seguito sono stati calcolati gli indici di correlazione e il NS per le portate giornaliere misurate e simulate. Questi ultimi sono risultati uguali rispettivamente a 0,59 e 0,34 per il bacino dell'Arno e a 0,46 e 0,15 per il bacino del Carapelle (figg. 71 e 72). E' osservabile quindi un notevole miglioramento della calibrazione passando al modulo automatico che ha fornito infatti buoni risultati considerate la scala e la risoluzione dei dati di input e le caratteristiche morfologiche dei bacini idrografici italiani (ad esempio bacini intermittenti come il Carapelle).

Sono riportati di seguito anche i valori del bilancio idrologico che si ottengono con le modifiche apportate con l'autocalibrazione (tabb. 40 e 41).

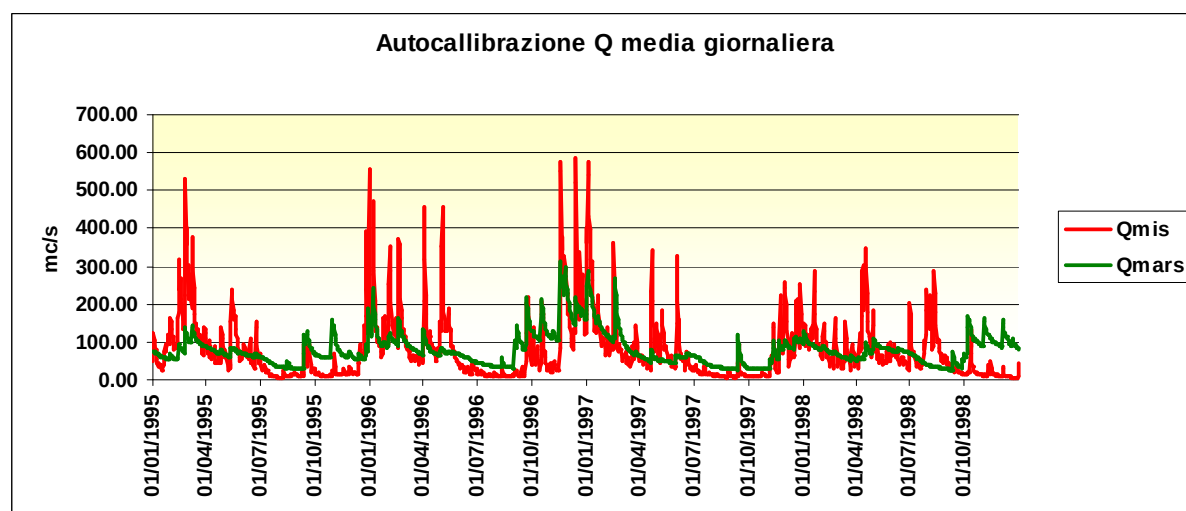


Figura 71: Confronto tra le portate giornaliere e mensili misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino dell'Arno.

Tabella 40: Stima del bilancio idrologico per il bacino dell'Arno.

Arno	
PRECIP	817.8 mm
SNOW FALL	10.60 mm
SNOW MELT	9.39 mm
SUBLIMATION	0.09 mm
SURFACE RUNOFF Q	41.26 mm
LATERAL SOIL Q	15.67 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	507.91 mm
REVP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	16.62 mm
DEEP AQ RECHARGE	27.86 mm
TOTAL AQ RECHARGE	557.15 mm
TOTAL WATER YLD	563.86 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	561.54 mm
ET	199.3 mm
PET	1055.2mm
TRANSMISSION LOSSES	0.98 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	3.097 t/ha

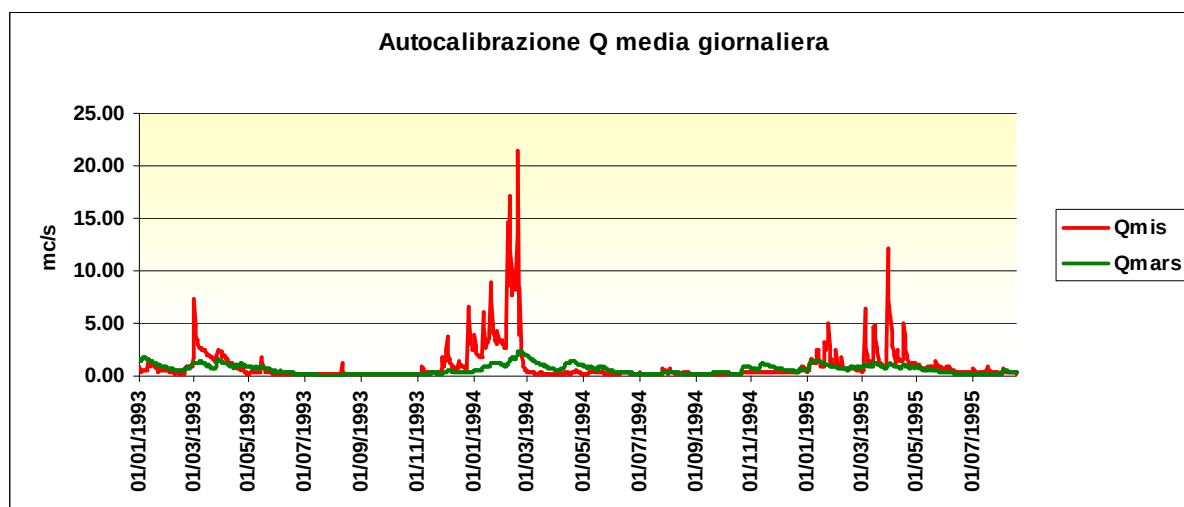


Figura 72: Confronto tra le portate giornaliere misurate (rosso) e simulate (verdi) per il bacino del Carapelle.

Tabella 41: Stima del bilancio idrologico per il bacino del Carapelle.

Carapelle	
PRECIP	476.7 mm
SNOW FALL	2.87 mm
SNOW MELT	2.81 mm
SUBLIMATION	0.06 mm
SURFACE RUNOFF Q	27.99 mm
LATERAL SOIL Q	1.80 mm
TILE Q	0.00 mm
GROUNDWATER (SHAL AQ) Q	291.23 mm
REVAP (SHAL AQ = SOIL/PLANTS)	13.98 mm
DEEP AQ RECHARGE	16.25 mm
TOTAL AQ RECHARGE	324.96 mm
TOTAL WATER YLD	320.23 mm
PERCOLATION OUT OF SOIL	328.49 mm
ET	120.7 mm
PET	1091.1mm
TRANSMISSION LOSSES	0.78 mm
TOTAL SEDIMENT LOADING	0.512 t/ha

CAPITOLO 7: DISCUSSIONE

L'uso di dati a grande scala nelle applicazioni modellistiche implica sempre una minore risoluzione degli input e, di conseguenza, un margine di errore maggiore negli output.

In particolare è risultato impossibile assicurare la copertura geografica dell'intero territorio nazionale, soprattutto in relazione alle aree con pendenza ridottissima, ove il modello ha fallito l'individuazione di un reticolo idrografico coerente. Tale difficoltà è classica in aree, appunto, piatte e la si ritrova in altre applicazioni modellistiche: basti considerare che i bacini ed il reticolo idrografico individuato dal progetto "Catchments Characterization and Modelling" (CMM) dello JRC EuroLandscape Project coprono essenzialmente la stessa porzione di territorio nazionale simulata nel presente studio.

I dati climatici del progetto MARS, inoltre, essendo ricavati con tecniche di interpolazione, tendono a sottostimare l'ammontare delle precipitazioni in particolar modo nelle zone costiere ed insulari come evidenziato anche dal confronto con i dati misurati.

Sono risultati funzionali ed adeguati la cartografia ed il database delle caratteristiche podologiche contenuti nel SGDBE (Soil Geographical Database of Europe).

Tenendo presenti le considerazioni sovresposte e le caratteristiche morfologiche ed idrologiche dei bacini italiani i risultati ottenuti in questo studio possono essere definiti sufficienti e decisamente accettabili se osservati alla scala temporale mensile, più adeguata in relazione alla scala geografica adottata.

Altri studi effettuati con il modello SWAT, a fini gestionali, a grande scala hanno evidenziato risultati comparabili: si ottengono valori accettabili di NS su base mensile e più bassi a scala giornaliera.

In uno studio sviluppato su alcuni bacini idrografici europei dallo JRC (Joint Research Centre) per sopperire alle richieste delle nuove direttive comunitarie è

stato utilizzato SWAT in combinazione con altri modelli per ottenere scenari gestionali agricoli da suggerire nelle politiche comunitarie (Bouraoui et al., 2005).

La calibrazione effettuata sulle portate medie mensili nel bacini della Senna mostra dei risultati di NSe compresi tra 0.45 e 0.76.

Un'altro studio sviluppato con SWAT a grande scala ed attraverso l'utilizzo di global data è stato sviluppato per tre differenti bacini idrografici caratterizzati da gravi problematiche legate alla gestione delle risorse idriche : il bacino del Kagera in Rwanda, Burundi, Uganda and Tanzania (Haguma, 2007), il bacino del Nilo Blu in Etiopia, il bacino del Gange in India, Bangladesh e Nepal (van Griensven et al., 2007), il bacino del TungaBhadra in Karnataka e Andra Pradesh (India, Lo Porto et al. 2008)

In questi studi scarsi risultati sono stati ottenuti per il bacino del Gange eccessivamente antropizzato e sfruttato (0.41-0.63) mentre buoni risultati di NSe sono stati ottenuti per il Nilo blu che conserva ancora vaste aree naturali (0.77-0.83). Buoni valori di correlazione R^2 (maggiori di 0.8) sono stati ottenuti nel bacino del TungaBhadra.

Il modello SWAT è stato oggetto di studio anche per una modellazione a livello continentale per L'Africa (Shuol et al., 2007). Il fine è stato quello di verificare se fosse possibile utilizzare il modello per quantificare la disponibilità di "freshwater" (acqua bianca disponibile ai diversi usi antropici) a tutto il continente. Il modello ha mostrato comunque alcuni problemi nell'effettuare le simulazioni soprattutto con la penultima versione dell'interfaccia GIS. Questi sono poi stati in parte risolti con l'ultima versione. In seguito lo studio è stato sviluppato per l'Africa occidentale e sono state sviluppate le simulazioni allo stesso scopo, i dati sono stati calibrati mensilmente non essendoci disponibilità di dati giornalieri per molte stazioni con risultati estremamente variabili (-0.42 - 0.89). La mancanza di dati giornalieri è stata il principale ostacolo da superare anche per l'attuazione delle simulazioni superato con l'utilizzo di un Weather Generator.

Tuttavia, lavorando appunto a scala nazionale ed utilizzando database geografici a copertura globale o regionale, la adeguata considerazione di fenomeni fisici specifici di determinate aree, condizioni topografiche o situazioni geologiche non

è garantita. In particolare si può rilevare come nel caso del bacino del Brenta, dove le portate sono estremamente condizionate dagli apporti delle risorgive carsiche per le quali non esistono dati dettagliati di portata, la simulazione non riesce a cogliere l'andamento delle portate.

Il geodatabase realizzato per questo progetto permette in futuro di effettuare simulazioni relative alla qualità delle risorse idriche ed alle conseguenze di cambiamenti di pratiche colturali e di uso del suolo. Tuttavia perché tali simulazioni possano essere possibili, sarebbe necessaria la disponibilità (idealmente “on line”) di dati misurati di qualità delle acque, allo scopo di poter calibrare/validare le simulazioni effettuate, cosa che non è stato possibile effettuare in questa occasione, stante la estrema frammentarietà delle informazioni e delle fonti di tali dati.

CAPITOLO 8: CONCLUSIONI

In conclusione, è possibile utilizzare il modello SWAT anche a scala nazionale per l'Italia ed usando le attuali banche dati a larga scala, ad esclusione del database MARS che non è risultato pienamente soddisfacente per un'area come quella italiana dove l'influenza del mare e la grossa variabilità topografica rappresentano degli ostacoli nelle procedure di interpolazione dei dati climatici

In questo studio il modello SWAT è stato utilizzato ben al di sotto delle sue potenzialità in quanto sono state prese in considerazione solo le valutazioni relative al comparto idrologico. Ciò è avvenuto a causa della attuale impossibilità pressoché totale di calibrare e validare i risultati relativi alla qualità delle acque ed ai bilanci di nutrienti, essendo assai difficile e spesso impossibile acquisire adeguate serie storiche di valori misurati di qualità.

E' tuttavia possibile affermare che è possibile utilizzare il modello SWAT a scopi previsionali in particolar modo per individuare potenziali aree di rischio o per operare confronti qualitativi tra diversi tipi di gestione a scala nazionale. La ricerca è tuttavia aperta a sviluppi futuri ed è sicuramente possibile migliorare il dato simulato al fine di ottenere la costruzione di scenari futuri quantitativi.

Ad esempio l'uso di un DEM a maggiore risoluzione potrebbe consentire di estendere lo studio anche alle porzioni di territorio non coperte nelle attuali simulazioni. Carte di uso del suolo e dei suoli più dettagliate, unite all'analisi localizzata delle pratiche agronomiche, consentirebbero un miglioramento della stima del bilancio idrologico, della crescita delle colture e dei carichi di nutrienti, pesticidi e sedimenti introdotti nei corpi idrici. L'introduzione di dati sugli scarichi puntiformi (depuratori, scarichi industriali ecc.), possibile in SWAT, migliorerebbe gli output e aumenterebbe ulteriormente la possibilità di implementare scenari gestionali. Il modello così elaborato rappresenterebbe un sistema informativo utile ad un'ampia serie di applicazioni a livello nazionale che potrebbe essere usato a livello politico-gestionale.

Se si considerano poi gli obblighi derivanti dall'attuazione in territorio nazionale della Direttiva Quadro sulle Acque, appare ancora più evidente l'importanza e la assoluta necessità della disponibilità di dati misurati e validati, realmente ed agevolmente pubblici ed accessibili, in formato digitale, come in molte nazioni "sviluppate" è già da tempo possibile.

La gestione oculata delle risorse idriche è una questione la cui importanza ha assunto ormai un rilievo determinante. Occorre a tal fine ricordare che l'irrigazione rappresenta uno dei maggiori settori di impiego di acqua in Italia, variando tra la metà ed i due terzi dell'uso totale, così come per i maggiori Paesi mediterranei. In molte zone del nostro paese l'irrigazione costituisce l'unica possibilità di sviluppo per un'agricoltura moderna, flessibile e dunque competitiva; di conseguenza, essa rappresenta la chiave strategica per la promozione del settore primario.

A tale constatazione fa però purtroppo da tragico contraltare la consapevolezza della dimensione finita della disponibilità della risorsa, specie nel Mezzogiorno d'Italia, dove il problema della siccità e della susseguente carenza idrica sembrano aver assunto caratteri strutturali, piuttosto che congiunturali.

Alla luce della considerazione che il settore agricolo è di gran lunga il più importante utilizzatore di acqua e che l'uso della risorsa è destinato prioritariamente al soddisfacimento della domanda civile ed industriale, occorre attendersi che in futuro ci sarà sempre meno acqua disponibile per l'agricoltura. A questa considerazione va poi aggiunta la constatazione che gli eventi siccitosi stanno diventando molto più frequenti di quanto ci si potesse aspettare solo alcuni anni fa. Deve essere chiaro che il conseguimento di obiettivi quali l'incremento delle potenzialità di risparmio e di resa attraverso l'utilizzazione di reti di distribuzione sempre più efficienti e di tecnologie per l'irrigazione appropriate debba essere considerato come una condizione strutturale piuttosto che occasionale (INEA, 2005)

BIBLIOGRAFIA

Allen R.G. (1986). A Penman for all seasons. J. Irrig. and Drain Engng., ASCE, 112(4): 348-368.

Allen R.G., Jensen M.E., Wright J.L., Burman R.D. (1989). Operational estimates of evapotranspiration. Agron. J. 81:650-662.

Arnold J.G., Williams J.R. Maidment D.R. (1995). Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. Journal of Hydraulic Engineering 121(2):171-183.

Arnold J.G., Williams J.R., Nicks A.D., Sammons N.B. (1990). SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.

Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt. (1993). A comprehensive surfacegroundwater flow model. J. Hydrol. 142:47-69.

Beasley, D.B., Huggins, L.F. (1981). ANSWERS users manual. Washington, DC: U.S Environmental Protection Agency.

Bonati G., Liberati C. (2007). “Uso irriguo dell’acqua e principali implicazioni di natura ambientale”. INEA- Istituto Nazionale di Economia Agraria, Rapporto Irrigazione.

Bonciarelli F. (1989). Fondamenti di agronomia generale - Edizioni agricole.

Bouraoui F., Grizzetti B., Mulligan D., Grizzetti B., Galbiati L. (2005). Modelling nutrient fate from agriculture: an integrated frame work. 3rd International Swat Conference, Zurich July 13-15.

Bouraoui, F. (1994). Development of a continuous, physically-based, distributed parameter, nonpoint source model. Ph.D. diss., Biological Systems Engineering Dept., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg

Bouwer H. (1969). Infiltration of water into nonuniform soil. Journal Irrigation and Drainage Div. ASCE 95(IR4):451-462.

Braden J.B., Uchtmann D.L. (1985). Agricultural nonpoint pollution control: An assessment. J. Soil Water Conserv. 40:23–26.

Brandmeyer J.E., Karimi H.A. (2000). Coupling methodologies for enviromental models – in “Enviromental Modelling and Software” n.15 pp. 479-488.

Carsel R.F., Smith C.N., Mulkey L.A., Dean J.D., Jowise P. (1984). User's Manual for the Pesticide Root Zone Model (PRZM). US Environmental Protection Agency. EPA/600/3-84-109, Athens, Georgia.

Chesters, G.; Schiero, L. 1985. A primer on nonpoint source pollution. Journal of Soil and Water Conservation. 40(1): 9-13.

Chow T.E. (1970). Analysis of stochastic hydrologic systems. Water Resources Research, vol 6, no 6, P 1569-1582.

De Girolamo A.M., De Luca F., Lo Porto A., Botti P., Cané G., Diliberto L. (2007). Studio dell'inquinamento da fonti diffuse nel bacino del Rio Mulargia. L'Acqua, submitted.

de Roo A.P.J., Wetenschappen F.R., te Utrecht R. (1993). Using Geographical Information Systems: Validity and Applicability of the 'ANSWERS' Model. Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap.

Dean J.D., Huyakorn P.S., Donigian A.S., Voos K.A., (1989). Risk of Unsaturated/Saturated Transport and Transformation of Chemical Concentrations (RUSTIC). Vol 1: Theory and code US Environ. Prot. Agency, Environ. Res. Lab., Athens, GA.

Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J. (2001). ArcView Interface for SWAT2000 – User's Guide, 337. Texas: Temple.

Di Luzio M., Srinivasan R., Arnold J., (2001). Arc View Interface for SWAT 2000 User's Guide. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service, USA, Texas.

FAO, ISRIC and ISSS (1998). World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Report 84, Rome, 88pp.

Garnier M., Passarella G., Lo Porto A. (2007). Impatto del cambiamento climatico su erosione e perdita di nutrienti dal suolo agricolo nel bacino dell'Enza. In: Clima e cambiamenti climatici: le attività del CNR.

Green, W.H. and G.A. Ampt. (1911). Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. Journal of Agricultural Sciences 4:11-24.

Haan C.T., Storm D.E. (1996). Nonpoint Source Pollution Modeling (with GIS) Geographical Information Systems in Hydrology, Springer.

Haddock G., Jankowski P. (1993). Integrating nonpoint source pollution modeling with a geographic information system. Computers, Environment & Urban Systems.

Haguma D., Van Griensven A., van Andel S.J. (2007). Development of a hydrological model of Kagera river basin using remote sensing data". 3rd International SWAT Conference, Zurich July 13-15 proceeding.

Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. (1985). Agricultural benefits for Senegal River Basin. J. Irrig. and Drain. Engr. 111(2):113-124.

Heineke, H.J., Eckelmann, W., Thomasson, A.J., Jones, R.J.A., Montanarella, L. and Buckley, B. (1998). Land Information Systems: Developments for planning the sustainable use of land resources. EUR 17729 EN, 546pp. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

IFNC - Inventario Forestale Nazionale e del Carbonio. www.ifni.it.

INEA Istituto Nazionale di Economia Agraria (2005). Rapporto sullo stato dell'agricoltura italiana. D.M. n.12714 del 9/09/05.

IRSA-CNR – Istituto di Ricerca Sulle Acque del Consiglio Nazionale delle Ricerche (1990). Valutazione dei carichi inquinanti potenziali per i principali bacini idrografici italiani. Quaderno n. 90.

ISTAT – Istituto Nazionale di Statistica (2000). 5° Censimento dell'Agricoltura.

Jamagne, M., Daroussin, J., Eimberck, M., King, D., Lambert, J.J., Le Bas, C., Montanarella, L. (2002). Soil Geographical Database of Eurasia and Mediterranean countries at 1:1M. Proceedings 17th World Congress of Soil Science (WCSS), 14-21 August, Thailand, paper 494–1-10.

King D., Daroussin J., Tavernier R. (1994) - Development of a soil geographical database from the soil map of the European Communities. Catena (21). 37-56

Knisel W.G. (1980). CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.

Knisel W.G. (1993). GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems, Version 2.10. UGA-CPES-BAED Publication No. 5. University of Georgia, Tifton, GA.

Knisel W.G., Foster G.R., Leonard R. (1993). CREAMS: A System for Evaluating Management Practices.

Le Bas, C. and Jamagne, M. (eds) (1996). Soil databases to support sustainable development. (eds C. Le Bas and M. Jamagne). EUR 16371 EN, 145pp. Commission of the European Communities.

Leonard R.A., Knisei W.G., Still D.A. (1986). GLEAMS: Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems . Tifton.uga.edu.

Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. (1987). GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. Trans. ASAE 30(5):1403-1428.

Leone A. (1991). Alcuni contenuti dell'analisi e della pianificazione territoriale - Edagricole.

Leone A., Marini R. (1993). Assessment and Mitigation of the Effects of Land Use in a Lake Basin (Lake Vico in Central Italy). Journal of Environmental Management, pag. 39\50.

Liao H. (1997). An interactive modeling environment for non-point source pollution control. Paper No. 96076 of the Journal of the American Water Resources Association.

Line D.E., Coffey S.W., Osmond D.L. (1997). WATERSHEDSS GRASS-AGNPS model tool. Transactions of the ASAE - asae.frymulti.com.

Lo Porto A., Barkved L., Gosain A. (2008). Modelling Water and Nutrients Balance in Tungabhadra River Basin: Scenario Analysis and Management Recommendations, Striver Policy Brief, Issue N.7, Oslo, 10 November 2008 - Ed. Striver "Strategy and Methodology for Improved Iwrm – An Integrated Interdisciplinary Assessment in Four Twinning River Basins", Sustdev-2005-3.II.3.6. Contract Number 037141.

Lo Porto A., De Girolamo A. M., Abouabdillah A., De Luca D., Santese G. (2007). Influenza dei cambiamenti climatici sul regime idrologico di due bacini

idrografici in ambiente mediterraneo. In: Clima e cambiamenti climatici: le attività del CNR.

Lo Porto A., Froebrich J. (2006). Guidelines for Management Options, in “Critical Issues in the Water Quality Dynamics of Temporary Waters – Evaluation and Recommendations” TempQsim Project, Enduser Summary.

Lo Porto A., Puddu A., Diliberto L., Cané G., De Gerolamo A.M., Zoppini A., Fazi S., Amalfitano S., Barra Caracciolo A., Grenni P., (2006), SW Sardinia, Italy – Flumendosa / Mulargia, in “Critical Issues in the Water Quality Dynamics of Temporary Waters – Evaluation and Recommendations from the TempQsim Project, Enduser Summary”, p31-36.

McCree, K.J. (1972). The action spectrum, absorption and quantum yield of photosynthesis in crop plants. Agric. Met. 9:191-216.

Mein, R.G., C.L. Larson (1973). Modeling infiltration during a steady rain. Water Resources Research 9(2):384-394.

MiPAF – Ministero delle Politiche Agricole e Forestali (2006). Piano Strategico Nazionale per lo Sviluppo Rurale. Art. 11 Reg. Ce 1698/2005.

Monsi, M. and T. Saeki (1953). Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. Japan J. Bot. 14:22-52.

Montanarella, L. and Jones, R.J.A. (1999). The European Soil Bureau. In: Soil Resources of Europe. P. Bullock, R.J.A. Jones and L. Montanarella (eds). European

Soil Bureau Research Report No.6, EUR 18991 EN, p.3-14. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Monteith, J.L. (1965). Evaporation and the environment. p. 205-234. In The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.

Monteith, J.L. (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. J. Appl. Ecol. 9:747-766.

Napiorkowski, J. J., Strupczewski, W. G., and Dooge, J. C. I. (1981). "Lumped non-Linear Flood Routing Model and Its Simplification to the Muskingum Model," Rainfall-Runoff Relationship, V. P. Siiigli, Ed., Proccniiqs of Inter- national Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, at Mississippi State Univ., May 18-21.

Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, 10 (3), 282–290.

Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff (1996). National soil survey handbook, title 430-VI. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Nearing, M.A., B.Y. Liu, L.M. Risse, and X. Zhang. (1996). Curve number and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. Water Resources Bulletin 32:125-136.

Neitsch S.L., Arnold J.G., Williams S J.R. (1999). Soil and Water Assessment Tool 99.2 - User's Manual. Blackland research center Texas Agricultural Experiment Station, Temple – Texas.

Nicks, A.D. (1974). Stochastic generation of the occurrence, pattern, and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. In Proc. Symp. Statistical Hydrology, Aug.-Sept. 1971, Tuscon, AZ. U.S. Department of Agriculture, Misc. Publ. No. 1275.

Novotny V., Olem H. (1994). Water quality (prevention, identification,, and management of diffuse pollution). New York, Van Nostrand Reinold.

Penman, H.L. (1956). Evaporation: An introductory survey. Netherlands Journal of Agricultural Science 4:7-29.

Platou, S.W., Nørr, A.H. and Madsen, H. B. (1989). Digitisation of the EC Soil Map. In: Agriculture: computerization of land use data. R.J.A Jones and B. Biagi (eds.). EUR 11151 EN, p.12-24. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. Mon. Weather Rev. 100:81- 92.

Puddu A., Lo Porto A., Zoppini A., Barra Caracciolo A., Fazi S., Grenni P., De Girolamo A.M., Amalfitano S., De Luca F. (2007). Impatto dei cambiamenti climatici sui sistemi fluviali a regime temporaneo: modellizzazione idrologica e dinamica dei processi di trasformazione del sedimento. In: Clima e cambiamenti climatici.

Rallison, R.E. and N. Miller. (1981). Past, present and future SCS runoff procedure. p. 353-364. In V.P. Singh (ed.). Rainfall runoff relationship. Water Resources Publication, Littleton, CO.

Rawls, W.J. and D.L. Brakensiek. (1985). Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293-299. In E.B. Jones and T.J. Ward (eds). Watershed management in the 80's. ASCE, New York, N.Y.

Rewerts C.C., Engel B.A. (1991). ANSWERS on GRASS: Integrating a watershed simulation with a GIS. ASAE Paper.

Sharpley, A.N. and J.R. Williams (1990). EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator, 1. model documentation. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Tech. Bull. 1768.

Shuol J., Abbaspour K. G., Srinivasan R., Hong Y. (2007). "Taking the step from a large scale hidrological model (West Africa) to a continental model (Africa). International SWAT conference 2007, Proceeding.

Smith, R.E. (1992). Opus: An integrated simulation model for transport of nonpoint- source pollutants at the field scale, VOL: I, Documentation ARS 98, USDA-ARS, pp. 120 pp.

Soil Conservation Service (1972). Section 4: Hydrology In National Engineering Handbook. SCS.

Srinivasan R., Arnold J.G. (1994). Integration of a basin-scale water quality model with GIS. Journal of the American Water Resources Association - Blackwell Synergy.

Stanhill, G. and M. Fuchs. (1977). The relative flux density of photosynthetically active radiation. J. Appl. Ecol. 14:317-322.

Szeicz, G. (1974). Solar radiation for plant growth. J. Appl. Ecol. 11:617-636.

Thornthwaite, C. W., Mather J.R. (1957). Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. In "Climatology".

Thornthwaite, C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38:55-94.

Tim U.S., Jolly R. 1994). Evaluating Agricultural Nonpoint-Source Pollution Using Integrated Geographic Information Systems. - Journal of Environmental Quality 23:25-35.

Van Griensven A., Akhtar M. K., Haguma D., Sintayehu R., Shuol J., Abbaspour K. G., van Andel S.J., Price R. K. (2007). "Catchment modelling using internet based model data". International SWAT conference 2007, Proceeding.

Veith T.L., Nordberg T.M., Wolfe M.L., Dillaha T. (2000). Questions: a User-friendly Interface to ANSWERS-2000. ASAE Paper.

Vento D. (2001). CLIMAGRI: il progetto di ricerca finalizzato sul tema Cambiamenti Climatici e Agricoltura. Informatore Agrario, Anno LVII n.º23 1/7 Giugno 2001, pag 35.

Vento D. e Esposito S. (2003). Cambiamenti climatici: alcune ricerche del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali. UCEA - Ufficio Centrale di Ecologia Agraria. Bollettino Agrometeorologico Nazionale, agosto 2003.

Vossen, P. and Meyer-Roux, J. (1995). Crop monitoring and yield forecasting activities of the MARS Project. In: European Land Information Systems for Agro-environmental Monitoring. D. King, R.J.A. Jones and A.J. Thomasson, A.J. EUR 16232 EN, p.11-29. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.

Williams, J.R. (1969). Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. Trans. ASAE 12(1):100-103.

Williams, J.R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. Water Resour. Bull. 11(5):965-974.

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. (1985). Simulator for water resources in rural basins. Journal of Hydraulic Engineering 111(6): 970-986.

Williams, J.R., C.A. Jones, P.T. Dyke. (1984). A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1):129-144.

Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agriculture Handbook 282. USDA-ARS.

Wischmeier, W.H., C.B. Johnson, and B.V. Cross. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation* 26:189-193.

Wishmeyer W.D., Smith D.D. (1978). Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Washington D.C. – USDA Agricultural Handbook n. 278.

Young, R.A., C.A. Onstad, D.D. Bosch, W.P. Anderson (1987). AGNPS, Agricultural non-point source pollution model: a watershed analysis tool. USDA Agricultural Research Service.



APPENDICE : STAZIONI DI RILIEVO DEI DATI CLIMATICI NOAA

STAZIONE	LAT	LON	ALTEZZA s.l.m.
S. VALENTINO	46.75	10.53	14610
BOLZANO	46.47	11.33	2410
PASSO ROLLE	46.30	11.78	20060
PAGANELLA	46.15	11.03	21290
DOBBIACO	46.73	12.22	12260
AVIANO	46.03	12.60	1280
TARVISIO	46.50	13.58	7780
UDINE/RIVOLTO	45.98	13.03	530
AOSTA	45.73	7.35	5470
TORINO/CASELLE	45.22	7.65	2870
TORINO/BRIC	45.03	7.73	7100
MILANO/MALPENSA	45.62	8.73	2110
BERGAMO/ORIO	45.67	9.70	2370
MILANO/LINATE	45.43	9.28	1030
PIACENZA	44.92	9.73	1380
BRESCIA/GHEDI	45.42	10.28	970
VERONA/VILLAFRANCA	45.38	10.87	680
VICENZA	45.57	11.52	530
TREVISO/ISTRANA	45.68	12.10	460
VENEZIA/TESSERA	45.50	12.33	60
RONCHI DEI LEGIONARI	45.82	13.48	120
TRIESTE	45.65	13.75	200
MONDOVI	44.38	7.82	5600
GENOVA/SESTRI	44.42	8.85	30
PASSO DELLA CISA	44.43	9.93	10400
MONTE CIMONE	44.20	10.70	21730



FERRARA	44.83	11.62	100
BOLOGNA/BORGO PANIGALE	44.53	11.30	490
PUNTA MARINA	44.45	12.30	60
RIMINI	44.03	12.62	130
IMPERIA	43.87	8.03	600
CAPO MELE	43.95	8.17	2210
FIRENZE/PERETOLA	43.80	11.20	380
FRONTONE	43.52	12.73	5740
FALCONARA	43.62	13.37	100
GROSSETO	42.75	11.07	70
MONTE TERMINILLO	42.47	12.98	18750
PESCARA	42.43	14.20	110
ROMA FIUMICINO	41.80	12.23	30
CAMPOBASSO	41.57	14.65	8070
AMENDOLA	41.53	15.72	600
BARI/PALESE MACCHIE	41.13	16.78	490
PONZA	40.92	12.95	1850
NAPOLI/CAPODICHINO	40.85	14.30	720
POTENZA	40.63	15.80	8430
CAPO PALINURO	40.02	15.28	1850
BRINDISI	40.65	17.95	100
MARINA DI GINOSA	40.43	16.88	120
S. MARIA DI LEUCA	39.82	18.35	1120
LAMEZIA TERME	38.90	16.25	150
USTICA	38.70	13.18	2510
PALERMO/PUNTA RAISI	38.18	13.10	210
MESSINA	38.20	15.55	510
TRAPANI/BIRGI	37.92	12.50	140
GELA	37.08	14.22	650
CATANIA/FONTANAROSSA	37.47	15.05	170



PANTELLERIA	36.82	11.97	1700
COZZO SPADARO	36.68	15.13	510
ALGHERO	40.63	8.28	400
CAPO FRASCA	39.75	8.47	950
ISOLA DI CARLOFORTE	39.13	8.32	120
CAPO BELLAVISTA	39.93	9.72	1500
CAGLIARI/ELMAS	39.25	9.07	50