



POLITECNICO

MILANO 1863

POLITECNICO DI MILANO
SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE
CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO

MODELLAZIONE NUMERICA E VALUTAZIONE DELL'INFLUENZA DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO PER IL BACINO SOTTERRANEO ADDA-TICINO

Relatore: Prof. Luca ALBERTI

Correlatore: Dott. Ing. Pietro MAZZON

Tesi di Laurea di:

Marcello CAPELLI

Matricola 928416

Anno Accademico 2020 – 2021

Indice

Indice delle figure.....	III
Indice delle tabelle.....	VII
Sommario.....	IX
Abstract.....	XI
Introduzione.....	1
1 Richiami teorici.....	7
1.1 Principi di idrogeologia.....	7
1.2 Introduzione ai modelli di flusso.....	12
1.2.1 Equazioni governanti.....	14
1.2.2 Codice di calcolo.....	16
1.2.3 Condizioni al contorno.....	21
1.3 Stima della ricarica verticale: codice Soil Water Balance (SWB).....	25
1.3.1 Dati richiesti in input.....	27
2 Inquadramento dell'area di studio.....	35
2.1 Inquadramento geologico ed idrogeologico.....	36
2.2 Inquadramento idrografico.....	40
2.3 Inquadramento climatico.....	42
3 Implementazione del modello di flusso.....	45
3.1 Discretizzazione spaziale del dominio.....	45
3.2 Discretizzazione temporale.....	47
3.3 Condizioni al contorno.....	47
3.3.1 Implementazione delle condizioni di Cauchy.....	49
3.4 Condizioni interne.....	50
3.4.1 Reticolo idrologico.....	50
3.4.2 Canali irrigui.....	51
3.4.3 Fontanili.....	52
3.4.4 Pozzi di prelievo.....	52
3.4.5 Ricarica.....	53
3.5 Proprietà idrogeologiche.....	55
3.5.1 Conducibilità idraulica.....	55

3.5.2	Porosità.....	56
3.6	Risultati del modello.....	56
4	Influenza delle condizioni al contorno sui risultati del modello.....	59
4.1	Variazione dei carichi di Adda e Ticino	60
4.2	Variazione dei carichi a Nord e Sud	64
4.3	Variazione della ricarica irrigua	68
5	Scenari futuri della risorsa irrigua.....	73
5.1	Scenario A: riduzione del 15% della ricarica irrigua	76
5.2	Scenario B: riduzione del 30% della ricarica irrigua	79
5.3	Scenario C: riduzione del 50% della ricarica irrigua	81
5.4	Confronto tra i risultati dei diversi scenari di riduzione di ricarica irrigua	83
6	Aggiornamento del modello di flusso.....	87
6.1	Selezione del dataset.....	87
6.2	Scelta del metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione	89
6.3	Ottimizzazione dei file GRID in input a SWB	91
6.3.1	<i>Hydrologic Soil Group (HSG)</i>	91
6.3.2	<i>Available Water Capacity (AWC)</i>	93
6.3.3	<i>Land use/cover</i>	95
6.3.4	Sensibilità della ricarica meteorica all'aggiornamento degli input	97
6.4	Suddivisione spaziale dei valori di ricarica meteorica.....	98
6.5	Ricarica effettiva	99
6.6	Risultati del modello.....	101
	Conclusioni.....	105
	Bibliografia	109

Indice delle figure

Figura 1: Evoluzione dei livelli di falda sottostanti la città di Milano dal 1975 al 2015 in funzione dei volumi di acqua emunti [1]	1
Figura 2: Sfruttamento dei diversi metodi irrigui nella pianura lombarda (ISTAT, 2000)	4
Figura 3: Spessore saturo nei diversi tipi di acquiferi [10]	9
Figura 4: Diagramma di Eckis [10]	10
Figura 5: Piezometria stazionaria in condizioni statiche [10]	14
Figura 6: Piezometria stazionaria in condizioni dinamiche [10]	14
Figura 7: Rappresentazione di un volume elementare di acquifero [10].....	15
Figura 8: Esempio di un dominio discretizzato con griglia regolare in MODFLOW [2].....	16
Figura 9: Indicizzazione delle celle adiacenti alla cella i, j, k [10].....	17
Figura 10: Esempio di calcolo del flusso tra due celle adiacenti [2].....	18
Figura 11: Diagramma rappresentante il processo di calcolo iterativo eseguito da MODFLOW [2]	20
Figura 12: Schema di funzionamento della GHB	23
Figura 13: Schema di funzionamento della condizione RIV	24
Figura 14: Dati richiesti in input da SWB per il calcolo della ricarica meteorica [12].....	27
Figura 15: Esempio di file tabulato contenente i dati climatici necessari a SWB [12]	28
Figura 16: Dati richiesti in input a SWB in funzione del metodo selezionato per il calcolo dell'ET [12]	28
Figura 17: Gruppi idrologici del suolo secondo l'NCRS [12].....	29
Figura 18: Valori tabellati di AWC in funzione della tipologia di terreno [12]	30
Figura 19: Dati contenuti nella tabella di associazione [12]	31
Figura 20: Inquadramento dell'area di studio	35
Figura 21: Andamento demografico della popolazione residente nel Comune di Milano dal 2001 al 2019 (ISTAT)	36
Figura 22: Sezione idrogeologica 5 (N-S) dell'area di studio. La traccia della sezione è mostrata nelle relazioni del progetto MODEL-MI [23]	39
Figura 23: Reta idrografica dell'area di studio.....	41
Figura 24: Andamento medio delle precipitazioni massime giornaliere negli ultimi 50 anni (ISPRA. 2012).....	42

Figura 25: Precipitazione mensile cumulata media degli anni 2014-2018 registrati nella stazione meteorologica di Lambrate	43
Figura 26: Discretizzazione orizzontale del modello di flusso [3]	46
Figura 27: Discretizzazione verticale del modello di flusso in una sezione N-S [3]	46
Figura 28: Livelli idrometrici del fiume Adda misurati in tre diverse stazioni idrometriche [3]	48
Figura 29: Livelli idrometrici del fiume Ticino misurati in tre diverse stazioni idrometriche [3]	48
Figura 30: Reticolo idrologico presente nel dominio di modellazione [3]	50
Figura 31: Canali irrigui presenti nel dominio di modellazione [3]	51
Figura 32: Ubicazione degli elementi analitici rappresentanti i pozzi [3]	53
Figura 33: Classificazione dell'uso del suolo del dominio di modellazione [3].....	54
Figura 34: Distinzione dei diversi comprensori in cui è stata applicata la ricarica irrigua [3]	55
Figura 35: Ubicazione dei target implementati all'interno del dominio di modellazione [3].....	57
Figura 36: Scatter plot dei valori osservati e simulati [3].....	58
Figura 37: Ubicazione dei punti di monitoraggio considerati per lo studio dei carichi nel tempo..	60
Figura 38: Schermata di GV7 in cui inserire i valori desiderati per svolgere l'analisi di sensitività automatica	61
Figura 39: Schermata di GV7 in cui inserire i valori per modificare i carichi delle condizioni al contorno.....	62
Figura 40: Variazione del carico idraulico relativi ad una variazione di -1.5m (a, c, e) e +1.5m (b, d, f) del fiume Ticino (a, b), del fiume Adda (c, d) e di entrambi (e, f)	63
Figura 41: Variazione del carico idraulico relativi ad una variazione di -1.5m (a, c, e) e +1.5m (b, d, f) della condizione a Nord (a, b), a Sud (c, d) e di entrambe (e, f)	65
Figura 42: Andamento dei livelli piezometrici nel tempo nei punti di monitoraggio ubicati nelle stazioni metropolitane di Bignami (a, c, e) e Famagosta (b, d, f) per diverse variazioni di carico, ovvero dall'alto al basso solo a Nord, solo a Sud ed entrambe	67
Figura 43: Variazione del carico idraulico per gli SP 17 (a), 18 (b), 19 (c) e 20 (d) relativi ad una riduzione del 15% della ricarica irrigua	69
Figura 44: Variazione del carico idraulico per gli SP 17 (a), 18 (b), 19 (c) e 20 (d) relativi ad una riduzione del 30% della ricarica irrigua	70
Figura 45: Andamento dei livelli piezometrici nel tempo nei pozzi di monitoraggio "o64", "o4", "o106" e "o115"	71
Figura 46: Ubicazione dei 115 punti di monitoraggio dell'acquifero superficiale (A) nel progetto MODEL-MI; in rosso sono riportati quelli utilizzati in questo elaborato di tesi per la valutazione dei risultati degli scenari	76

Figura 47: Scenario A: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b).....	78
Figura 48: Scenario B: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b).....	80
Figura 49: Scenario C: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b).....	82
Figura 50: Previsione dell'andamento dei livelli di falda per gli scenari di variazione di ricarica irrigua nel periodo 2018-2048.....	84
Figura 51: Ubicazione delle tre stazioni meteorologiche considerate per il calcolo della ricarica..	88
Figura 52: Valori di ricarica ottenuti utilizzando, per ogni metodo, prima i soli valori obbligatori (in blu) e poi anche i valori opzionali (in arancio) per le stazioni di Lambrate (a) e Busto Arsizio (b)..	90
Figura 53: Classificazione dei gruppi idrologici dei diversi terreni presenti nel dominio di modellazione.....	93
Figura 54: Tabella di Thornthwaite riportante i valori di AWC per ogni tipologia di suolo	93
Figura 55: Classificazione della capacità idrica delle diverse tipologie di suolo presenti nel dominio di modellazione	95
Figura 56: Classificazione dell'uso del suolo del dominio di modellazione.....	96
Figura 57: Valori di ricarica meteorica ottenuti aggiornando progressivamente il file HSG, il file AWC e quello relativo al Land cover per gli anni 2014 (a, c, e) e 2018 (b, d, f)	97
Figura 58: Zone di assegnazione dei valori di ricarica meteorica	99
Figura 59: Distribuzione dei valori di ricarica del modello originale (a) e di quello aggiornato (b)	100
Figura 60: Ubicazione dei target analizzati	102
Figura 61: Confronto dei livelli di falda dei due modelli con i valori osservati	103

Indice delle tabelle

Tabella 1: Descrizione geologica del sottosuolo della Città Metropolitana di Milano [23].....	37
Tabella 2: Suddivisione di un anno di simulazione in 4 Stress Period rappresentativi.....	47
Tabella 3: Derivazione canali per ogni Stress Period durante il corso di un anno	52
Tabella 4: Indici statistici della simulazione.....	57
Tabella 5: Valori delle variazioni imposte alle condizioni al contorno	59
Tabella 6: Elenco degli scenari previsionali analizzati da MM	73
Tabella 7: Scenari previsionali di riduzione dell'apporto della ricarica irrigua	74
Tabella 8: Dati richiesti dai vari metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione	89
Tabella 9: Classificazione HSG delle diverse tipologie di terreno	92
Tabella 10: Valori di AWC [in/ft] per ogni tipologia di suolo	94
Tabella 11: Classificazione dell'uso del suolo all'interno del DUSAF e in SWB	96
Tabella 12: Principali indici statistici del modello di flusso di partenza e di quello aggiornato	101

Sommario

La gestione quantitativa della risorsa idrica sotterranea è un tema di notevole importanza per gli anni futuri in relazione ai potenziali effetti dei cambiamenti climatici attesi. I modelli numerici di flusso, in grado di rappresentare le complesse relazioni presenti tra i diversi corpi idrici, risultano essere strumenti utili per la valutazione quantitativa delle risorse idriche sotterranee attuale e futura. Tali modelli possono supportare i gestori delle acque e gli enti legislatori nei processi gestionali per le scelte strategiche da intraprendere nei prossimi anni. Il presente elaborato ha l'obiettivo di valutare le performance di un modello a scala di bacino, elaborato durante il progetto MODEL-MI dal Politecnico di Milano in collaborazione con Metropolitana Milanese spa, in funzione delle condizioni al contorno e condizioni interne e successivamente utilizzarlo per simulare scenari futuri al variare delle condizioni stesse. In prima istanza, sono state fatte variare singolarmente le condizioni ai bordi del modello e la ricarica irrigua, valutando le variazioni del carico simulato rispetto alle condizioni iniziali, ponendo particolare interesse all'area del Comune di Milano. Successivamente, l'orizzonte di simulazione è stato ampliato fino al 2048 e sono stati simulati diversi scenari di riduzione della ricarica irrigua, valutando nuovamente le variazioni di carico rispetto ad una situazione senza variazioni di questa componente. Infine, con lo scopo di migliorare il modello numerico, è stata fatta una nuova valutazione dei valori di ricarica verticale mediante il *software* Soil Water Balance, utilizzando una classificazione delle caratteristiche dei terreni e dei parametri meteorologici più dettagliata rispetto alla stima iniziale, che ha portato ad una miglior rappresentazione del fenomeno con conseguente miglioramento della qualità e rappresentatività del modello. Queste analisi hanno permesso di comprendere come il modello subisca una grande influenza da parte delle condizioni al contorno di monte e di valle e specialmente delle condizioni interne (ricarica irrigua), anche nella zona di Milano. Pertanto, risulta necessario stimare accuratamente il comportamento delle condizioni al contorno, soprattutto per l'implementazione di modelli previsionali. I risultati dei modelli previsionali mostrano come il mantenimento delle pratiche irrigue tradizionali siano cruciali per la ricarica dell'acquifero superficiale presente tra Adda e Ticino e possono essere utili anche come strumento di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Abstract

The quantitative management of the groundwater resource is a topic of considerable importance for the years to come in relation to the potential effects of expected climate change. Numerical models, able to represent the complex relationships between different water bodies, are useful tools for the quantitative assessment of current and future groundwater resources. These models can be used by water managers as decision-making support tool for the strategic choices to be made in the coming years. This paper aims to evaluate the performance of a basin-scale model, developed in the MODEL-MI project by Politecnico di Milano in collaboration with Metropolitana Milanese spa, depending on the boundary and internal conditions; then it has been used to simulate future scenarios changing the conditions themselves. Firstly, the conditions at the model's boundaries and the irrigation recharge were individually varied, evaluating the variations of the simulated heads compared to the initial conditions, focusing on the municipality of Milan. Subsequently, the simulation horizon was extended up to 2048 and different scenarios for the reduction of irrigation recharge were simulated, evaluating the heads variations with respect to a situation without variations of this component. First, with the aim of improving the numerical model, a new evaluation of the vertical recharge values was performed using the Soil Water Balance software, considering a more detailed classification of the soil characteristics and meteorological parameters than the initial estimate; this led to a better explanation of the phenomenon resulting in an improvement in the quality and representativeness of the model. These analyses allow to understand how the model is greatly influenced by the boundary conditions and especially by the internal conditions (irrigation recharge), also in the Milan area. Therefore, it is necessary to accurately estimate the behavior of boundary conditions, especially for the implementation of forecasting models. The results of forecast models show how the maintenance of traditional irrigation practices is crucial for recharging the surface aquifer present between Adda and Ticino rivers and can also be useful as a tool for mitigating climate change effects.

Introduzione

Dal primo dopoguerra fino ad oggi, i livelli idrici della falda sottostante la città di Milano sono stati soggetti a notevoli variazioni [1]. In particolare, fino agli anni '50 la falda presentava livelli simili a quelli naturali, con una soggiacenza a pochi metri dal piano campagna. Dal 1955 al 1970, il boom economico e il conseguente aumento dei consumi legati alla realizzazione di grandi poli industriali e l'incremento demografico hanno portato ad un abbassamento medio della falda di circa 15 m. A partire dagli anni '90, invece, in conseguenza del decentramento delle principali industrie e dello spostamento di parte dei residenti in provincia, i volumi di acqua emunti dai pozzi sono diminuiti portando ad innalzamenti dei livelli di falda (Figura 1).

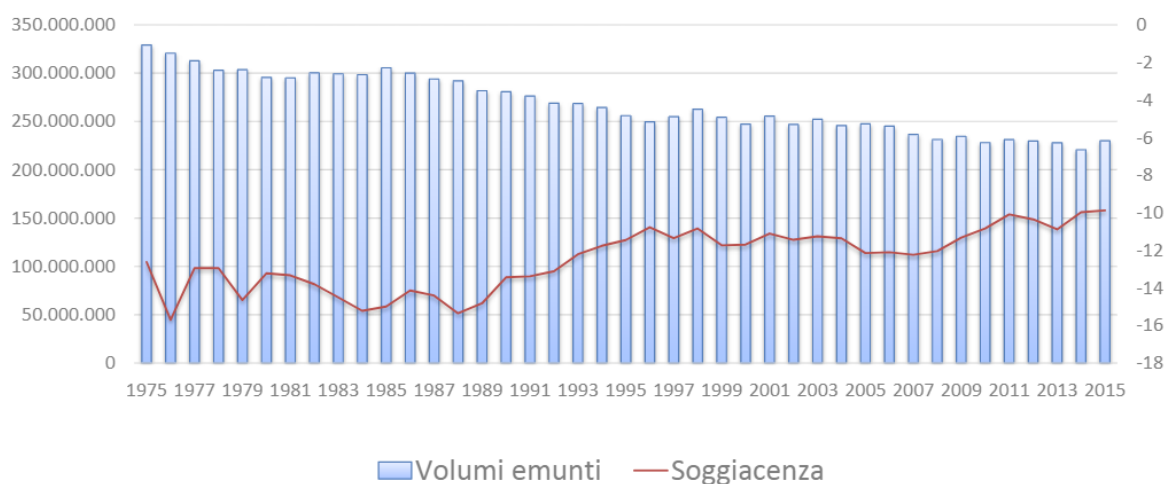


Figura 1: Evoluzione dei livelli di falda sottostanti la città di Milano dal 1975 al 2015 in funzione dei volumi di acqua emunti [1]

Nell'area del milanese, l'approvvigionamento idropotabile viene completamente sopperito dalla risorsa idrica sotterranea. Nella città di Milano sono presenti 29 centrali di pompaggio attive che estraggono grandi volumi di acqua dai primi tre acquiferi presenti al di sotto della città (209'026'919 m³ nel 2020 pari a circa 6'500 l/s); pertanto, i prelievi nell'area risultano avere discrete entità e hanno un'importante influenza sui livelli della falda.

Nonostante le fluttuazioni dei livelli di falda nell'area del Milanese siano principalmente dovute alla componente meteorica della precipitazione e dai prelievi dei pozzi pubblici e privati, esiste un ulteriore fattore che incide sull'andamento stagionale dei livelli di falda: le pratiche irrigue.

Data l'abbondanza di acque superficiali della Regione Lombardia, la ricarica irrigua è stata sempre considerata un elemento costante, non soggetto a particolari fluttuazioni da un anno all'altro e temporalmente indefinitamente disponibile. Tuttavia, eventi meteoroclimatici quali quelli del 2003 e del 2006, hanno messo gli enti gestori di fronte al fatto che la disponibilità di acqua irrigua potrebbe essere in futuro limitata dagli effetti dei cambiamenti climatici e dal conseguente scioglimento dei ghiacciai alpini. Negli ultimi anni è nata quindi l'esigenza di monitorare e prevedere l'impatto che i diversi fattori possono avere sui livelli piezometrici in modo da raccogliere gli elementi utili alla ricostruzione di un modello concettuale indispensabile per la corretta gestione della risorsa idrica sotterranea e la determinazione delle future scelte politiche in materia di sistemi irrigui, progettazione di nuove infrastrutture e servizi pubblici per l'uso della risorsa idrica sotterranea. In questo contesto, lo sviluppo di modelli di flusso numerici in grado di rappresentare le complesse relazioni esistenti tra ricarica meteorica, ricarica antropica, corpi idrici superficiali e sotterranei è uno strumento efficace ed indispensabile per la previsione dei livelli piezometrici delle falde acquifere e per supportare le politiche di adattamento e resilienza ai cambiamenti climatici previsti. Spesso si parla di risparmio idrico e impropriamente è opinione comune, dai mezzi di informazione ai politici, che i sistemi irrigui a scorrimento adottati in Lombardia determinano un grande spreco di acqua e debbano essere sostituiti. In realtà come mostrato in questa tesi, esiste una forte dipendenza tra disponibilità della risorsa idrica sotterranea e metodi irrigui, pertanto il cambiamento di questi ultimi deve essere attentamente ponderato da parte degli enti decisori.

In questo elaborato di tesi è stato utilizzato il modello di flusso realizzato dal Politecnico di Milano, nell'ambito del progetto MODEL-MI, in collaborazione con Metropolitana Milanese (MM), in cui è stato definito il modello concettuale e matematico del territorio compreso tra i fiumi Adda e Ticino. Tale modello, implementato tramite il codice di calcolo MODFLOW [2], è fondamentale per la descrizione del flusso idrico sotterraneo ed è ad oggi lo strumento principale per la previsione degli andamenti dei carichi nell'area comprendente la città di Milano e i comuni limitrofi. Scenari previsionali in funzione dell'evoluzione socio-economica (prelievo dei pozzi) e climatica (andamenti di temperatura e precipitazione) sono già stati ampiamente valutati in studi precedenti [3] [4] [5]; in questo elaborato è stata invece effettuata una prima valutazione dell'impatto che una riduzione della quantità d'acqua impiegata per l'irrigazione può avere sui livelli di falda nei prossimi 30 anni. Infatti, le crescenti pressioni cui sono sottoposte le risorse idriche europee determinano scarsità d'acqua; i cambiamenti climatici, le condizioni meteorologiche imprevedibili ed episodi sempre più frequenti di siccità stanno contribuendo in misura significativa all'esaurimento delle riserve di

acqua dolce dovuto all'agricoltura e allo sviluppo urbano [6]. Si stima che lo spreco di acqua in Europa, dovuto alle perdite nelle reti idriche e all'irrigazione eccessiva e poco efficiente, sia compreso tra il 20% e il 40% delle risorse idriche disponibili. Focalizzando l'attenzione sull'agricoltura, le misure dirette a favorire un uso più sostenibile dell'acqua prevedono l'impiego mirato di finanziamenti per promuovere il risparmio idrico a favore di pratiche agricole sostenibili e di un'irrigazione più efficiente [7]. La domanda a cui questa tesi vuole dare una prima risposta è se una politica di questo tipo avrebbe o meno effetti positivi sulla disponibilità di risorse idriche nella pianura milanese compresa tra i fiumi Ticino e Adda.

Ad oggi esistono diverse metodologie d'irrigazione aventi caratteristiche e quindi efficienze diverse; i principali sono elencati di seguito [8]:

- **Sommersione:** consiste nel coprire il terreno con uno strato di acqua di adeguato spessore, che vi permane per un periodo di tempo più o meno lungo (sommersione permanente o temporanea). Richiede terreni poco permeabili, sistemazioni e manutenzioni spesso onerose e quantità d'acqua consistenti. È il metodo tipico delle risaie;
- **Scorrimento:** prevede che un velo di acqua scorra continuamente su tutta la superficie del terreno. Richiede notevoli portate e una sistemazione di superficie generalmente molto costosa e accurata che dovrebbe consentire l'assorbimento uniforme dell'apporto irriguo in tutta la superficie irrigata. Il metodo, soprattutto nelle sistemazioni tradizionali, ha una bassa efficienza irrigua ma consente modeste spese per la distribuzione dell'acqua. È il metodo tipico delle coltivazioni di mais e per le praterie;
- **Aspersione:** l'acqua è erogata sotto forma di pioggia artificiale mediante irrigatori alimentati da condotte in pressione. Questo sistema presenta alcuni vantaggi rispetto ai metodi tradizionali come la minore necessità di sistemazione degli appezzamenti e la possibilità di irrigare terreni collinari, elevata efficienza di adacquamento e la possibilità di effettuare l'irrigazione polivalente;
- **Microirrigazione:** prevede l'erogazione localizzata di piccoli volumi d'acqua somministrati con frequenza elevata. I vantaggi di tale tecnica sono legati soprattutto al notevole risparmio d'acqua dal momento che vengono limitate al massimo le perdite per evaporazione, sono da evidenziare inoltre la minimizzazione dei fenomeni erosivi, la riduzione del costipamento, la possibilità di automazione ed il limitato consumo

energetico. Essa è particolarmente adatta per le colture arboree e per l'irrigazione in serra o in paesi aridi.

Come mostrato in *Figura 2*, le pratiche irrigue maggiormente utilizzate nella zona di interesse (porzione occidentale della Lombardia) sono quelli a scorrimento superficiale e a sommersione in quanto mais, riso e prati permanenti rappresentano le coltivazioni prevalenti nell'area circostante la città di Milano. L'aspersione è utilizzata in genere nei territori di più recente irrigazione (Nord di Milano), a causa sia della minor disponibilità d'acqua, sia della natura e della giacitura dei terreni che rendono difficoltosa la pratica irrigua per scorrimento. L'utilizzo della microirrigazione, invece, è molto ridotto e limitato alle zone in cui è prevalente l'ortoflorovivaismo [9].

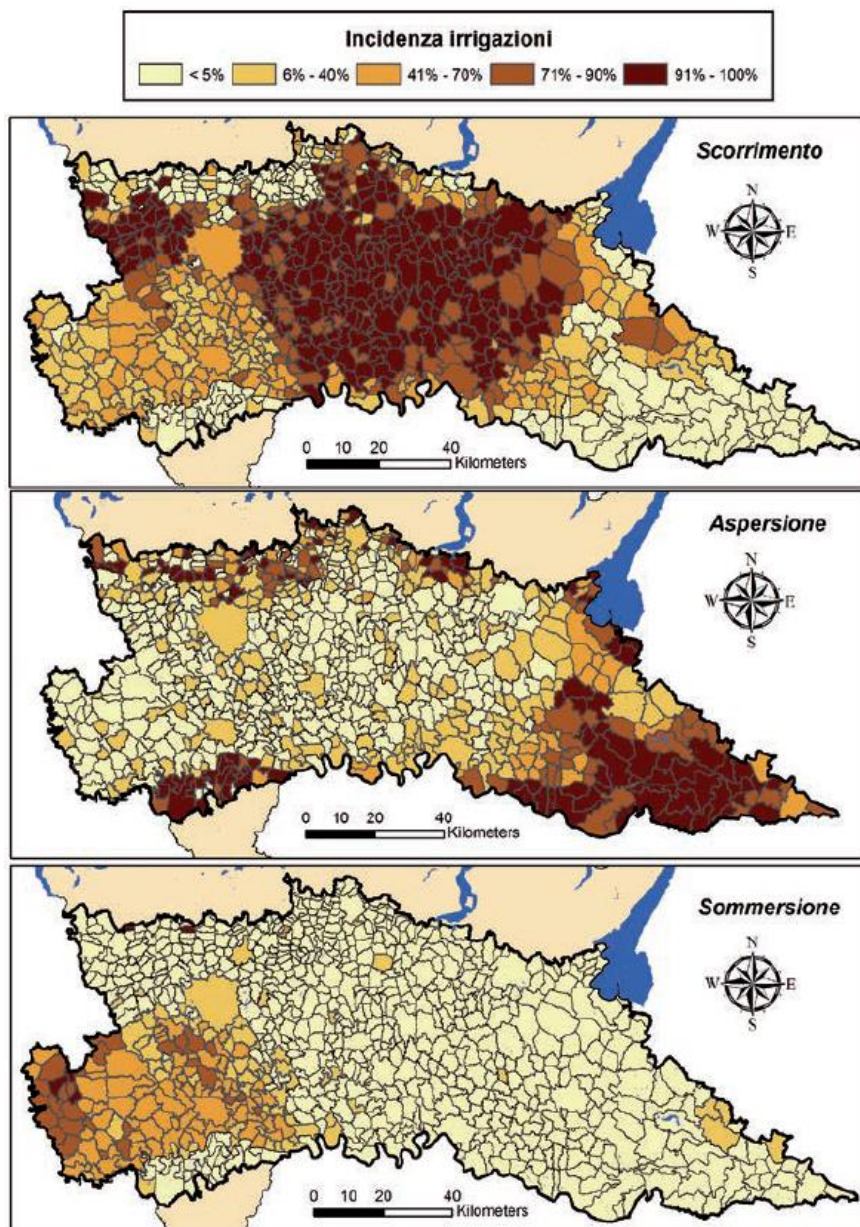


Figura 2: Sfruttamento dei diversi metodi irrigui nella pianura lombarda (ISTAT, 2000)

Nel presente lavoro di tesi è stata in primo luogo valutata l'influenza che le condizioni al contorno implementate nel modello di flusso esercitano sui carichi simulati all'interno del Comune di Milano. In seguito, ipotizzando un futuro perfezionamento ed efficientamento dei metodi irrigui incentivato da direttive europee, con lo scopo di limitare lo spreco di acqua, sono stati valutati gli effetti che scenari futuri di riduzione della ricarica irrigua possono avere sui livelli di falda. Infine, è stato aggiornato il calcolo della ricarica meteorica utilizzando un maggior dettaglio rispetto al modello di partenza, con l'obiettivo di ottenere simulazioni dei carichi piezometrici più fedeli alla realtà.

1 Richiami teorici

Nel seguente capitolo, vengono riportati e descritti i principali parametri idrogeologici e, in secondo luogo, la teoria relativa ai *software* MODFLOW e SWB (Soil Water Balance) utilizzati per lo svolgimento del presente elaborato di tesi.

1.1 Principi di idrogeologia

Si definisce sistema idrologico un sistema dinamico che rappresenta una frazione del ciclo globale dell'acqua. L'acqua che precipita sul territorio può essere soggetta a tre fenomeni differenti:

- Ruscamento: a seconda della permeabilità del terreno e delle pendenze che caratterizzano il sistema, le particelle di acqua, rimanendo in superficie, contribuiscono ad alimentare diversi corpi idrici superficiali;
- Evapotraspirazione: la porzione di acqua meteorica che viene intercettata dalla vegetazione, torna nell'atmosfera sottoforma di vapore acqueo in funzione dei valori di temperatura, velocità del vento, umidità e radiazione solare;
- Infiltrazione: una parte dell'acqua è invece in grado di percolare nel terreno andando ad alimentare la falda sotterranea.

Il sistema idrologico è quindi un sistema caratterizzato da un dominio fisico finito, delimitato da confini fisici ed idrologici, in cui più elementi sono in collegamento idrodinamico tra loro.

La porzione del sistema idrologico situata al di sotto del piano campagna, prende il nome di bacino idrogeologico e costituisce il dominio delle acque sotterranee. Esso è caratterizzato dalla presenza di due zone differenti:

- Zona insatura: i vuoti presenti nella matrice porosa presentano un grado di saturazione contenuto in funzione della zona geografica e dal tipo di attività antropica che caratterizza l'area;
- Zona satura: porzione del sottosuolo caratterizzata da un grado di saturazione massimo, delimitata superiormente dalla superficie freatica.

Il bacino idrogeologico può ospitare più acquiferi, definiti come porzioni più permeabili del sottosuolo all'interno dei quali si osserva il libero defluire dell'acqua. È importante sottolineare la distinzione tra acquifero e falda: il primo costituisce lo spazio fisico ospitante l'acqua sotterranea, la seconda costituisce l'acqua sotterranea stessa. possono essere definite due tipologie di falda: falda libera e confinata. La falda libera è limitata da strati meno permeabili solo inferiormente e dunque la tavola d'acqua risulta libera di variare nel corso delle stagioni. La falda confinata invece, risulta limitata sia superiormente che inferiormente da strati poco permeabili.

A seconda del contrasto di permeabilità tra acquifero e strato di separazione, si parla di:

- Aquiclude: elevata differenza di permeabilità, si osserva un confinamento idraulico;
- Aquitard: modesta differenza di permeabilità dovuta a spessori contenuti, a discontinuità (lenti di argilla) o a permeabilità maggiori; confinamento idraulico non garantito.

Di seguito vengono descritti i principali parametri idrogeologici e la Legge di Darcy, utili per la descrizione dei fenomeni che avvengono all'interno del bacino idrogeologico.

CONDUCIBILITÀ IDRAULICA

La conducibilità idraulica è definita come la capacità di un mezzo poroso di lasciarsi attraversare da un fluido. Essa dipende sia dalle caratteristiche del mezzo poroso (permeabilità intrinseca), sia da quelle dinamiche del fluido in circolazione (equazione [1.1]):

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad [1.1]$$

Dove K è la conducibilità idraulica (m/sec), k è la permeabilità intrinseca del mezzo (mD dove $D = 0.986 \times 10^{-12} m^2$), g è l'accelerazione di gravità pari a $9.809 m/sec^2$, ρ è la densità (Kg/m^3) e μ è la viscosità ($Nsec/m^2$).

Di norma, la permeabilità viene considerata dipendente dalle sole caratteristiche del mezzo poroso ma, se le proprietà dell'acqua variano nello spazio e nel tempo, allora è opportuno considerare l'espressione generalizzata.

TRASMISSIVITÀ E SPESSORE SATURO

La trasmissività è un parametro che rappresenta il flusso per unità di larghezza dell'acquifero e che è legato alla produttività di captazione dell'acquifero stesso. Essa è misurata in m^2/sec e dipende dalla conducibilità idraulica K e dallo spessore saturo e (m) (equazione [1.2]):

$$T = Ke \quad [1.2]$$

Lo spessore saturo è un parametro legato al tipo di acquifero a cui si fa riferimento. Come riportato in *Figura 3*, se si considera un acquifero libero, lo spessore saturo coincide con lo spessore della falda, mentre, in caso di acquifero confinato, lo spessore saturo coincide con lo spessore dell'acquifero.

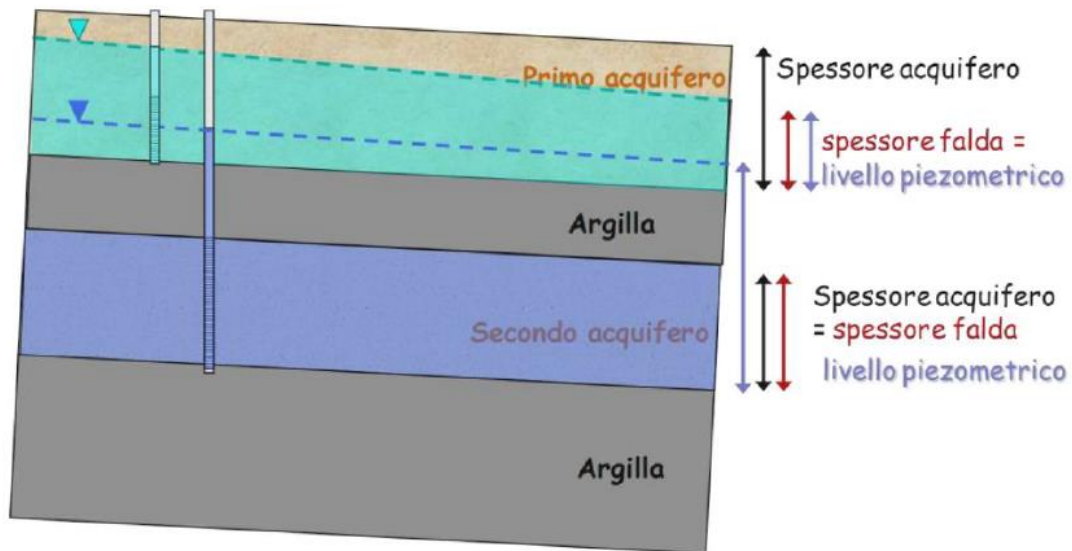


Figura 3: Spessore saturo nei diversi tipi di acquiferi [10]

POROSITÀ

Esistono due tipi di porosità: porosità totale e porosità efficace.

La porosità totale rappresenta la percentuale dei volumi dei vuoti rispetto al volume totale del terreno. La porosità totale è definita dall'equazione [1.3]:

$$n = \frac{V_v}{V_{tot}} \quad [1.3]$$

La porosità efficace, invece, rappresenta la percentuale del volume totale dei vuoti che ospitano acqua libera di spostarsi per effetto della gravità, rispetto al volume totale del campione di terreno considerato (equazione [1.4]):

$$n_e = \frac{V_{v,acqua\ libera}}{V_{tot}} \quad [1.4]$$

La porosità efficace risulta quindi sempre minore o al più uguale alla porosità totale.

La differenza tra porosità totale e porosità efficace definisce la capacità di ritenzione, ossia la capacità del terreno di trattenere al suo interno un certo quantitativo d'acqua. In *Figura 4* è riportato il diagramma di Eckis, in cui al variare della granulometria dei materiali sono rappresentate le relazioni tra porosità totale, porosità efficace e capacità di ritenzione.

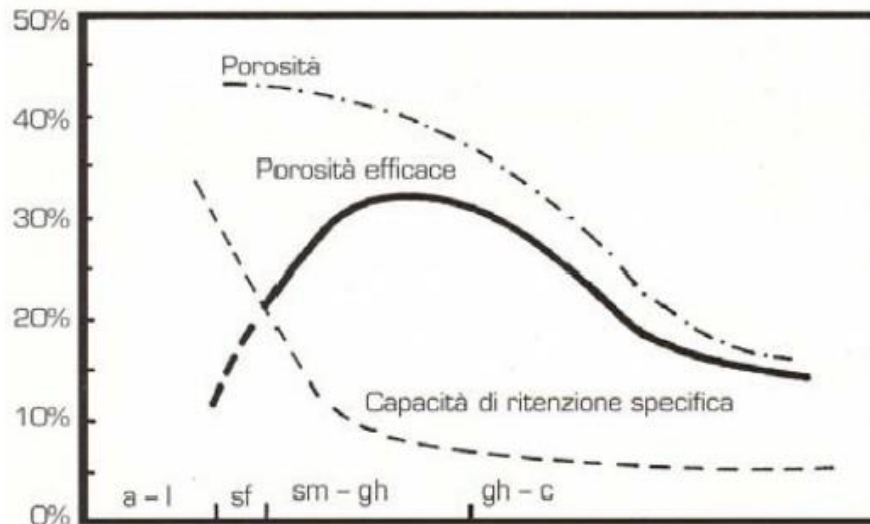


Figura 4: Diagramma di Eckis [10]

È interessante notare come le argille siano caratterizzate da un'elevata porosità totale ma una porosità efficace molto ridotta. Si raggiungono massimi valori di porosità efficace per materiali ghiaiosi molto puliti, cioè con poca matrice fine.

IMMAGAZZINAMENTO

L'immagazzinamento è definito come la capacità di un acquifero di immagazzinare acqua nei pori tra loro interconnessi. Quando in un acquifero si hanno variazioni di carico, l'acqua viene accumulata o rilasciata dai pori; pertanto, si ha un trasferimento di acqua nel tempo. Quando tale trasferimento di acqua si arresta, il sistema raggiunge un nuovo equilibrio e i livelli piezometrici raggiungono una condizione stazionaria. Nel caso di acquiferi liberi, il meccanismo di immagazzinamento è principalmente legato alla porosità mentre, per acquiferi confinati risulta essere legato alla variazione di dimensione dei pori per l'elasticità della matrice solida.

È un parametro fondamentale per le analisi in transitorio, in quanto descrive la capacità dell'acquifero di trasferire acqua. possono essere definiti tre diversi parametri: immagazzinamento specifico, coefficiente di immagazzinamento e Specific Yield.

L'immagazzinamento specifico (Specific Storage) S_s ($1/m$) è definito come il rapporto tra il volume d'acqua liberato (V_w) da un'unità di volume di acquifero ($V_{acquifero}$) e la variazione di carico idraulico (ΔH) a cui è dovuta la liberazione o l'immagazzinamento stesso (equazione [1.5]):

$$S_s = \frac{V_w}{\Delta H V_{acquifero}} \quad [1.5]$$

Il coefficiente di immagazzinamento S è un numero adimensionale definito dal prodotto tra l'immagazzinamento specifico e lo spessore saturo dell'acquifero. Esprime il quantitativo di acqua rilasciato da una porzione di acquifero avente base unitaria per una variazione unitaria del carico idraulico (equazione [1.6]):

$$S = S_s e \quad [1.6]$$

Lo Specific Yield S_y è un valore che in materiali a granulometria grossolana coincide con la porosità efficace ed è calcolato come il rapporto tra il volume d'acqua contenuta nel volume di acquifero considerato e il volume totale della porzione di acquifero (equazione [1.7]):

$$S_y = \frac{V_w}{V_{acquifero}} \quad [1.7]$$

LEGGE DI DARCY

La legge di Darcy venne formulata nel 1856 dall'ingegnere francese Henry Darcy e descrive il moto dell'acqua all'interno di un mezzo poroso (equazione [1.8]). Questa equazione mette in relazione il flusso, il gradiente idraulico e la sezione del tubo di flusso mediante una costante di proporzionalità detta conducibilità idraulica o permeabilità (K).

$$Q = -KA \frac{\Delta H}{\Delta l} \quad [1.8]$$

Dove Q rappresenta il flusso di acqua (m^3/sec), K è la permeabilità (m/sec), A è la sezione del tubo di flusso (m), ΔH è la differenza di carico idraulico in due punti (m) e Δl è la distanza tra i punti stessi (m). il rapporto tra ΔH e Δl è chiamato gradiente idraulico ed è indicato con la lettera i .

Nel caso tridimensionale di mezzo poroso isotropo e di flusso stazionario, la relazione diventa:

$$\vec{Q} = -KA \overrightarrow{grad}(h) \quad [1.9]$$

La generalizzazione della legge di Darcy nel caso di flusso stazionario e di mezzo anisotropo implica la definizione di un tensore del secondo ordine \mathbf{K} , ovvero una matrice 3x3 che contenga i valori della permeabilità nelle tre direzioni:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad [1.10]$$

1.2 Introduzione ai modelli di flusso

È possibile fare una distinzione tra modelli fisici e modelli matematici. I primi hanno l'obiettivo di simulare condizioni reali mediante modelli definiti in laboratorio a piccola o media scala per poter riprodurre il fenomeno reale e analizzarne l'evoluzione. I modelli matematici invece simulano la distribuzione dei carichi piezometrici e quindi il flusso di falda, attraverso un sistema di equazioni.

Dal punto di vista matematico, i modelli possono essere risolti analiticamente o numericamente. Si parla di modelli analitici nel caso in cui vengano utilizzate condizioni semplificate, come per esempio un mezzo poroso omogeneo ed isotropo. I modelli numerici invece, sono più articolati in quanto permettono di considerare tutte le complessità del sistema acquifero. È quindi necessario discretizzare in orizzontale e in verticale il dominio di interesse in più celle che corrispondono ad elementi unitari ed omogenei ai quali vengono assegnate set di equazioni che permettono di risolvere il problema in termini di carichi e quindi di flussi.

La risoluzione di un modello matematico avviene per mezzo di un codice di calcolo che è l'insieme delle operazioni computazionali utilizzate per risolvere le equazioni di flusso.

I modelli numerici possono essere risolti attraverso differenti metodi, i due più diffusi sono:

- Metodo di risoluzione alle differenze finite: la discretizzazione avviene attraverso una griglia di celle rettangolari o quadrate. Le condizioni e le proprietà che si implementano sono considerate omogenee all'interno di ogni cella e vengono attribuite al nodo centrale. Il codice di calcolo che sfrutta le differenze finite più diffuso è MODFLOW [2];
- Metodo di risoluzione agli elementi finiti: la discretizzazione avviene attraverso elementi 2D o 3D che possono essere di diverse forme; le condizioni e le proprietà

possono variare da nodo a nodo sulla base di funzioni di interpolazione. Il codice di calcolo che impiega tale metodo più diffuso è FEFLOW [11].

Per quanto riguarda il fattore tempo, i modelli numerici si distinguono in stazionari e transitori.

Nei modelli stazionari il fattore tempo non ricopre alcun ruolo, i risultati sono significativi delle condizioni medie di equilibrio del sistema quando esso arriva ad una stazionarietà.

Nei modelli in transitorio invece è necessaria anche la discretizzazione del fattore tempo. La loro implementazione richiede un carico computazionale più elevato in quanto è necessario fornire un maggior numero di parametri in input (porosità, immagazzinamento specifico, coefficiente di immagazzinamento e Specific Yield). La discretizzazione temporale viene eseguita attraverso la definizione degli *Stress Period* (SP), dei *Time Step* e dei *Time Step Multiplier*:

- Gli *Stress Period* sono definiti come intervalli temporali, costituiti da uno o più *Time Step*, durante i quali le forzanti implementate nel modello risultano costanti (e.g. la portata estratta da un pozzo o la ricarica verticale in una data zona);
- Il *Time Step* è definito come la lunghezza temporale ottenuta dalla suddivisione totale della simulazione in passi temporali. Al termine di ciascun *Time Step*, il modello fornisce una soluzione dell'equazione di flusso;
- Il *Time Step Multiplier* è un fattore che varia tra 1.2 e 1.5. Esso viene applicato al *Time Step* per acquisire soluzioni più frequenti all'inizio degli *Stress Period*. Il loro utilizzo è fondamentale in quanto all'inizio di ogni *Stress Period* i valori delle forzanti cambiano; quindi, ci saranno delle variazioni più repentine dei carichi che invece andranno a tendere all'equilibrio verso la fine degli *Stress Period*.

Il set di equazioni dovrà quindi essere risolto tante volte quanti sono i *Time Step*.

Per i modelli transitori la piezometria iniziale è di fondamentale importanza. Essa deve essere il più simile possibile a quella reale per evitare che la simulazione porti a risultati non attendibili e non compatibili con la geometria dell'area. Esistono due possibilità per assegnare la piezometria iniziale:

1. Piezometria iniziale stazionaria in condizioni statiche: si assegna un valore di carico uniforme in tutto il dominio ed avendo gradiente nullo, anche il flusso con questa condizione risulta nullo (*Figura 5*);

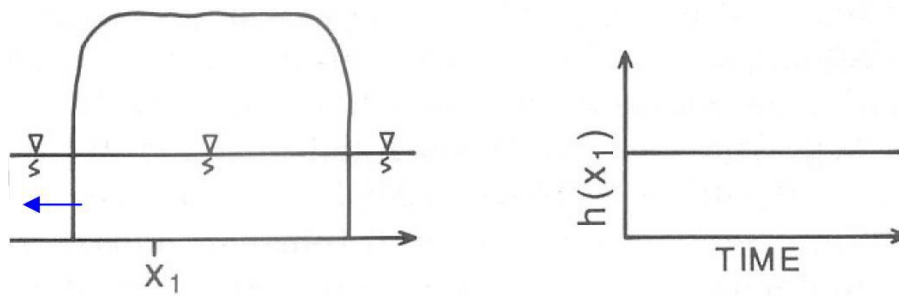


Figura 5: Piezometria stazionaria in condizioni statiche [10]

2. Piezometria iniziale stazionaria in condizioni dinamiche: in questo caso si utilizza un flusso medio. È la condizione che meglio rappresenta la distribuzione di carico al tempo t_0 , nel quale viene rappresentato il flusso ma non vi è alcuna variazione nel tempo né della piezometria né della quantità d'acqua (Figura 6).

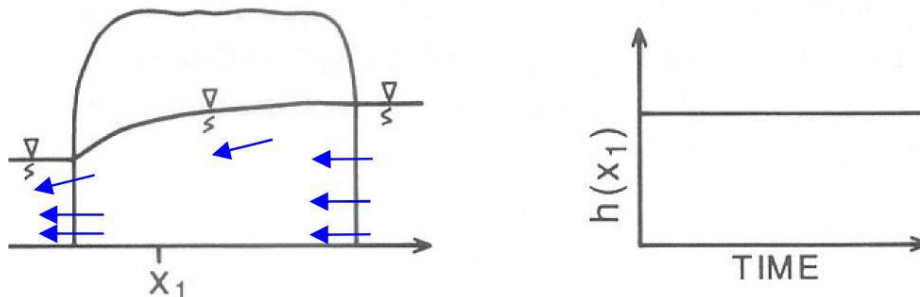


Figura 6: Piezometria stazionaria in condizioni dinamiche [10]

Nella pratica, una buona opzione è simulare la piezometria in stazionario e poi utilizzarla come piezometria iniziale nella simulazione in transitorio.

1.2.1 Equazioni governanti

Il flusso in un modello numerico viene descritto attraverso l'equazione generale di flusso di un fluido. Essa è un'equazione differenziale alle derivate parziali che si ottiene combinando l'equazione di continuità e la legge di Darcy.

L'equazione di continuità rappresenta la seconda legge della meccanica dei fluidi. La sua espressione viene ricavata considerando un volume elementare di acquifero (Figura 7) e ipotizzando una situazione di stazionarietà, di incomprimibilità dell'acqua e di assenza di sorgenti o perdite.

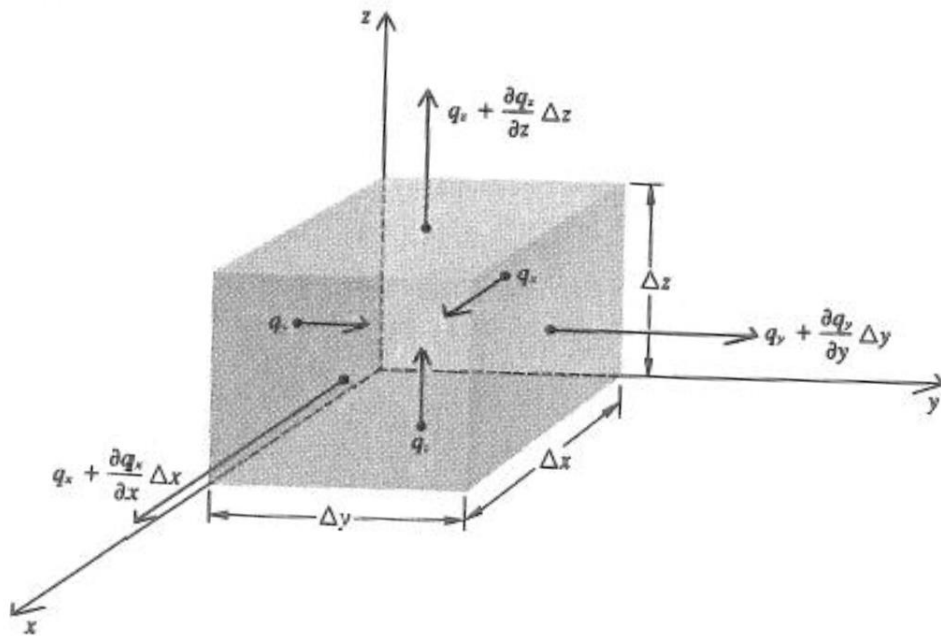


Figura 7: Rappresentazione di un volume elementare di acquifero [10]

Applicando poi il principio di conservazione della massa alla somma dei fluidi netti entranti dalle facce lungo uno stesso asse, si ottiene l'equazione [1.11], detta equazione di continuità:

$$\operatorname{div} \mathbf{q} = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad [1.11]$$

Combinando assieme la legge di Darcy (equazione [1.9]) e l'equazione di continuità (equazione [1.11]), sotto ipotesi di mezzo omogeneo ed isotropo si ottiene l'equazione di Laplace (equazione [1.12]);

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad [1.12]$$

Considerando poi il caso generalizzato di mezzo non isotropo, carico non stazionario e la presenza di sorgenti e prelievi, si ottiene l'equazione [1.13]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + q_s = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1.13]$$

Dove q_s rappresenta la portata delle sorgenti o prelievi e S_s rappresenta il coefficiente di immagazzinamento specifico.

1.2.2 Codice di calcolo

Il codice di calcolo numerico scelto all'interno di questo elaborato di tesi è MODFLOW (Modular Ground-Water model), sviluppato dalla U.S. Geological Survey (USGS) nel 1988 [2]. MODFLOW è un codice di calcolo alle differenze finite per la simulazione del flusso delle acque sotterranee che può essere utilizzato sia per simulazioni 2D che 3D.

MODFLOW discretizza il dominio di calcolo in una griglia, le cui unità sono chiamate celle. Ogni cella è identificata tramite gli indici i, j, k che rappresentano rispettivamente colonna, riga e *layer* del dominio di modellazione. Seguendo un approccio *block-centered*, le proprietà e le condizioni sono definite per ogni cella del dominio e vengono attribuite al punto centrale di ognuna di essa, chiamato nodo (Figura 8). Allo stesso modo, il carico idraulico viene calcolato ad ogni iterazione in corrispondenza del nodo di ogni cella.

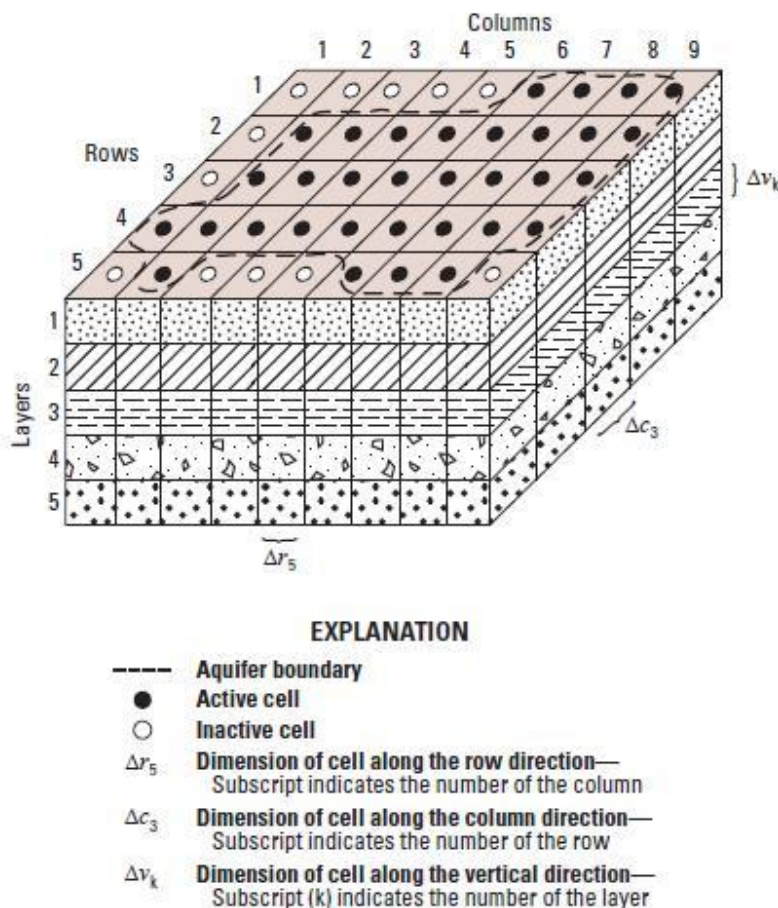


Figura 8: Esempio di un dominio discretizzato con griglia regolare in MODFLOW [2]

Tramite la discretizzazione spaziale e temporale MODFLOW approssima l'equazione di flusso seguendo l'approccio alle differenze finite. L'equazione di continuità viene definita come:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad [1.14]$$

dove:

Q_i è il flusso entrante in una cella (m^3/sec);

S_s è l'immagazzinamento specifico (-);

Δh è la differenza di carico idraulico (m);

Δt è l'intervallo di tempo (sec);

ΔV è il volume della cella (m^3).

Per ogni faccia della cella i, j, k il flusso entrante dalle celle adiacenti, indicizzate come riportato in [Figura 9](#), viene calcolato tramite l'equazione di Darcy ottenendo un totale di 6 equazioni

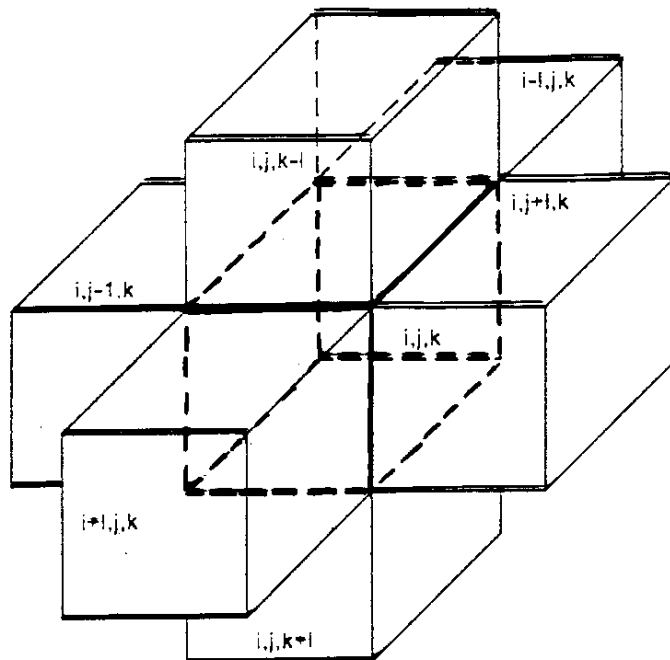


Figura 9: Indicizzazione delle celle adiacenti alla cella i, j, k [10]

Di seguito è riportata come esempio l'equazione [1.15] che descrive il flusso dalla cella $i, j - 1, k$ alla cella i, j, k :

$$q_{i,j-1/2,k} = K_{R\ i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k \frac{h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [1.15]$$

dove:

$h_{i,j,k}$ è il carico nel nodo i, j, k ;

$h_{i,j-1,k}$ è il carico nel nodo $i, j - 1, k$;

$q_{i,j-1/2,k}$ è il flusso attraverso la faccia compresa tra le celle i, j, k e $i, j - 1, k$;

$K_{R\ i,j-1/2,k}$ è la permeabilità lungo la riga tra i nodi i, j, k e $i, j - 1, k$;

$\Delta C_i \Delta V_k$ è l'area della faccia della cella normale alla direzione della riga;

$\Delta r_{j-1/2}$ è la distanza tra i nodi i, j, k e $i, j - 1, k$.

Al fine di comprendere la formulazione dell'equazione [1.15], il [Figura 10](#) viene riportato un esempio del calcolo del flusso tra due celle adiacenti.

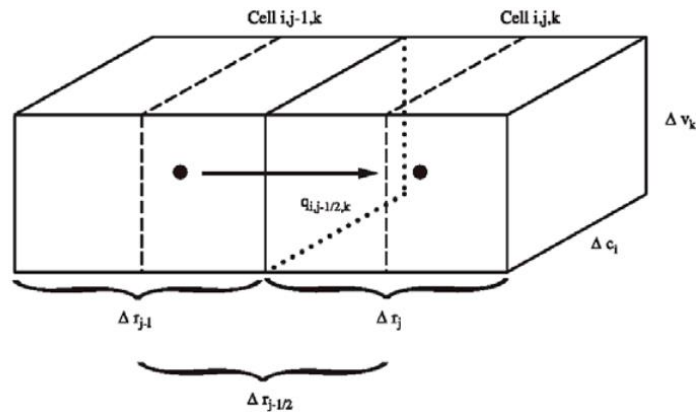


Figura 10: Esempio di calcolo del flusso tra due celle adiacenti [2]

L'equazione [1.15] può essere semplificata nell'equazione [1.17] introducendo la conduttanza idraulica C_R (equazione [1.16] che raggruppa al suo interno l'area della faccia della cella, la distanza tra i nodi e la permeabilità:

$$C_{R\ i,j-1/2,k} = \frac{K_{R\ i,j-1/2,k} \Delta C_i \Delta V_k}{\Delta r_{j-1/2}} \quad [1.16]$$

$$q_{i,j-1/2,k} = C_{R\ i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad [1.17]$$

Analogamente, scrivendo le equazioni relative alle altre 5 celle adiacenti, si ottiene il sistema finale caratterizzato da 6 equazioni:

$$\begin{cases} q_{i,j-1/2,k} = C_{R i,j-1/2,k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j+1/2,k} = C_{R i,j+1/2,k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i-1/2,j,k} = C_{R i-1/2,j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i+1/2,j,k} = C_{R i+1/2,j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k-1/2} = C_{R i,j,k-1/2} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \\ q_{i,j,k+1/2} = C_{R i,j,k+1/2} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \end{cases} \quad [1.18]$$

Al fine di considerare i flussi provenienti da condizioni o processi esterni all'acquifero, è necessario introdurre il seguente termine aggiuntivo:

$$a_{i,j,k,n} = p_{i,j,k,n} h_{i,j,k} + q_{i,j,k,n} \quad [1.19]$$

dove:

$a_{i,j,k,n}$ rappresenta l' n -esima sorgente presente nella cella i, j, k ;

$p_{i,j,k,n}$ è un termine dipendente dal carico nella cella;

$h_{i,j,k}$ è il carico presente nella cella i, j, k ;

$q_{i,j,k,n}$ rappresenta la portata dipendente dal carico.

Considerando N sorgenti e/o perdite, l'equazione [1.19] diventa:

$$\sum_{n=1}^N a_{i,j,k,n} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad [1.20]$$

con:

$$P_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N p_{i,j,k,n} \quad [1.21]$$

$$Q_{i,j,k} = \sum_{n=1}^N q_{i,j,k,n} \quad [1.22]$$

Infine, unendo tutti i termini, l'equazione di flusso approssimata tramite il metodo alle differenze finite in caso anisotropo e stazionario, diventa:

$$\begin{aligned}
 & q_{i,j-1/2,k} + q_{i,j+1/2,k} + q_{i-1/2,j,k} + q_{i+1/2,j,k} + q_{i,j,k-1/2} + q_{i,j,k+1/2} \\
 & + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = S_{s,i,j,k} \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \Delta c_i \Delta r_j \Delta v_k
 \end{aligned}
 \tag{1.23}$$

MODFLOW utilizza un approccio iterativo per ottenere la soluzione del sistema di equazioni alle differenze finite per ogni *Time Step* temporale. L'iniziazione del metodo iterativo avviene con l'assegnazione di una distribuzione iniziale di carico idraulico; esso termina quando viene raggiunto il criterio di convergenza definito dall'utente. In particolare, l'approccio include tre cicli annidati: un ciclo sullo *Stress Period* all'interno del quale avviene un ciclo sui *Time Step*, in ciascuno dei quali è risolto un loop di iterazioni. Un'esemplificazione del metodo iterativo impiegato da MODFLOW è riportata in [Figura 11](#).

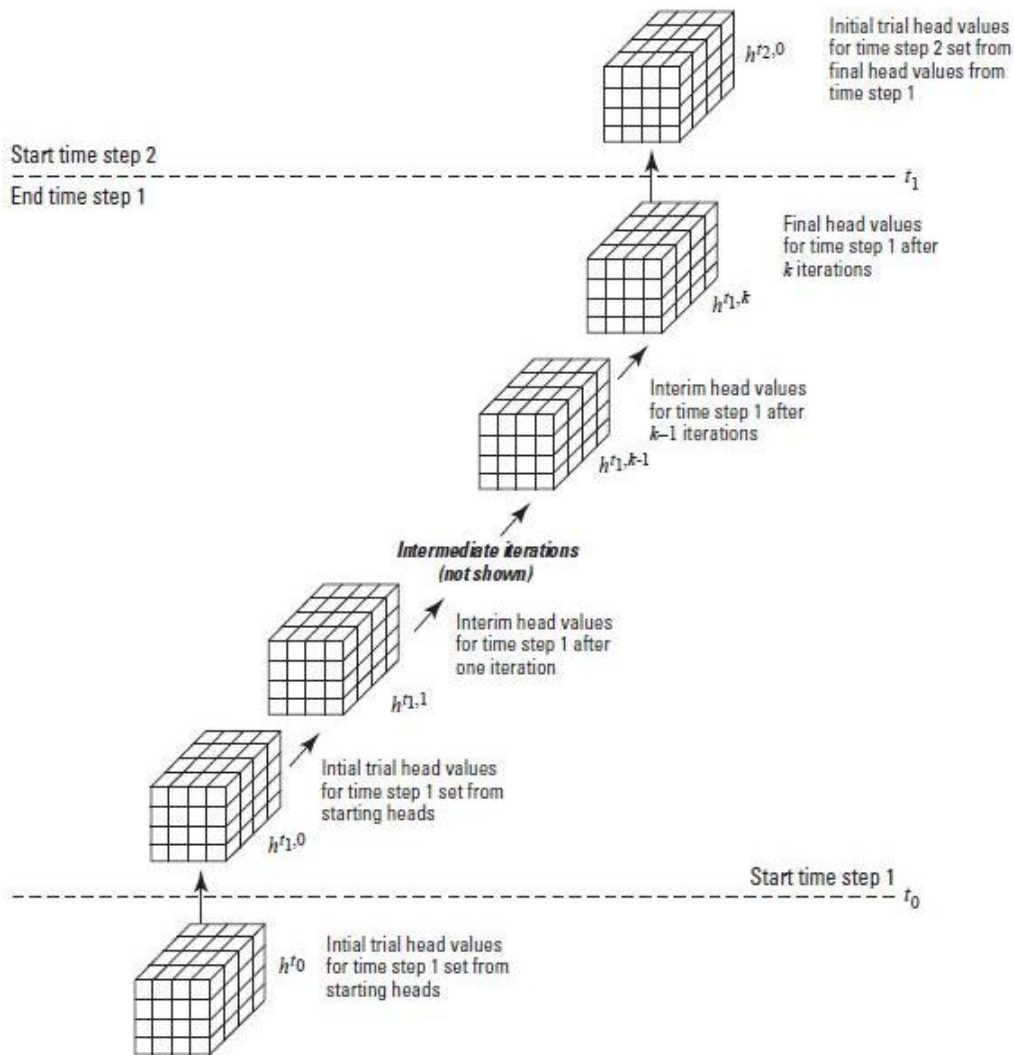


Figura 11: Diagramma rappresentante il processo di calcolo iterativo eseguito da MODFLOW [2]

1.2.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono asserzioni matematiche che, poste ai limiti del dominio (condizioni al contorno, BC's) o all'interno del dominio (condizioni interne, IC's), specificano la variabile dipendente (il carico idraulico) o la sua derivata (il flusso). Poiché con la modellazione si rappresenta solo una porzione di territorio appartenente ad una realtà molto più ampia, le condizioni al contorno sono necessarie per mettere in comunicazione il dominio modellato con la realtà esterna.

In generale, con l'obiettivo di far coincidere la formula matematica con una condizione fisica reale, si preferisce imporre condizioni al contorno in corrispondenza di elementi fisici (e.g. fiumi, mari, laghi) che condizionano i carichi idraulici caratteristici del sistema di modellazione. Per questo motivo, molto spesso il dominio di modellazione viene esteso oltre la zona di interesse in modo tale da raggiungere condizioni fisiche esterne "stabili". Così facendo è possibile ottenere un modello numerico fedele alla realtà e caratterizzato da condizioni al contorno sufficientemente lontane dalla zona di interesse in modo tale da non vincolare i risultati modellati al suo interno.

Nei modelli matematici di flusso è possibile utilizzare tre tipi di condizioni matematiche per implementare le condizioni al contorno ed interne: la condizione di Dirichlet (Tipo I) la condizione di Neumann (Tipo II) e la condizione di Cauchy (Tipo III). Ogni condizione che viene implementata all'interno del dominio è identificabile tramite un numero che prende il nome di *reach*.

CONDIZIONE DI DIRICHLET (A CARICO COSTANTE)

Questo tipo di condizione permette di definire un valore di carico fissato in ogni cella lungo i bordi del dominio. È la condizione più semplice da implementare ma è anche molto forte ed è capace di condizionare notevolmente i risultati del flusso simulato in quanto fornisce al modello tutta l'acqua di cui ha bisogno (il carico nella cella rimane sempre lo stesso indipendentemente da quanta acqua viene richiesta dal modello).

Per questo, tale condizione viene spesso posta lontano dalla zona di maggior interesse ed è adatta per rappresentare elementi fisici che sono in grado di fornire o ricevere acqua in quantità infinite senza variare il proprio carico idraulico. Inoltre, deve essere usata ad una certa distanza da eventuali condizioni interne ed è necessario valutare la sensitività del modello alla condizione stessa.

Viene spesso utilizzata per rappresentare mari, laghi o grossi fiumi ma può essere utilizzata anche per rappresentare spartiacque sotterranei.

CONDIZIONE DI NEUMANN (DI FLUSSO COSTANTE)

Questa condizione permette di assegnare alle celle del modello la derivata del carico idraulico e quindi il flusso entrante o uscente dal dominio. È una condizione meno forte rispetto a quella a carico costante ma richiede la conoscenza delle proprietà lungo il confine del modello (permeabilità, gradiente, area).

Solitamente viene utilizzata per simulare condizioni al bordo dove non si hanno significativi cambiamenti dello spessore saturo nelle unità permeabili come ad esempio fiumi, canali o aree vallive. Può essere utilizzata anche come condizione interna per rappresentare elementi con portate in ingresso definite, come pozzi, perdite da reti di servizio o ricarica meteorica. In particolare, quest'ultima rappresenta la quantità d'acqua che entra nel dominio attraverso la superficie topografica e viene implementata in MODFLOW mediante il pacchetto RECHARGE in cui viene espressa come infiltrazione efficace nel tempo per unità di superficie (m/sec). Conoscendo poi le dimensioni di ogni cella, MODFLOW riesce a calcolare la portata che va ad alimentare la falda (m^3/sec).

Spesso, la condizione a flusso costante viene sfruttata per simulare un flusso nullo (condizione di *No-flow*) in particolare per rappresentare elementi fisici impermeabili come formazioni rocciose impermeabili, spartiacque sotterranei e linee di flusso.

CONDIZIONI DI CAUCHY (DI FLUSSO DIPENDENTE DAL CARICO)

Quella di flusso dipendente dal carico è la condizione più complessa da impostare ma è anche la più elastica in quanto tiene conto delle condizioni interne del modello e si adatta ad esse permettendo variazioni sia di cariche che di flusso. È basata sul gradiente e sulle proprietà geologiche ai limiti del modello.

È utilizzata quando non si riescono ad individuare nel contorno del dominio delle condizioni di tipo fisico, quando i limiti idrogeologici non sono costanti nel tempo e quando gli effetti piezometrici generati all'interno del modello possono raggiungere i confini ed interagire con l'esterno.

Per simulare questa condizione, MODFLOW utilizza diversi pacchetti. Di seguito sono descritti solo i pacchetti GHB e RIV ma esistono altri pacchetti per la simulazione dei dreni (DRAIN), dei laghi (LAKE) o il pacchetto avanzato per i fiumi (SFR).

La condizione *General Head Boundary* (GHB) simula la presenza di un serbatoio (immaginario o reale) ad una distanza d dal dominio di modellazione, collegato alla cella del bordo tramite un tubo immaginario con larghezza pari alla larghezza della cella (l_{cella}) e spessore pari allo spessore saturo e in quel punto. Viene ipotizzato che tale tubo sia riempito di un materiale avente permeabilità pari alla permeabilità media dei terreni che si trovano tra il serbatoio e la cella (\bar{k}). In [Figura 12](#) è riportata una schematizzazione del funzionamento delle GHB.

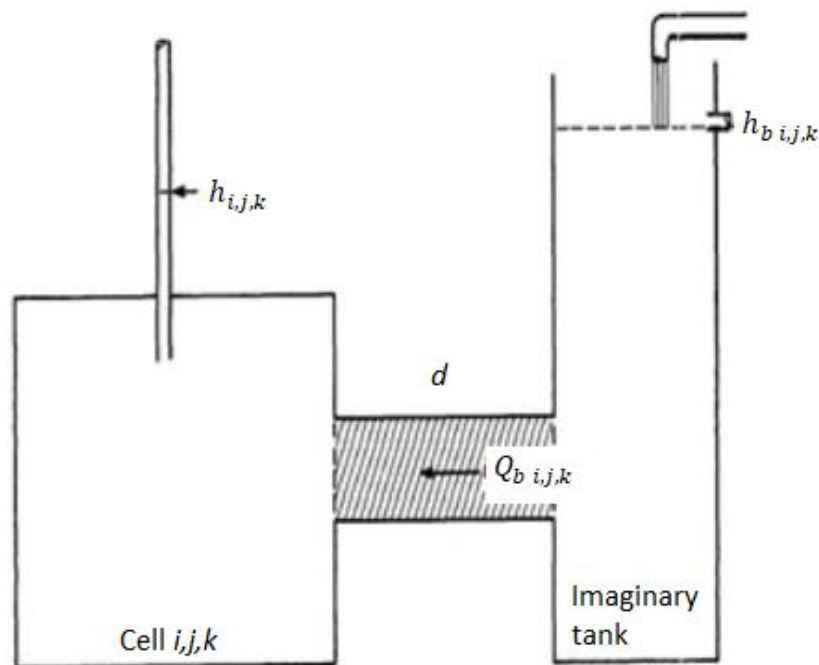


Figura 12: Schema di funzionamento della GHB

Applicando la legge di Darcy in queste condizioni si ottiene l'equazione [1.24]:

$$Q_{b i,j,k} = \bar{k} (l_{cella} - e) \frac{h_{b i,j,k} - h_{i,j,k}}{d} \quad [1.24]$$

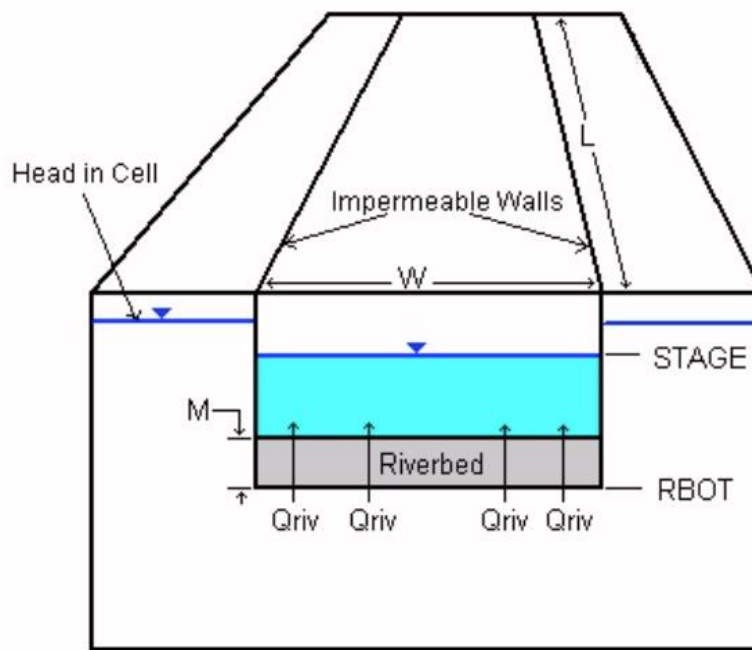
Dove $Q_{b i,j,k}$ è il flusso entrante o uscente dalla cella, $h_{b i,j,k}$ è il carico costante nel serbatoio corrispondente alla cella e $h_{i,j,k}$ è il carico presente nella cella.

Il pacchetto RIV invece viene utilizzato per la rappresentazione di scambi idrici tra fiumi, canali o torrenti e la falda. Esso si basa sull'ipotesi di linearità tra la differenza di carico idraulico esistente tra corpo idrico e falda e la portata che defluisce tra essi. In MODFLOW il percorso di un fiume

viene rappresentato tramite una linea spezzata che attraversa più celle. È necessario definire per ogni cella il valore di conduttanza data dall'equazione [1.25]:

$$C_{riv} = \frac{k L W}{M} \quad [1.25]$$

Dove k è la permeabilità dei sedimenti di fondo alveo, L è la lunghezza del tratto di fiume nella cella, W è la larghezza dell'alveo del fiume e M è lo spessore dei sedimenti (*Figura 13*).



Schematic of River Boundary

Figura 13: Schema di funzionamento della condizione RIV

Applicando la legge di Darcy, il flusso in una cella $Q_{riv\ i,j,k}$ è dato da:

$$Q_{riv\ i,j,k} = C_{riv}(H_{riv} - h_{i,j,k}) \quad [1.26]$$

Dove H_{riv} è il carico idraulico del fiume in corrispondenza della cella e $h_{i,j,k}$ è il carico della falda.

1.3 Stima della ricarica verticale: codice Soil Water Balance (SWB)

Il *software* utilizzato per il calcolo della ricarica meteorica in questo elaborato di tesi è *Soil Water Balance* (SWB) [12]. Esso è stato sviluppato dalla USGS con lo scopo di calcolare le variazioni spaziali e temporali della ricarica delle acque sotterranee in un determinato periodo di tempo e sfruttando una struttura a griglia in funzione delle informazioni meteo-climatiche, delle caratteristiche del terreno e della copertura del suolo.

SWB si basa su una versione modificata del metodo di Thornthwaite-Mather [13] per il calcolo del bilancio idrico del suolo ad intervalli di tempo giornalieri calcolando il bilancio tra l'acqua in ingresso proveniente dalle precipitazioni e l'acqua in uscita dovuta all'evapotraspirazione reale.

La ricarica viene calcolata separatamente per ogni cella nel dominio del modello. Le sorgenti e le perdite di acqua di ogni cella della griglia sono determinate sulla base di dati climatici di input e delle caratteristiche del terreno; la ricarica è calcolata come la differenza tra la variazione dell'umidità del suolo ed eventuali sorgenti e perdite secondo l'equazione [1.27]

$$\text{Ricarica} = (P + F + \text{Inflow}) - (I + \text{Outflow} + ET) - \Delta U \quad [1.27]$$

Dove:

P – Precipitazione giornaliera registrata in una singola stazione in *inches* (*in*);

F – Fusione, ossia accumulo/scioglimento di neve. I dati di temperatura giornalieri sono utilizzati per stabilire se la precipitazione è sottoforma di pioggia o neve;

Inflow – I flussi in ingresso sono calcolati mediante un file GRID riportante le direzioni di flusso ottenute dal DEM dell'area di modellazione;

I – Intercettazione, una determinata quantità di acqua viene intercettata dalla vegetazione, dipende dal tipo di suolo e dalla stagione;

Outflow – Ruscamento superficiale calcolato mediante l'approccio SCS-CN [14];

ET – Evapotraspirazione potenziale calcolabile in SWB mediante diversi metodi;

ΔU – Variazione di umidità del suolo, rappresenta la quantità di acqua immagazzinata nel suolo per una data cella.

Ognuna delle componenti facenti parte del bilancio idrico viene trattata singolarmente all'interno del codice di SWB.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale, SWB permette di utilizzare quattro diversi metodi:

1. Thornthwaite - Mather (1957) [13];
2. Jensen-Haise (1963) [15];
3. Turc (1961) [16];
4. Hargreaves - Samani (1982) [17].

Come verrà illustrato in seguito, in funzione del metodo utilizzato per il calcolo dell'ET è necessario fornire in input al *software* diversi dati meteo-climatici.

Il ruscellamento viene calcolato da SWB seguendo l'approccio afflussi-deflussi rappresentato dal metodo SCS-CN [14] che considera informazioni relative al tipo di terreno, all'uso del suolo e all'umidità iniziale del terreno. In particolare, il ruscellamento R viene calcolato in funzione della differenza tra la precipitazione giornaliera P e l'imbibizione iniziale I_a . Concettualmente le perdite iniziali rappresentano la somma di tutti i processi che possono ridurre il ruscellamento (e.g. l'intercettazione da parte della vegetazione o l'infiltrazione) e dunque la quantità di precipitazione che deve cadere prima che il ruscellamento venga generato. Il volume di acqua data dal ruscellamento viene calcolato secondo l'equazione [1.28]:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P + (S_{max} - I_a))} \text{ con } P > I_a \quad [1.28]$$

dove:

S_{max} è il volume massimo di ritenzione del suolo.

L'imbibizione iniziale è legata al volume massimo di ritenzione del suolo secondo l'equazione [1.29]:

$$I_a = 0.2S_{max} \quad [1.29]$$

S_{max} viene definito in funzione del coefficiente CN (*Curve Number*), dipendente dall'uso del suolo e dalla classe di permeabilità del terreno, secondo l'equazione [1.30]:

$$S_{max} = \left(\frac{1000}{CN} \right) - 10 \quad [1.30]$$

I valori di CN variano tra 0 e 100; valori più elevati identificano un terreno in grado di ospitare poca acqua e dunque più propenso alla generazione di ruscellamento. I valori tabellati in letteratura si riferiscono a condizioni di umidità del terreno medie (CNII), per tale motivo essi vengono incrementati (CNIII) o decrementati (CNI) in funzione delle precipitazioni avvenute nei cinque giorni precedenti all'istante in cui si sta calcolando il ruscellamento.

1.3.1 Dati richiesti in input

I dati da fornire in input a SWB sono riportati in [Figura 14](#). Essi possono essere organizzati in file in tabelle o in griglie in funzione della tipologia dei dati stessi.

Data type
Gridded (ARC ASCII or Surfer grid)
Land use/land cover
Flow direction (D8)
Hydrologic soil group
Available water capacity
Tabular
Soil and land use properties lookup table
Climate at a single station
Matrix of soil-water retention for given accumulated potential water loss

Figura 14: Dati richiesti in input da SWB per il calcolo della ricarica meteorica [12]

FILE TABULATI

Il modello SWB richiede almeno un file contenente i dati climatici che devono essere organizzati al suo interno come riportato in [Figura 15](#). Il codice contiene le procedure per la conversione tra la data gregoriana e il numero del giorno giuliano e contabilizza automaticamente gli anni bisestili. I dati non utilizzati nella tabella possono essere impostati su qualsiasi valore ma devono essere presenti, nessuna casella deve rimanere vuota.

Month	Day	Year	Average temperature (°F)	Precipitation (in.)	Relative humidity (%) [optional]	Maximum temperature (°F)	Minimum temperature (°F)	Wind speed (m/s) [optional]	Minimum relative humidity (%) [optional]	Possible % sunshine [optional]
1	2	1993	21.5	0.09	79.5	33	10	5.41	67	0
1	3	1993	37	.1	94	41	33	4.87	92	0
1	4	1993	31.5	.17	88.5	39	24	4.6	81	0
1	5	1993	23.5	.003	73	28	19	3.17	61	40
1	6	1993	20.5	.003	68	26	15	3.08	55	49
1	7	1993	16	.003	77.5	22	10	2.86	71	0
1	8	1993	14	.003	70.5	22	6	3.93	57	64
1	9	1993	18.5	.003	76	21	16	7.24	71	0

< Data file continues with a separate line for each day of the year. >

Figura 15: Esempio di file tabulato contenente i dati climatici necessari a SWB [12]

Per quanto riguarda i dati climatici, il modello necessita dei valori di:

- Precipitazione giornaliera (in inches);
- Temperatura minima, media e massima giornaliera dell'aria (in gradi Fahrenheit).

Come riportato in Figura 16, a seconda della formulazione dell'equazione di evapotraspirazione impiegata nel calcolo, possono essere richiesti dati aggiuntivi tra i quali:

- Percentuale di sole possibile: il rapporto delle ore di sole effettive rispetto al totale delle ore di sole giornaliere possibili, in percentuale;
- Umidità relativa minima: l'umidità relativa minima giornaliera registrata, in percentuale;
- Umidità relativa media: l'umidità relativa media giornaliera, in percentuale;
- Velocità del vento: la velocità media giornaliera del vento espressa in metri al secondo e misurata a 2 m al di sopra della superficie terrestre.

Method	Mean air temperature (°F)	Minimum air temperature (°F)	Maximum air temperature (°F)	Mean relative humidity (%)	Wind velocity (m/s)	Minimum relative humidity (%)	Percent possible sunshine (%)	Suitable for use with gridded precip and air temperature data
Thornthwaite-Mather	✓							
Jensen-Haise	✓						✓	
Turc	✓			✓			✓	
Hargreaves-Samani	✓	✓	✓					✓

[°F, degrees Fahrenheit; %, percent; m/s, meters per second]

Figura 16: Dati richiesti in input a SWB in funzione del metodo selezionato per il calcolo dell'ET [12]

FILE A GRIGLIA

I file grigliati che devono essere forniti in input a SWB sono quattro: gruppo idrologico del suolo (HSG), uso del suolo/copertura del suolo, capacità idrica del terreno (AWC) e direzione di ruscellamento superficiale. Affinché il codice funzioni, poiché non risulta in grado di modificare o convertire proiezioni e dati, tutti i set di dati a griglia devono condividere il datum, la proiezione, le dimensioni delle celle della griglia e l'estensione della griglia stessa.

Hydrologic Soil Group (HSG):

Il gruppo idrologico del suolo viene fornito a SWB in funzione della classificazione realizzata dal Natural Resources Conservation Service (NCRS) [18] caratterizzata da quattro gruppi idrologici (A-D) differenziati in funzione del tasso di infiltrazione caratteristico del terreno. Come riportato in [Figura 17](#) il gruppo A include terreni caratterizzati da un elevato tasso di infiltrazione e di conseguenza da un ruscellamento potenziale contenuto. Viceversa, il gruppo D comprende terreni che faticano ad ospitare acqua e dunque associati ad un ruscellamento potenziale elevato.

Soil Group	Infiltration rate
A	> 0.3 inch per hour
B	0.15–0.3 inch per hour
C	0.05–0.15 inch per hour
D	< 0.05 inch per hour

Figura 17: Gruppi idrologici del suolo secondo l'NCRS [12]

Il file grigliato contenente i valori HSG del dominio di interesse viene fornito sottoforma di un file ASCII contenente valori da 1 a 4 corrispondenti rispettivamente alle classi da A a D.

Uso del suolo:

Il modello utilizza le informazioni sull'uso e sulla copertura del suolo, insieme alla capacità idrica del suolo, per calcolare il deflusso idrico superficiale e assegnare una capacità massima di ritenzione del suolo per ogni cella della griglia. SWB può gestire qualsiasi metodo arbitrario di classificazione, a condizione che la *look-up table* che accompagna il modello contenga i valori del *Curve Number*, l'intercettazione, la massima ricarica e i dati relativi alla profondità di radicazione per ogni tipologia di suolo contenuta nella griglia.

Available Water Capacity (AWC):

La capacità idrica del terreno viene fornita a SWB specificando per ogni cella del dominio il valore di AWC (definita in inches/foot). Poiché per ogni tipo di suolo deve essere fornito un valore di capacità idrica, se non sono disponibili alcuni valori di capacità idrica, l'utente può utilizzare i valori tabellati riportati in *Figura 18* definiti in funzione della tipologia di terreno.

Soil texture	Available water capacity (inches per foot of thickness)
Sand	1.20
Loamy sand	1.40
Sandy loam	1.60
Fine sandy loam	1.80
Very fine sandy loam	2.00
Loam	2.20
Silt loam	2.40
Silt	2.55
Sandy clay loam	2.70
Silty clay loam	2.85
Clay loam	3.00
Sandy clay	3.20
Silty clay	3.40
Clay	3.60

Figura 18: Valori tabellati di AWC in funzione della tipologia di terreno [12]

Direzione di ruscellamento superficiale:

Il codice SWB, per poter valutare come instradare il flusso via terra tra le celle, richiede una griglia di direzione del ruscellamento superficiale che ricopra l'intero dominio. La griglia di direzione del flusso deve essere definita coerentemente con l'algoritmo di instradamento del flusso D8.

TABELLA DI ASSOCIAZIONE

SWB sfrutta due tabelle di associazione (*look-up table*) per calcolare i parametri del modello sulla base delle caratteristiche delle celle della griglia.

La prima tabella di associazione è quella relativa all'uso del suolo, è organizzata come riportato in *Figura 19* e permette all'utente di specificare i valori di:

- *Curve Number*;
- Massimo tasso di infiltrazione per tipo di suolo;
- Profondità della zona radicale;
- Quantità di acqua piovana intercettata dalla vegetazione.

Column number	Description	Notes
1	Land-use code	Integer value corresponding to the integer values contained in the land-use ARC ASCII grid.
2	Land-use description	Not used by model; for use by user to document the description of the land-use corresponding to the integer land-use code.
3	Assumed impervious area	Not used by model; for use by user to document assumed impervious area associated with the land-use code.
4-7*	NRCS base curve numbers	NRCS base curve numbers for hydrologic soil groups A-D, respectively. The curve numbers are those associated with antecedent runoff condition II. A curve number must be specified for each soil type.
8-11*	Maximum infiltration rates	Maximum infiltration rates (inches/day) for each soil type.
12,13	Interception storage values	Interception storage values for growing season and dormant season.
14-17*	Depth of root zone	Root-zone depth, in feet, for each soil group A-D.
18,19	Reference	Not used by model; for use by users in documenting the sources of information placed into the table.

*Column numbering shown reflects specification of only four soil types. If more than four soil types are present, the column numbering will shift accordingly.

Figura 19: Dati contenuti nella tabella di associazione [12]

La seconda tabella di associazione contiene una versione estesa della tabella di ritenzione idrica del suolo di Thornthwaite-Mather che mette in relazione la perdita potenziale di acqua accumulata con la quantità di umidità del suolo trattenuta. Questa tabella è usata per calcolare i cambiamenti di umidità del suolo durante il periodo di evapotraspirazione potenziale insufficiente e non deve essere modificata dall'utente.

FILE DI CONTROLLO

I dati precedentemente elencati sono richiamati all'interno del file di controllo del programma.

Di seguito sono riportate le informazioni aggiuntive richieste da SWB nel file di controllo:

- Definizione del dominio del modello: Considerando i metri come unità di misura, è necessario riportare il numero di celle nella griglia in direzione x (NX), il numero di celle della griglia in direzione y (NY), le coordinate dell'angolo in basso a sinistra della griglia (X0, Y0) e le coordinate dell'angolo in alto a destra della griglia (X1, Y1);
- Stagione di crescita: inizio e fine della stagione di crescita in giorno giuliano e specificare se ci si trova nell'emisfero Nord;
- Precipitazione o Temperatura: Considerando come unità di misura gli inches al giorno e i gradi Fahrenheit, è necessario specificare se sono utilizzati dati tabulati di una singola stazione o valori grigliati;
- Umidità iniziale del suolo: Espressa come percentuale di saturazione della capacità idrica del terreno (0-100%);
- Copertura iniziale di neve: Espressa come valore di acqua equivalente in inches;
- Metodo di instradamento delle acque superficiali: È possibile sfruttare due differenti approcci:
 - ITERATIVO: l'acqua è fatta spostare iterativamente attraverso le celle della griglia fino a quando si infiltra o esce dal dominio attraverso il flusso superficiale
 - DOWNHILL: le celle della griglia vengono ordinate da monte a valle in una fase preliminare; il deflusso viene calcolato una volta per l'intero dominio del modello procedendo dalle celle a monte verso le celle a valle.
- Metodo di calcolo dell'evapotraspirazione: A seconda del metodo scelto è necessario fornire informazioni specifiche. I metodi J-H e Turc richiedono latitudine, albedo (a_s e b_s). Il termine a_s esprime la frazione di radiazione extraterrestre che raggiunge la terra nei giorni di cielo coperto mentre b_s esprime la frazione addizionale di radiazione extraterrestre che raggiunge la terra nelle giornate limpide. Il metodo T-M richiede la latitudine e il metodo Hargraves richiede latitudine Nord e Sud.

Il file di controllo prevede la definizione anche di informazioni opzionali:

- Valori di congelamento del terreno: Limiti superiore e inferiore di congelamento del terreno, rappresentano i valori limite di suolo completamente congelato e suolo completamente non congelato;

- Indice iniziale di congelamento: Stabilisce l'indice di congelamento del terreno dell'anno 1;
- Calcolo dell'imbibizione iniziale (I_a): Può essere valutato in due modi:
 - TR-55: $I_a = 0.2S$ con S = immagazzinamento;
 - Woodward et al.: $I_a = 0.05S$.

2 Inquadramento dell'area di studio

L'area di studio analizzata in questo elaborato di tesi è situata nel Nord Italia e più precisamente comprende il Comune di Milano ed una fascia dei Comuni che si estendono in direzione Ovest-Est tra i fiumi Ticino ed Adda (*Figura 20*).

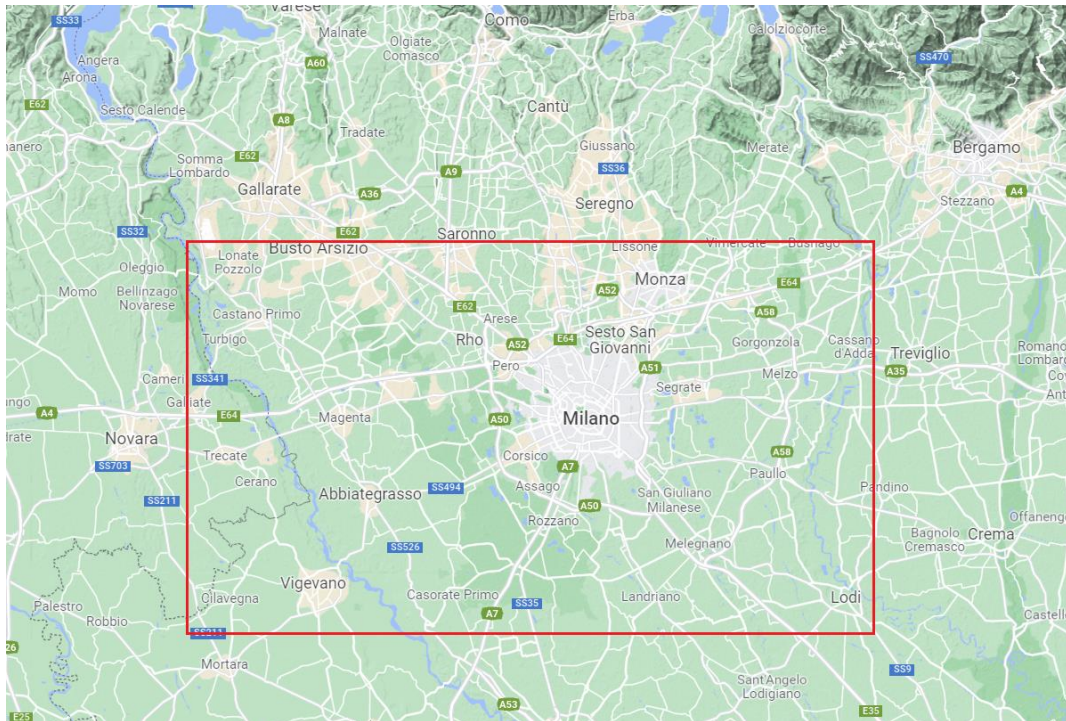


Figura 20: Inquadramento dell'area di studio

La Città Metropolitana di Milano, con una popolazione di 3'249'722 abitanti, è la seconda Città Metropolitana più popolosa del Paese e si estende su una superficie di 1'575 km² comprendente 133 comuni differenti. In particolare, nella città di Milano, negli ultimi 20 anni si è registrato un aumento demografico che ha portato ad un numero di abitanti pari a 1'406'242 nel 2019 (*Figura 21*).

La Lombardia è una delle regioni più urbanizzate ed industrializzate d'Europa; dal 2000 ad oggi le aree antropizzate sono passate dal 12,6% al 14,5%. A Milano i dati sull'uso del suolo hanno mostrato negli anni un progressivo aumento delle aree urbanizzate a scapito di una costante diminuzione del territorio agricolo. La crescente industrializzazione dell'area metropolitana accentua la formazione di estesi conglomerati urbani e determina una drastica riduzione dell'uso

del suolo per scopi agricoli, attualmente quantificabile in circa un quinto della superficie totale [19].

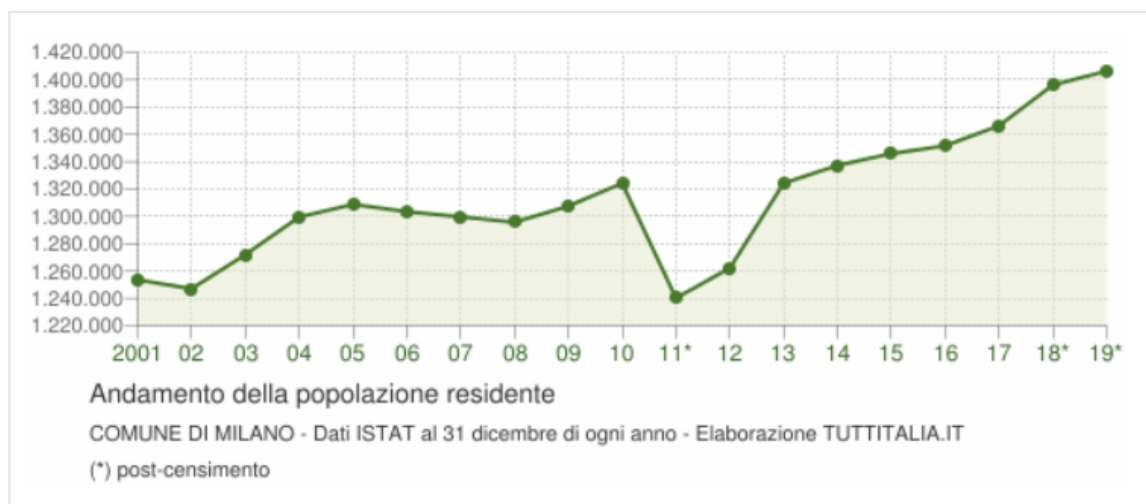


Figura 21: Andamento demografico della popolazione residente nel Comune di Milano dal 2001 al 2019 (ISTAT)

2.1 Inquadramento geologico ed idrogeologico

Il territorio di Milano si inquadra nella media Pianura Padana di cui, dal punto di vista morfologico, sono oggi riconoscibili solo i terrazzi fluviali, parzialmente occlusi dall'attività antropica di rimodellamento. Da un punto di vista geologico, l'area di studio è caratterizzata da diverse unità geologiche riportate di seguito ([20], [21]):

- Alluvioni antiche e recenti: legate alle esondazioni dei corsi d'acqua, costituite da depositi ghiaiosi sabbiosi;
- Depositi fluvioglaciali Würm Auct.: costituiti prevalentemente da ghiaie e sabbie con lenti limose, costituiscono il "livello fondamentale della pianura";
- Depositi fluvioglaciali Riss e Mindel Auct.: costituiti da depositi eterogenei formati da materiali grossolani immersi in una matrice sabbiosa-limosa;
- Ceppo Auct.: costituito prevalentemente da conglomerati e arenarie molto cementate passanti lateralmente a ghiaia e sabbie, è solitamente presente in corrispondenza delle incisioni dei corsi d'acqua e prevalentemente nel settore orientale della provincia di Milano;
- Villafranchiano: è rappresentato nella parte basale da argille e limi di colore grigio azzurro, mentre nella parte sommitale da argilla e limi di colore grigio giallo, con intercalazioni di lenti sabbiose.

Nell'ambito del lavoro svolto in collaborazione tra Regione Lombardia ed Eni [22], sono stati individuati, dal punto di vista idrogeologico, tre acquiferi principali sulla base delle caratteristiche litologiche riscontrate. La *Tabella 1* riassume le classificazioni utilizzate per la descrizione geologica dell'area Milanese secondo diversi studi.

Tabella 1: Descrizione geologica del sottosuolo della Città Metropolitana di Milano [23]

UNITA' LITOLOGICHE (Mazzarella S. e Martinis B.)		UNITA' IDROSTRATIGRAFICHE (Francani V. e Pozzi R.)	UNITA' IDROGEOLOGICHE (Avanzini et al)	TIPO ACQUIFERO (Eni)
LITAZONA GHIAIOSO- SABBIOSA	ACQUIFERO TRADIZIONALE	FLUVIOGLACIALE WURM AUCT. (Diluvium recente)	UNITA' GHIAIOSO- SABBIOSA	A
		FLUVIOGLACIALE RISS-MINDEL AUCT. (Diluvium Medio-Antico)	UNITA' GHIAIOSO- SABBIOSO-LIMOSA	B
		CEPPO AUCT.	UNITA' A CONGLOMERATI E ARENARIE BASALI	
LITAZONA SABBIOSO- ARGILLOSA	ACQUIFERI PROFONDI	VILAFRANCHIANO	UNITA' SABBIOSO- ARGILLOSA (facies continentali e di transizione)	C
LITAZONA ARGILLOSA			UNITA' ARGILLOSA (facies marine)	D

In questo elaborato di tesi si fa riferimento alla classificazione del sistema idrogeologico proposta da Eni e dunque ai Gruppi Acquiferi A e B (GrA e GrB) [23].

Il GrA corrisponde alla porzione superiore dell'Acquifero Tradizionale, presenta uno spessore medio di circa 30-40 m ed è costituito in prevalenza da sedimenti sabbioso-ghiaiosi ad alta permeabilità con limitate intercalazioni di argilla e limo che, a causa della loro scarsa continuità, non sono in grado di limitare la falda. È sede della falda libera superficiale e presenta, in gran parte del territorio milanese ed in particolare nel territorio dei comuni a Sud ed Est, valori di soggiacenza di pochi metri rispetto al piano campagna.

Il GrB corrisponde alla porzione inferiore dell'Acquifero Tradizionale, presenta uno spessore medio di circa 50-60 m, raggiungendo profondità di circa 100 m. È costituito da sabbie medio grossolane e ghiaie a matrice sabbiosa caratterizzate da permeabilità e porosità elevate; procedendo verso Sud, la matrice fine aumenta compartimentando l'acquifero nei Complessi

Acquiferi B1, B2, B3 e B4. La falda presente in tale acquifero è generalmente soggetta alla captazione dei pozzi pubblici dell'acquedotto di Milano e dei comuni limitrofi in quanto maggiormente protetta rispetto a quella dell'acquifero A.

I due gruppi Acquiferi sono separati idraulicamente da livelli poco permeabili (aquitard), che tuttavia non sono presenti con continuità in tutta l'area di studio. In particolare, l'aquitard compare, dapprima in modo discontinuo, nel settore centro-orientale in corrispondenza della parte sepolta del terrazzo delle Groane (comuni da Cesate a Baranzate) e nel settore ad Ovest di esso anche se con spessori inferiori. A partire dal confine Nord di Milano l'aquitard diviene sempre più continuo ed assume spessori maggiori procedendo verso Sud-Est. Tuttavia, sono state identificate diverse zone dove lo strato di separazione tra GrA e GrB, anche se identificabile, presenta spessori inferiori ai 2 m e granulometrie corrispondenti a quelle dei limi con componente sabbiosa più o meno abbondante [23]. Si considera quindi la falda presente nel GrB semi-confinata o confinata in base al grado di separazione creato dai livelli meno permeabili.

In [Figura 22](#) è riportata, a titolo esemplificativo, una delle 16 sezioni idrogeologiche prodotte all'interno del progetto MODEL-MI [23]. Si può notare come, procedendo da Nord verso Sud si osservi una progressiva diminuzione dello spessore del GrA e, viceversa, un progressivo aumento dello spessore del GrB. Inoltre, si osserva come i limiti di separazione tra i diversi Complessi Acquiferi (B1, B2, B3 e B4) abbiano un andamento simile a quello delle superfici di base dei gruppi acquiferi principali (A e B), con una progressiva tendenza all'approfondimento verso Sud.

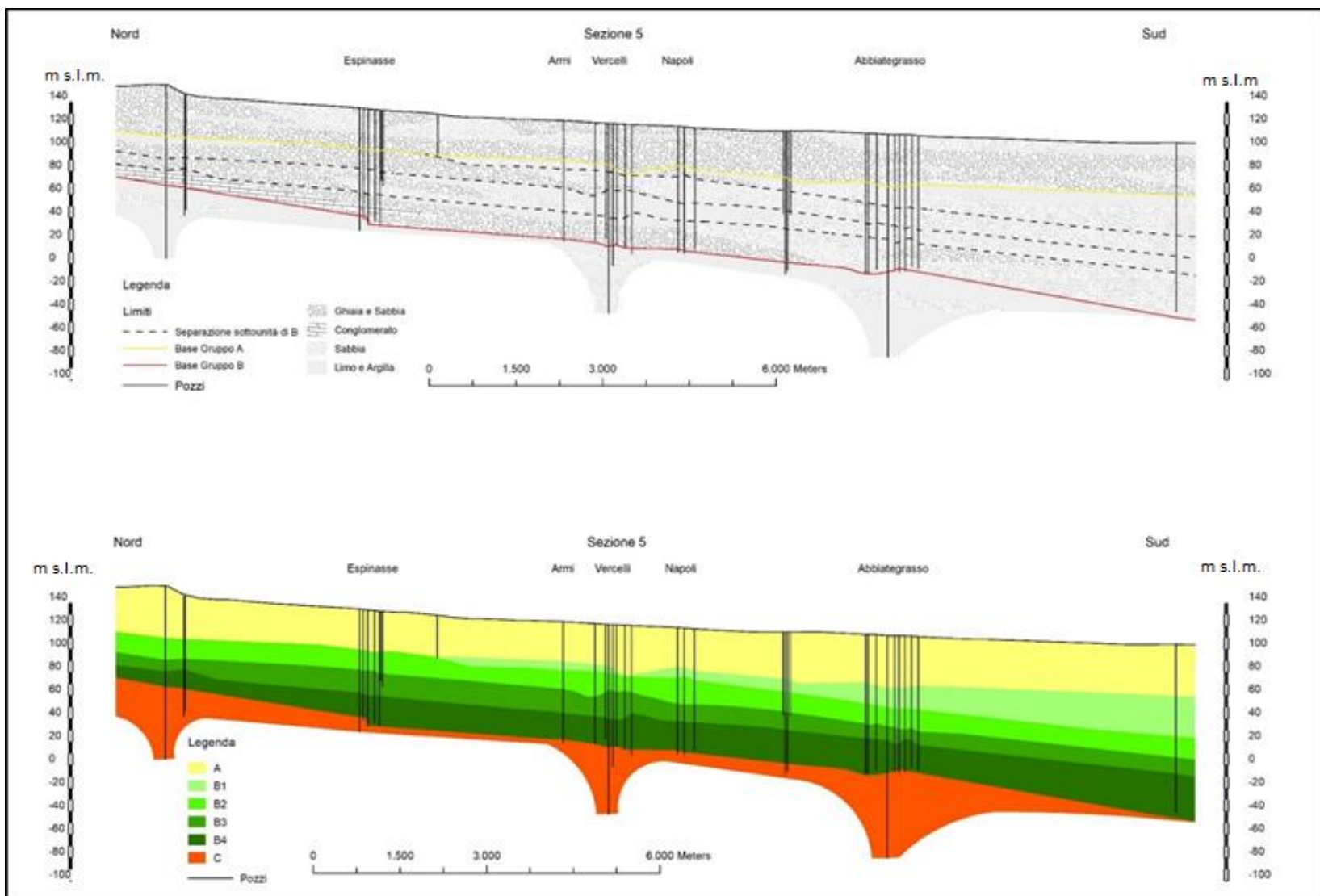


Figura 22: Sezione idrogeologica 5 (N-S) dell'area di studio. La traccia della sezione è mostrata nelle relazioni del progetto MODEL-MI [23]

2.2 Inquadramento idrografico

L'area circostante la Città Metropolitana di Milano è caratterizzata da un reticolo idrografico complesso. I numerosi corsi d'acqua presenti sul territorio sono interconnessi tra loro da una rete di canali artificiali, realizzati sia a fini irrigui sia per il convogliamento delle acque meteoriche. Il reticolo idrico principale è caratterizzato dai fiumi Olona, Lambro e dal torrente Seveso ma anche dai diversi canali artificiali quali i Navigli e il Canale Villoresi [19]. La rete idrografica della zona di interesse è riportata in [Figura 23](#).

FIUMI/TORRENTI

Il fiume Olona nasce in località Fornaci della Riana alla Rasa di Varese ad una quota di 548 *m* s.l.m. e attraversa 45 comuni per una lunghezza totale di 71 *km* fino a sfociare nel fiume Lambro Meridionale in località San Cristoforo. Scorre ad Ovest di Milano, è caratterizzato da un bacino idrografico di 911 *km*² ed ha una portata media di 6.9 *m*³/*sec* all'altezza del Comune di Rho.

Il torrente Seveso è un corso d'acqua naturale che nasce sul monte Sasso ad una quota di 490 *m* s.l.m. e attraversando le province di Como, Monza e Brianza e la Città Metropolitana di Milano, sfocia a Milano nel Naviglio Martesana. Sottende un bacino idrografico di 930 *km*² e si estende per un totale di 52 *km*.

Il fiume Lambro nasce appena sopra il colle del Ghisallo e scorre ad Est di Milano per un totale di 130 *km* fino a sfociare nel fiume Po. Essendo caratterizzato da un bacino idrografico di 1'350 *km*², risulta il maggiore dei tre fiumi milanesi ed è l'unico a scorrere, per la maggior parte del tratto cittadino, a cielo aperto.

CANALI ARTIFICIALI

Il Naviglio Grande è il più antico, nasce dal Ticino a Tornavento e procede in direzione Sud-Est fino a Castelletto, nei pressi di Abbiategrasso, dove devia verso Milano lasciando sulla sua destra il Naviglio di Bereguardo che invece prosegue verso Sud. Ha dislivello totale di 34 *m* su una lunghezza di 49,9 *km* e nel tronco da Tornavento ad Abbiategrasso ha una larghezza variabile dai 22 ai 50 *m*, mentre da Abbiategrasso a Milano si restringe anche fino a 12 *m*. Lungo il suo tragitto alimenta 116 bocche irrigatorie che danno acqua ad un comprensorio di circa 50'000 ettari.

Il Naviglio Pavese è lungo 33 *km* e si estende dalla darsena di Porta Ticinese fino alla città di Pavia dove confluisce nel Ticino. Esso lascia lungo il suo percorso i tre quinti dell'acqua ricevuta a Milano attraverso 20 bocche permanenti e 5 stagionali.

Il Naviglio Martesana nasce dal fiume Adda a Concesa e procede per 38 km fino a Milano da dove prosegue il suo tragitto interrato.

Il Canale Muzza riceve le acque dell'Adda a Cassano d'Adda, ad un'altezza di 120 m s.l.m., attraversa il territorio lodigiano per circa 40 km fino ai pressi di Castiglione d'Adda dove si reimmette nell'Adda. Ha un regime idrico regolato e una larghezza di 50 m iniziali che si riducono a pochi metri al termine del suo percorso ed una profondità media di 2 m.

Infine, il Canale Villoresi è un canale irriguo che prende acqua dal fiume Ticino a Somma Lombardo e, attraversando l'alta pianura milanese, sfocia nell'Adda presso Cassano D'Adda dopo aver percorso 86 km ed attraversato 27 comuni. Il Villoresi irrigua un bacino di 850 km² tramite 120 bocche e rami secondari che si estendono per circa 130 km, che a loro volta si dividono in piccoli canali terziari.

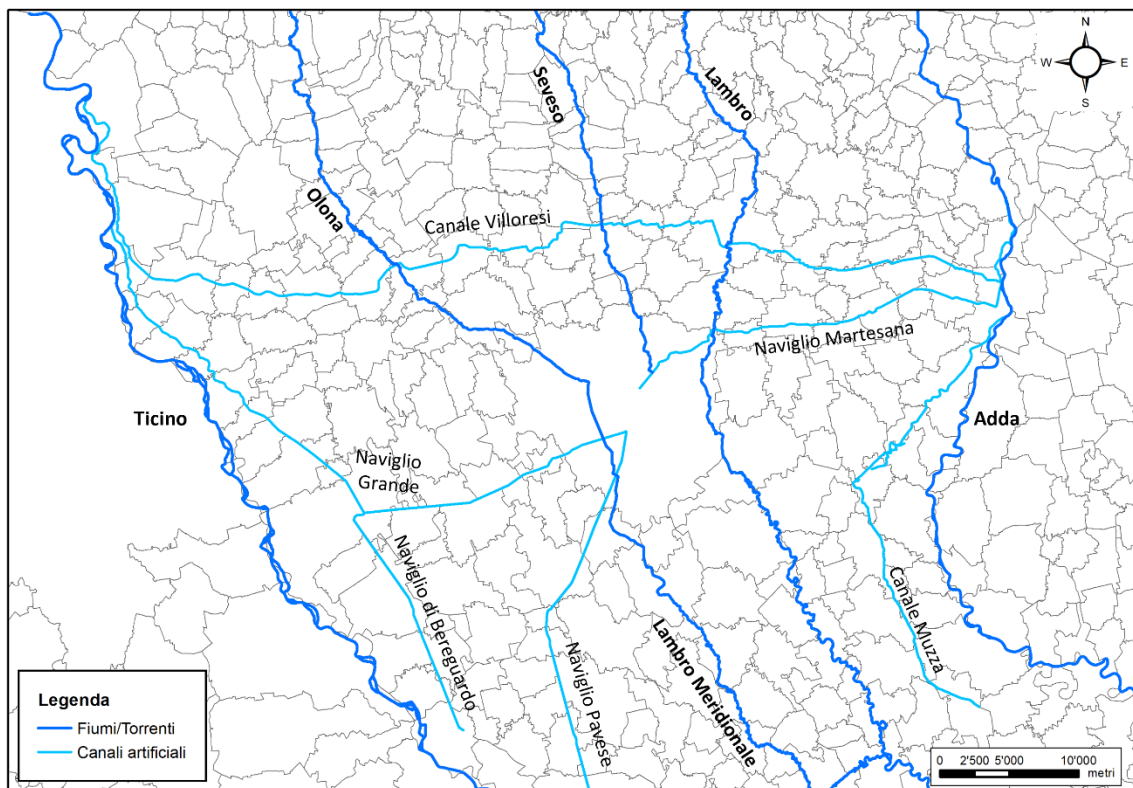


Figura 23: Reta idrografica dell'area di studio

2.3 Inquadramento climatico

Le particolari condizioni geografiche e climatiche di Milano influiscono in modo significativo sullo stato delle componenti paesaggistiche e ambientali della città. Milano è infatti situata al centro della Pianura Padana, chiusa per tre lati da catene montuose dalle quote elevate: le Alpi a Nord e ad Ovest, gli Appennini a Sud. La presenza delle catene montuose influisce sulla circolazione generale, bloccando le perturbazioni provenienti dall'Atlantico settentrionale e inducendo un certo ristagno delle nebbie e degli inquinanti (specie nel periodo invernale) dovuti all'elevata densità abitativa della zona.

Il clima di Milano può essere definito temperato, anche se la sua relativa lontananza dal mare accentua alcune caratteristiche continentali. D'estate, l'umidità relativa è mediamente alta e le temperature massime in media raggiungono quasi i 31°C. In inverno le temperature possono scendere anche di molto fino ad arrivare agli 0°C di media minima in gennaio. Come in tutte le grandi città del mondo, l'isola di calore sovrastante l'abitato di Milano rende le temperature più elevate rispetto alle campagne circostanti, soprattutto in inverno (con differenze in situazioni estreme anche di oltre i 5°C). Tale fenomeno riguarda soprattutto i quartieri centro-settentrionali, più densamente abitati, che sono caratterizzati anche da nebbie più rare rispetto alle aree meridionali e alle campagne circostanti.

Dall'analisi dell'andamento temporale delle precipitazioni massime giornaliere nel Nord Italia, nel periodo compreso tra il 1961 e il 2010, ISPRA (2012) ha rilevato un trend positivo d'incremento medio dell'intensità di precipitazione di circa 26 mm/100 anni (*Figura 24*).

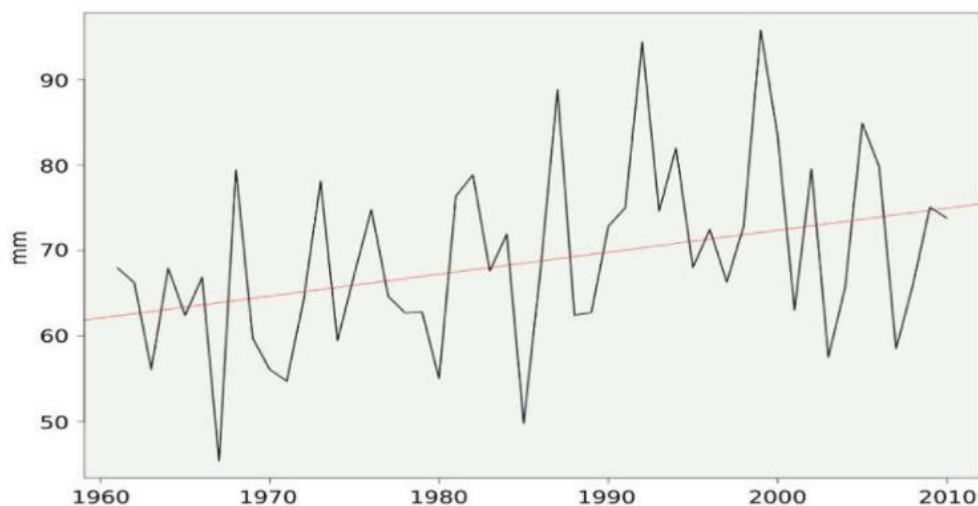


Figura 24: Andamento medio delle precipitazioni massime giornaliere negli ultimi 50 anni (ISPRA, 2012)

In *Figura 25* sono invece riportati i valori di precipitazione mensile cumulata media calcolata tra il 2014 e il 2018 e registrati nella stazione meteorologica di Lambrate. Si può osservare come durante l'anno siano stati misurati valori di precipitazione uniformi con picchi a febbraio e novembre; i valori di precipitazioni minori sono invece stati registrati nel mese di dicembre.

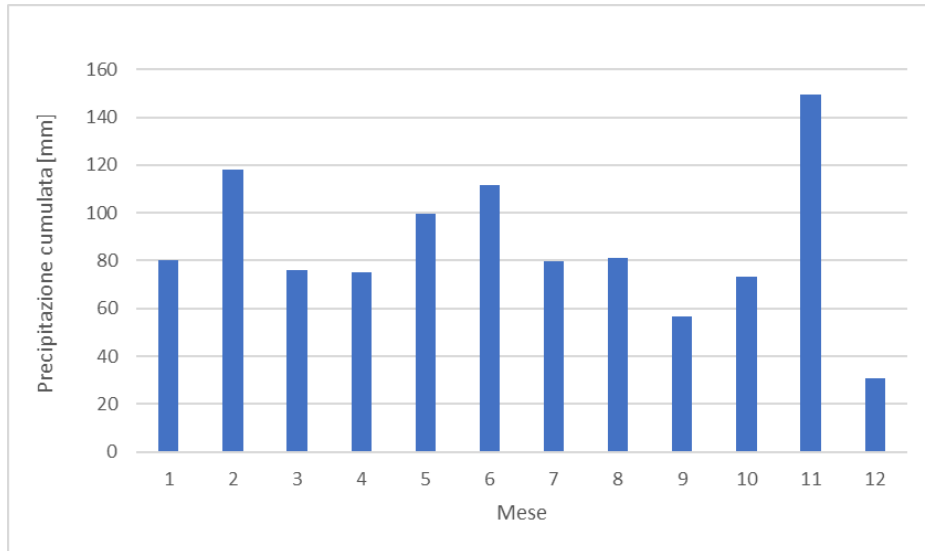


Figura 25: Precipitazione mensile cumulata media degli anni 2014-2018 registrati nella stazione meteorologica di Lambrate

3 Implementazione del modello di flusso

Nel seguente capitolo verrà brevemente descritto il modello di flusso transitorio realizzato dal Politecnico di Milano nell'ambito del progetto MODEL-MI in collaborazione con Metropolitana Milanese (MM) [3]. Per l'implementazione di tale modello è stato utilizzato il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW-2005 [2] e l'interfaccia grafica Groundwater Vistas7 (Environmental Simulations Incorporated) [24]. Il modello è stato inizialmente implementato e calibrato (conducibilità idraulica) in stato stazionario rappresentando le condizioni dell'anno 2014. Successivamente, è stato adattato per simulare un periodo di tempo pari a 5 anni, da gennaio 2014 a dicembre 2018, utilizzando una buona discretizzazione temporale con lo scopo di rappresentare dettagliatamente le variazioni stagionali del carico idraulico, modificando i parametri di ricarica verticale e quota idrometrica dei canali irrigui presenti nell'area di studio. Infine, l'orizzonte di simulazione del modello è stato esteso con l'obiettivo di valutare alcuni scenari futuri legati agli effetti dei cambiamenti climatici.

3.1 Discretizzazione spaziale del dominio

L'area in esame ha un'estensione di circa 1900 km^2 ed è compresa tra il fiume Ticino ad Ovest e il fiume Adda ad Est; il limite a Nord invece è posto all'altezza di Busto Arsizio mentre quello a Sud si trova in corrispondenza del Comune di Lodi.

Per quanto riguarda la discretizzazione orizzontale, è stata scelta una griglia regolare ed uniforme avente elementi quadrati di $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$. La [Figura 26](#) mostra l'estensione del dominio e le relative celle attive ed inattive.

La discretizzazione verticale del modello è stata invece sviluppata con lo scopo di rappresentare al meglio i principali Gruppi Acquiferi (GrA e GrB) presenti nella zona di interesse. Sulla base del modello concettuale si è deciso di implementare *7 layers*. Il primo *layer* rappresenta l'acquifero superficiale libero (GrA) mentre il secondo riproduce la lente di separazione idraulica presente tra i due Gruppi Acquiferi (aquitard). I complessi acquiferi e i livelli argillosi-limosi che costituiscono il GrB sono stati rappresentati dal terzo al settimo *layer*. La discretizzazione verticale è riportata in [Figura 27](#).

Il modello risulta quindi essere caratterizzato da un totale di 1'315'265 celle attive con 338 righe e 663 colonne.

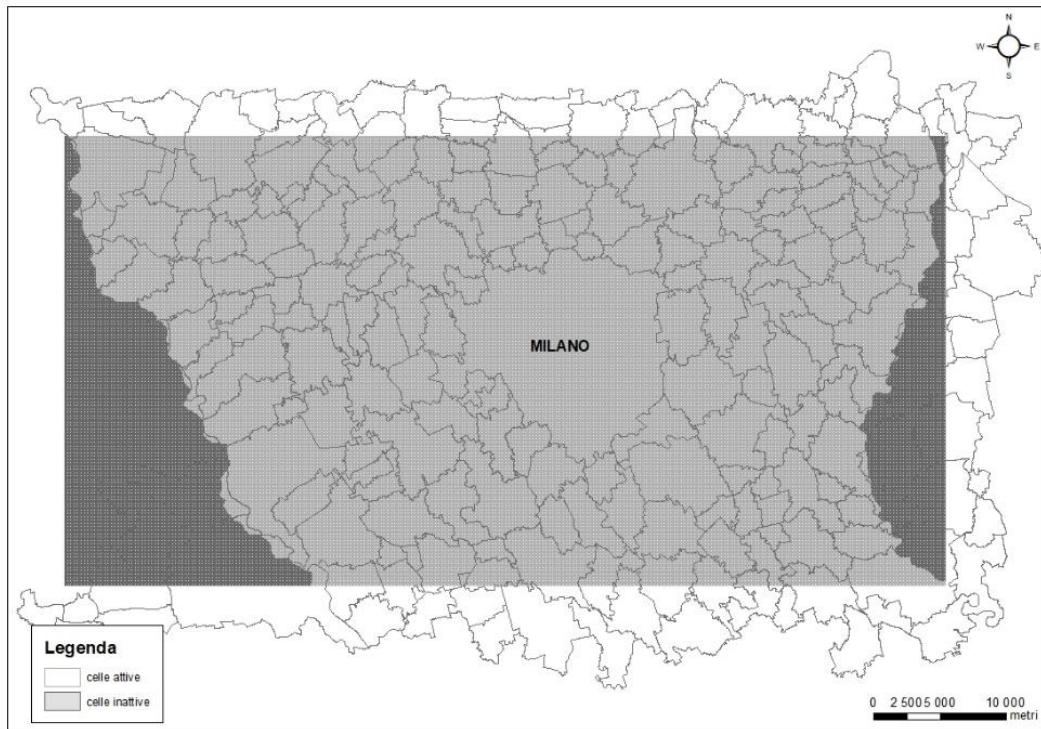


Figura 26: Discretizzazione orizzontale del modello di flusso [3]

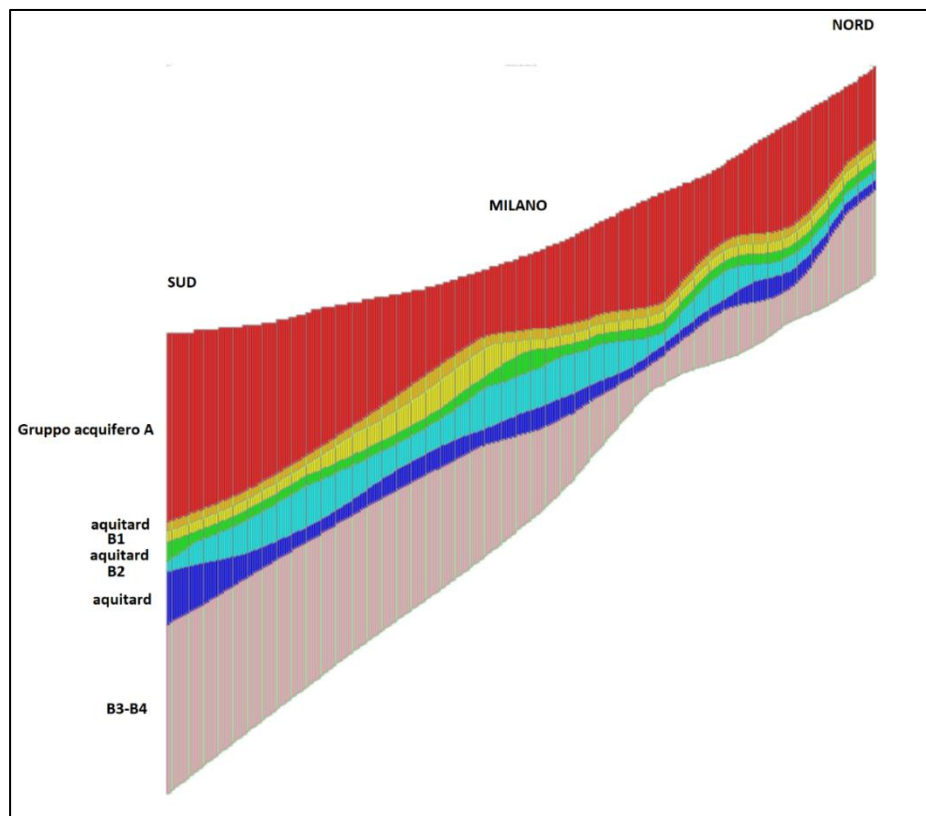


Figura 27: Discretizzazione verticale del modello di flusso in una sezione N-S [3]

3.2 Discretizzazione temporale

La discretizzazione temporale è stata scelta tenendo in considerazione la stagionalità delle pratiche irrigue. È stato dimostrato infatti che, grazie alla presenza di vaste aree agricole e di importanti canali irrigui (Canale Villoresi, Navigli Lombardi), la ricarica irrigua gioca un ruolo fondamentale per l'alimentazione della falda sottostante la provincia di Milano [25], [26]. Si è deciso quindi di suddividere ogni anno simulato in 4 *Stress Periods* (o periodi di carico, SP) per rappresentare correttamente la quantità di acqua circolante nei principali canali irrigui durante l'anno. La suddivisione è riportata in *Tabella 2*.

Tabella 2: Suddivisione di un anno di simulazione in 4 Stress Period rappresentativi

Stress Period	Intervallo temporale	Giorni	Time step
1	1 gennaio – 31 marzo	90	20
2	1 aprile – 15 giugno	76	20
3	16 giugno – 15 settembre	92	20
4	16 settembre – 31 dicembre	107	20

Considerando che il modello di flusso è implementato in stato transitorio e riproduce il quinquennio compreso tra il 2014 e il 2018, esso risulta essere caratterizzato da un totale di 20 SP per una durata complessiva di 1'825 giorni.

3.3 Condizioni al contorno

I confini Ovest ed Est del modello discretizzato sono rappresentati rispettivamente dai fiumi Ticino ed Adda. Tali fiumi, pur subendo variazioni di carico stagionali, mantengono sempre lo stesso rapporto con la falda sotterranea [3]; per questo motivo si è deciso di rappresentarli utilizzando la condizione di Dirichelet o a "carico costante" (*Constant Head - CH*). Tali condizioni rappresentanti i fiumi sono state implementate solo nel primo *layer*.

La stessa condizione di carico costante è stata utilizzata anche per il confine settentrionale e per quello meridionale del modello. In questo caso non vi erano dei veri e propri limiti fisici in grado di controllare il livello della falda (come nel caso di Adda e Ticino) ma si è comunque scelto di utilizzare una condizione CH in virtù dell'elevata lontananza, rispetto alla zona di maggior interesse (città di Milano), dei limiti Nord e Sud.

Le condizioni riferite al confine Nord del dominio sono state implementate dal terzo al settimo *layer* in quanto, da rilevamenti sul campo, è risultato che i primi due *layers* risultino insaturi in quell'area. Viceversa, lungo il confine Sud le condizioni di carico costante sono state inserite in tutti i *layers*.

Pur essendo il modello in stato transitorio, è importante sottolineare come le condizioni al contorno siano state implementate in stato stazionario, cioè non facendole variare durante il periodo di simulazione. Questo perché i rilievi effettuati nei piezometri ubicati ai limiti del dominio modellistico non hanno evidenziato significative differenze di carico nel periodo tra il 2014 e il 2018, tali da giustificare una modifica dei valori delle condizioni al contorno [3]. Se si osserva per esempio, l'andamento dei livelli idrometrici dei fiumi Adda e Ticino nella *Figura 28* e nella *Figura 29*, si osserva che essi siano caratterizzati da un regime relativamente costante con variazioni dei livelli idrometrici più consistenti legate ad episodi temporalmente circoscritti.

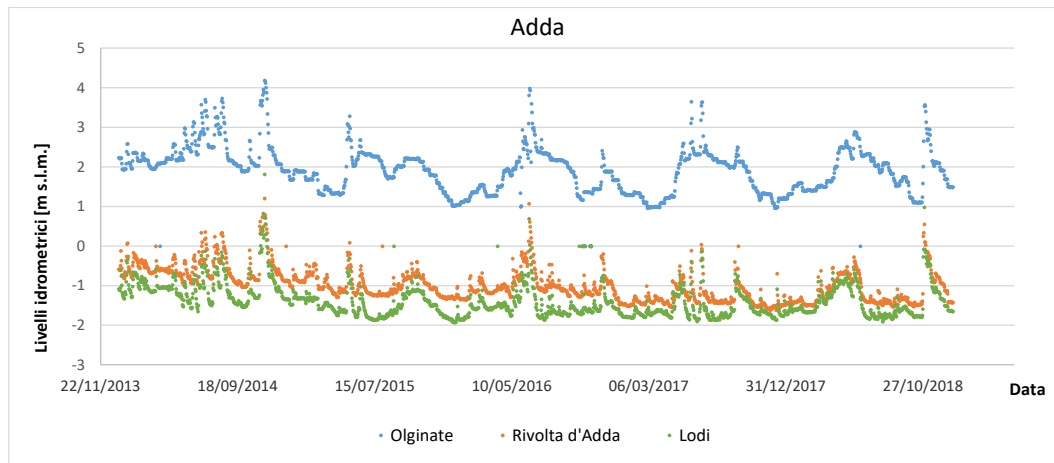


Figura 28: Livelli idrometrici del fiume Adda misurati in tre diverse stazioni idrometriche [3]

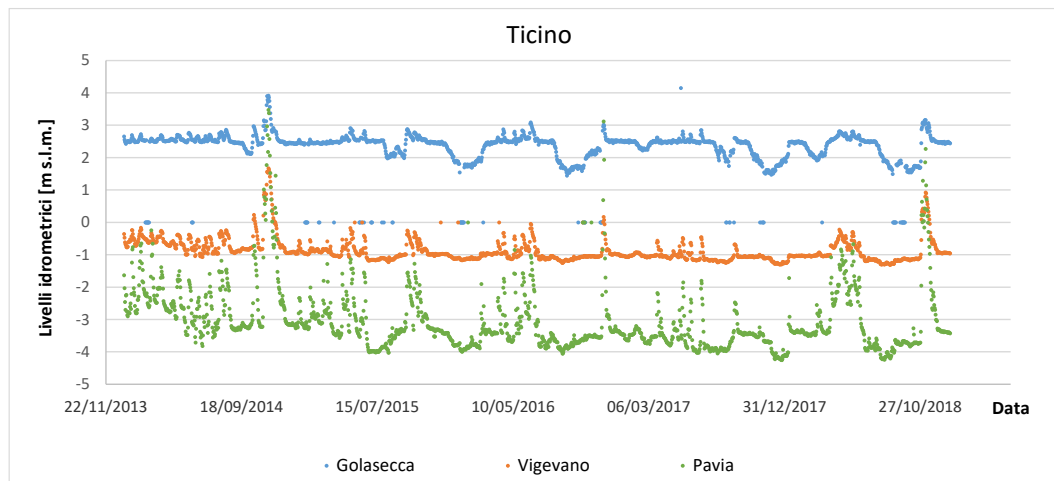


Figura 29: Livelli idrometrici del fiume Ticino misurati in tre diverse stazioni idrometriche [3]

Considerando infine la lontananza di tutte e quattro le condizioni al contorno dalla zona di maggior interesse, ovvero il Comune di Milano, si può concludere che implementare le condizioni in stato stazionario sia un'approssimazione accettabile per gli scopi del presente lavoro.

Oltre i limiti del modello costituiti dai fiumi Adda e Ticino invece sono state implementate delle condizioni No-Flow o di "flusso nullo" essendo presenti celle non appartenenti al dominio di modellazione.

3.3.1 Implementazione delle condizioni di Cauchy

In questo elaborato di tesi, è stato definito un secondo modello dove, nei confini Nord e Sud, sono state sostituite le condizioni al contorno CH con quelle di Cauchy o "a flusso dipendente dal carico" (*General Head Boundary, GHB*). È stata introdotta tale condizione in quanto, pur essendo più complicata da implementare, risulta più flessibile; con tale condizione, infatti, l'entità del flusso idrico che defluisce attraverso i bordi del dominio non è imposto, ma è funzione di quanto viene simulato all'interno del dominio stesso, ovvero nel nostro caso è funzione delle oscillazioni piezometriche interne all'area di studio. Permette quindi di ottenere andamenti più realistici dei livelli di falda.

Per l'implementazione delle GHB, è stata sfruttata una piezometria regionale relativa all'anno 2014 ottenuta dal Geoportale della Regione Lombardia. Sono stati considerati i carichi 3 km a Nord e 10 km a Sud dei confini del modello, è stato calcolato lo spessore saturo (e) per ogni cella della prima ed ultima riga di ogni *layer* del modello ed è stata calcolata la differenza di carico tra tali celle e la piezometria scaricata. Conoscendo la larghezza di ogni cella ($\Delta x = 100\text{ m}$), è stata calcolata la permeabilità (k) sfruttando la legge di Darcy e mantenendo i valori di flusso entranti (e uscenti) garantiti dalle CH. In questo modo si introduce un'approssimazione nell'implementazione delle GHB ma, con una futura calibrazione delle permeabilità, è possibile ottenere risultati più fedeli al reale andamento dei carichi.

È stata infine calcolata la conduttanza per ogni cella dei confini superiore e inferiore del modello mediante l'equazione [3.1]:

$$C = k \frac{\Delta x * e}{d} \quad [3.1]$$

in cui d è pari a 3'000 m per le celle della prima riga e 10'000 m per quelle dell'ultima. Tali valori di conduttanza sono stati poi importati in MODFLOW.

3.4 Condizioni interne

All'interno della zona di studio sono presenti pozzi di prelievo e corpi idrici superficiali che vanno ad interagire con la falda e ne influenzano il carico piezometrico nel tempo. Per questo motivo, nel modello di flusso, è necessario implementare delle condizioni interne che simulino il rapporto esistente tra tali elementi e i diversi acquiferi. Le condizioni interne implementate nel modello rappresentano fiumi, canali irrigui, pozzi, fontanili e la ricarica verticale.

3.4.1 Reticolo idrologico

I corpi idrici superficiali presenti all'interno del dominio sono i fiumi Olona, Lambro, Labro Meridionale e il torrente Seveso (Figura 30). Essi sono stati implementati mediante la condizione di Cauchy sfruttando il pacchetto RIVER di MODFLOW.

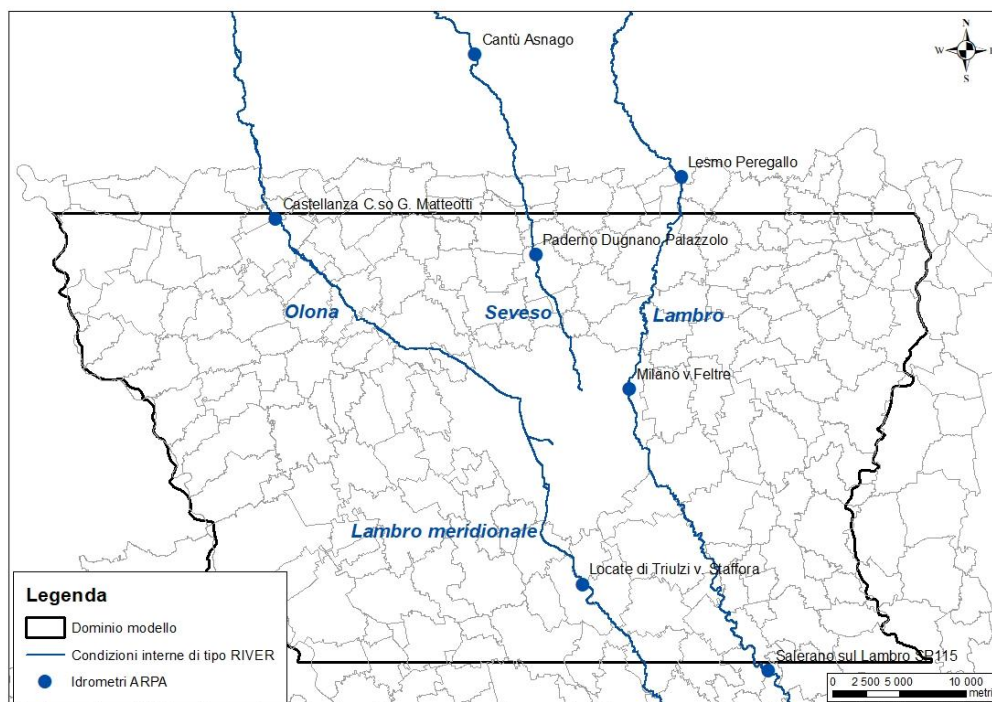


Figura 30: Reticolo idrologico presente nel dominio di modellazione [3]

Le informazioni riguardanti i livelli e le dimensioni delle sezioni sono state ottenute dal Geoportale della Regione Lombardia mentre quelle relative alle permeabilità dei fondali e allo spessore dei sedimenti sono state ottenute da informazioni di letteratura e da modelli numerici a larga scala o locali precedentemente implementati. Tutti i fiumi rappresentati con il pacchetto RIVER sono stati inseriti solo nel primo *layer* e, come già fatto per le condizioni al contorno, i carichi sono stati mantenuti costanti nel tempo.

3.4.2 Canali irrigui

Altri corpi idrici presenti nella zona di studio sono i canali irrigui che, a causa delle loro perdite distribuite lungo il loro percorso, vanno ad alimentare la falda sotterranea. I principali canali sono (Figura 31):

- Canale Villoresi;
- Naviglio Grande;
- Naviglio di Bereguardo;
- Naviglio Pavese;
- Canale Muzza;
- Naviglio Martesana.

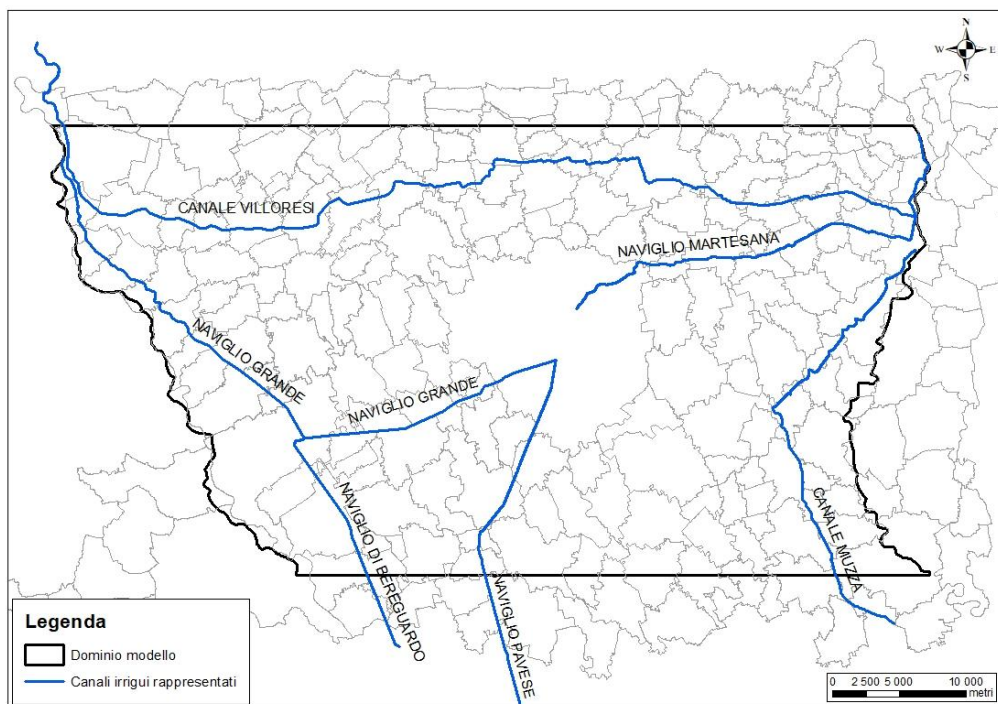


Figura 31: Canali irrigui presenti nel dominio di modellazione [3]

Essi sono stati implementati nel modello mediante la condizione di Neumann o “a flusso costante” utilizzando il pacchetto WELL e il loro contributo di alimentazione è differenziato durante l’anno considerando le percentuali medie transitanti nei canali nei diversi SP secondo i valori riportati in *Tabella 3*.

Tabella 3: Derivazione canali per ogni Stress Period durante il corso di un anno

Stress Period	Derivazione canali %
1	0
2	62
3	88
4	0

3.4.3 Fontanili

I fontanili sono sorgenti d'acqua tipiche del territorio del Parco Agricolo Sud Milano. Con il progressivo degradare della pianura, l'acqua di falda, a causa delle particolari condizioni geologiche (alternarsi di strati permeabili e impermeabili) si trova ad emergere in una determinata fascia della pianura chiamata fascia dei fontanili. I fontanili presenti all'interno del dominio sono stati rappresentati con la condizione di Cauchy (GHB) utilizzando il pacchetto DRAIN presente in MODFLOW che permette di ben rappresentare il fenomeno che avviene nella realtà.

3.4.4 Pozzi di prelievo

All'interno del modello sono stati implementati 3'050 elementi analitici che simulano la portata emunta dai pozzi pubblici e privati presenti nell'area di interesse. Tali elementi analitici sfruttano la condizione di Neumann. I valori delle portate e delle profondità dei filtri (e quindi del *layer* di appartenenza) sono stati ottenuti dal confronto di diversi database disponibili: Sistema informativo Falda (SIF), Catasto Utenze Idriche 2013 (CUI) e database interno MM (Metropolitana Milanese Spa) sono stati utilizzati come database principali per l'area di Milano mentre, per le zone più periferiche, sono stati sfruttati database locali (BrianzaAcque, Provincia di Varese, Provincia di Milano).

In [Figura 32](#) sono riportati i pozzi implementati nel modello.

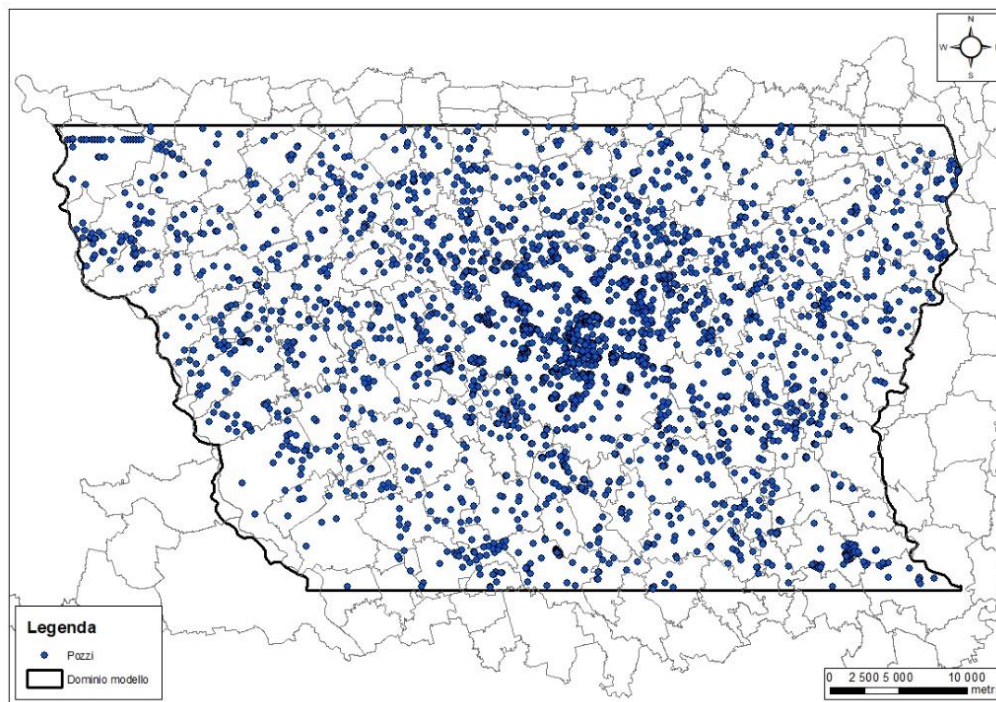


Figura 32: Ubicazione degli elementi analitici rappresentanti i pozzi [3]

3.4.5 Ricarica

La ricarica da fornire in input al modello è una portata di acqua per unità di area che si infiltra nel sottosuolo e che va ad alimentare la falda sotterranea. Il valore di tale portata è dato dalla somma delle infiltrazioni dovute alla precipitazione meteorica e alle attività antropiche (pratiche irrigue e perdite delle reti acquedottistiche) che verranno analizzate nel dettaglio in seguito. La ricarica è stata inserita, mediante il pacchetto RECHARGE, solo nel primo *layer* del modello ed è stata suddivisa in base alla classificazione della copertura del suolo ricavata dal Geoportale della Regione Lombardia facendo una distinzione tra area agricola, area urbana, area verde e area mista (Figura 33). Dove:

- Area agricola: la ricarica è data dalla somma di quota parte di precipitazione e una quota parte di irrigazione;
- Area urbana: la ricarica è data dalle perdite delle reti acquedottistiche;
- Area verde: la ricarica considera solo una quota parte di precipitazione;
- Area mista: area in cui non è stata identificata una tipologia univoca di suolo e in cui è stato attribuito un valore costante di ricarica pari a $5 \times 10^{-9} \text{ m/s}$.

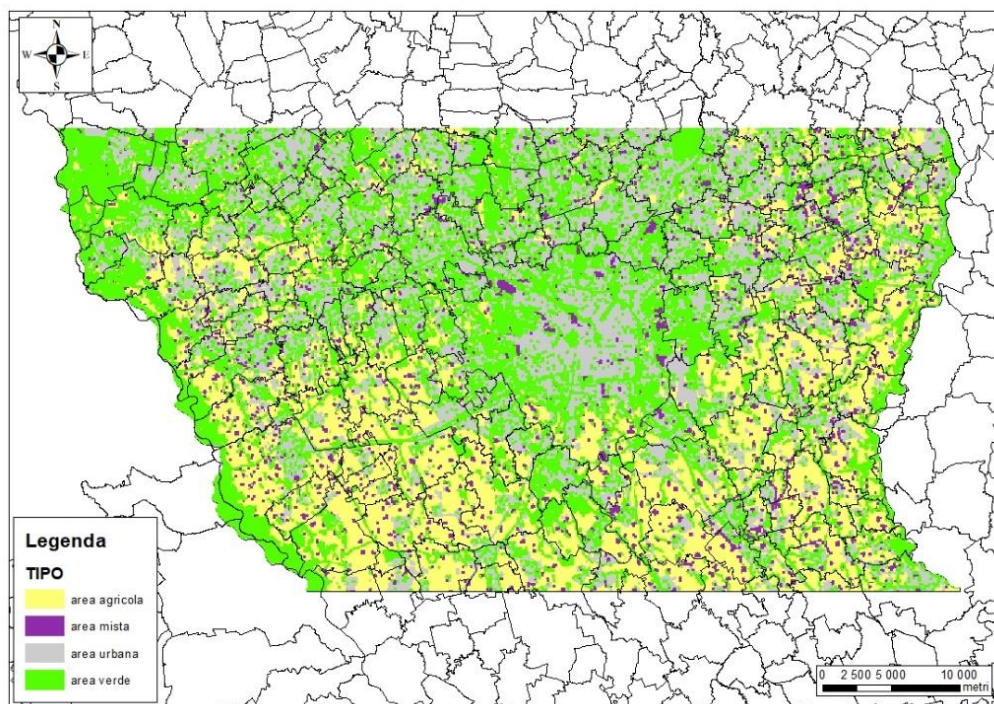


Figura 33: Classificazione dell'uso del suolo del dominio di modellazione [3]

RICARICA METEORICA

Il contributo della precipitazione è sicuramente uno degli elementi più importanti per la ricarica dell'acquifero nel bilancio di massa complessivo. Il calcolo della ricarica meteorica è stato svolto utilizzando il *software* Soil Water Balance introdotto nel primo capitolo; in questo caso, i dati climatici forniti in input al *software* sono i valori giornalieri di precipitazione e della temperatura media, minima e massima. Il metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione utilizzato invece è stato quello di Thornthwaite –Mather (T-M) [13]. La stima della ricarica meteorica è stata svolta sfruttando i dati delle tre diverse stazioni meteorologiche di Busto Arsizio, Lambrate e S. Angelo Lodigiano (definendo un areale di influenza per ogni stazione) per gli anni compresi tra il 2014 e il 2018 a scala giornaliera e i risultati sono stati aggregati in funzione della discretizzazione temporale utilizzata.

RICARICA IRRIGUA

Il contributo dovuto alle pratiche irrigue nei campi agricoli è variabile nel corso dell'anno in funzione del valore di portata transitante nei principali canali irrigui (*Tabella 2*). Si ha quindi che durante il periodo invernale (16 settembre–31 marzo) la ricarica irrigua è nulla, aumenta in primavera (1 aprile–15 giugno) e raggiunge il suo massimo in estate (16 giugno–15 settembre). Si è ipotizzato che tale ricarica sia distribuita uniformemente in comprensori e sub-comprensori coincidenti alle aree sottese rispettivamente ai canali principali e ai canali secondari derivanti dal

canale Villoresi (Figura 34). Non è stata invece fatta alcuna distinzione in merito al tipo di coltivazione presente e quindi al diverso fabbisogno idrico.

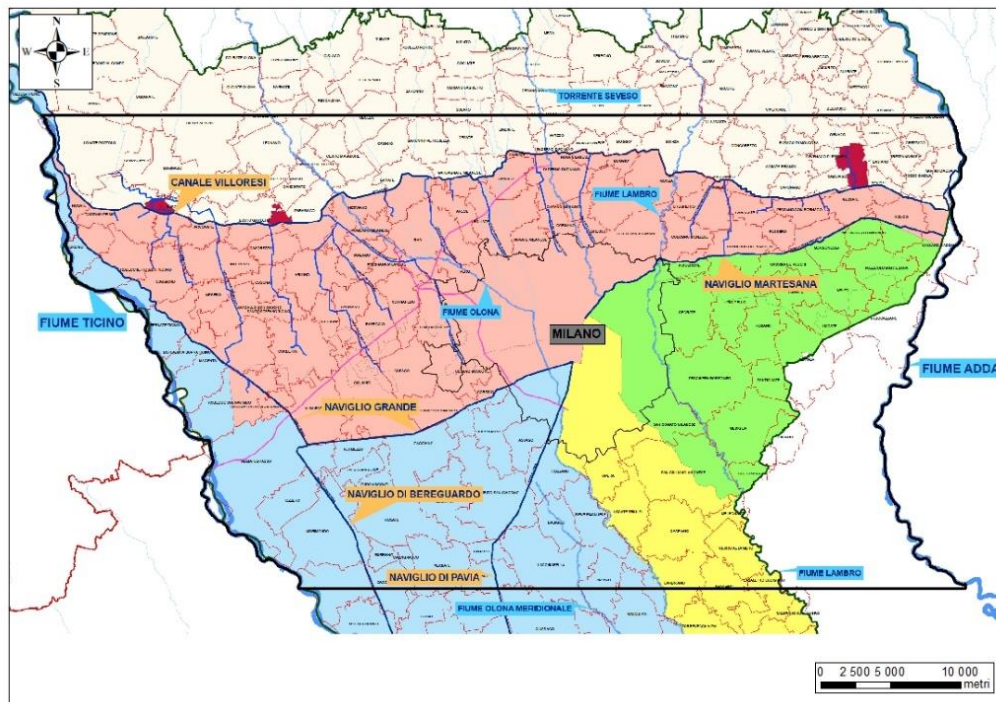


Figura 34: Distinzione dei diversi comprensori in cui è stata applicata la ricarica irrigua [3]

RICARICA DOVUTA A PERDITE TECNOLOGICHE

Le aree urbane sono considerate impermeabili e quindi non risentono del contributo dato dalla precipitazione. L'unico contributo di ricarica presente in queste zone è dato dalle perdite delle reti pubbliche che vanno quindi ad alimentare la falda. Il calcolo di tale ricarica si basa sull'ipotesi di una percentuale di perdita pari al 15% delle portate transitanti all'interno dei pozzi di ogni comune [3]. Essa è stata poi distribuita uniformemente sulla superficie urbana del comune stesso.

3.5 Proprietà idrogeologiche

Per poter risolvere l'equazione discretizzata alle differenze finite è necessario conoscere anche le proprietà idrogeologiche. In particolare, MODFLOW richiede, per ogni cella, i valori di conducibilità idraulica e porosità.

3.5.1 Conducibilità idraulica

Per ipotesi, tutti i valori di conducibilità idraulica sono stati assunti come isotropi nel piano orizzontale ed anisotropi lungo la direzione verticale andando a ridurre quest'ultima di un ordine

di grandezza ($K_x = K_y = 10 \times K_z$). I valori numerici della permeabilità sono stati ripresi da un modello a larga scala implementato nell'ambito del progetto ARPA-Plumes [27], [28] e da un modello più piccolo rappresentante la zona Nord del Comune di Milano [29].

3.5.2 Porosità

Essendo il modello implementato in stato transitorio, è stato necessario definire anche i parametri relativi alla capacità di immagazzinamento degli acquiferi: lo Specific Yield (S_y) per gli acquiferi liberi e lo Specific Storage (S_s) per quelli confinati. In questo caso, è stato assegnato allo S_y un valore pari al 20% per le porzioni permeabili dei Gruppi Acquiferi e al 5% per le porzioni meno permeabili mentre allo S_s è stato assegnato un valore di $1 \times 10^{-4} m^{-1}$, costante su tutto il modello.

3.6 Risultati del modello

Prima di valutare i risultati e la capacità del modello di riprodurre il comportamento dei livelli delle acque sotterranee, è stata necessaria la calibrazione dei valori di permeabilità. Tale calibrazione è stata effettuata utilizzando il programma PEST [30] basandosi su osservazioni di carico implementate tramite target nel dominio di modellazione; in questo progetto i target corrispondono a dati di livelli piezometrici distribuiti uniformemente all'interno della zona di studio. Complessivamente sono state utilizzate 3'114 misure piezometriche appartenenti a 357 punti (*Figura 35*) e si è optato per l'assegnazione di un peso maggiore per i punti ubicati all'interno del Comune di Milano con lo scopo di ottenere una miglior calibrazione nell'area di maggior interesse.

La condizione iniziale che è stata utilizzata per la simulazione in transitorio è la piezometria ottenuta da una precedente simulazione, in regime stazionario relativa all'anno 2014, del medesimo modello. Al termine della simulazione in transitorio si è proceduto all'analisi degli indici statistici del modello che hanno permesso di confrontare i valori simulati con quelli osservati.

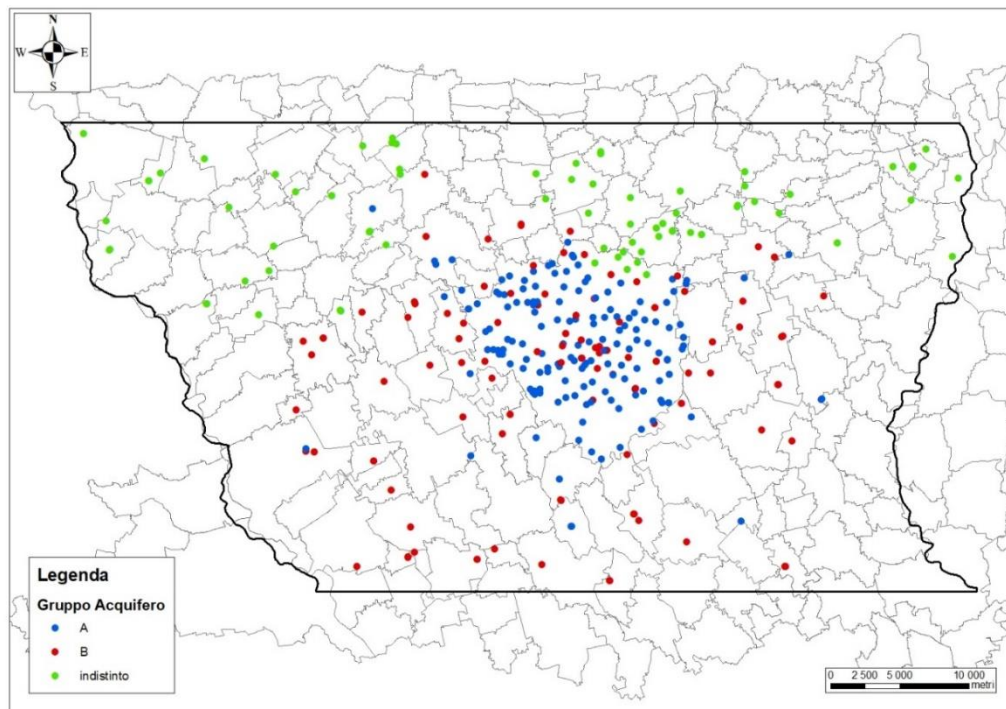


Figura 35: Ubicazione dei target implementati all'interno del dominio di modellazione [3]

In Tabella 4 sono riportati i principali indici statistici riferiti sia al modello avete a Nord e Sud le CH, sia al modello che implementa le GHB. All'interno di questo elaborato si farà riferimento ai due modelli come Modello CH e Modello GHB.

Tabella 4: Indici statistici della simulazione

Indice statistico	Modello CH	Modello GHB
Media dei residui [m]	-0.59	-0.77
Media assoluta dei residui [m]	2.02	1.98
Deviazione standard [m]	2.55	2.70
Residuo minimo [m]	-9.49	-13.25
Residuo massimo [m]	7.83	8.18
Media assoluta scalata [%]	1.9	1.8
Deviazione standard scalata [%]	2.4	2.5

Soffermandosi prima sul modello implementato da MM, considerando la sua estensione e complessità e le incertezze delle misure dei target piezometrici dovute a database discordanti tra loro, il valore della media assoluta dei residui pari a 2.02 m è da valutare come un buon indicatore dell'efficacia del modello nel rappresentare le evoluzioni dei livelli di falda. Il valore della media dei residui (dato dalla differenza tra valori osservati e valori simulati) pari a -0.59 m fa intendere che durante la simulazione si sovrastima il carico reale della falda. Infine, i valori scalati di deviazione

standard e media assoluta risultano entrambi accettabili in quanto inferiori al valore di 10% riconosciuto in letteratura come indicatore di una buona riproduzione modellistica [31], [32]. Si è giunti alle stesse conclusioni osservando lo *scatter plot* riportato in [Figura 36](#) in cui si evince una buona concordanza tra i valori osservati e i risultati del modello.

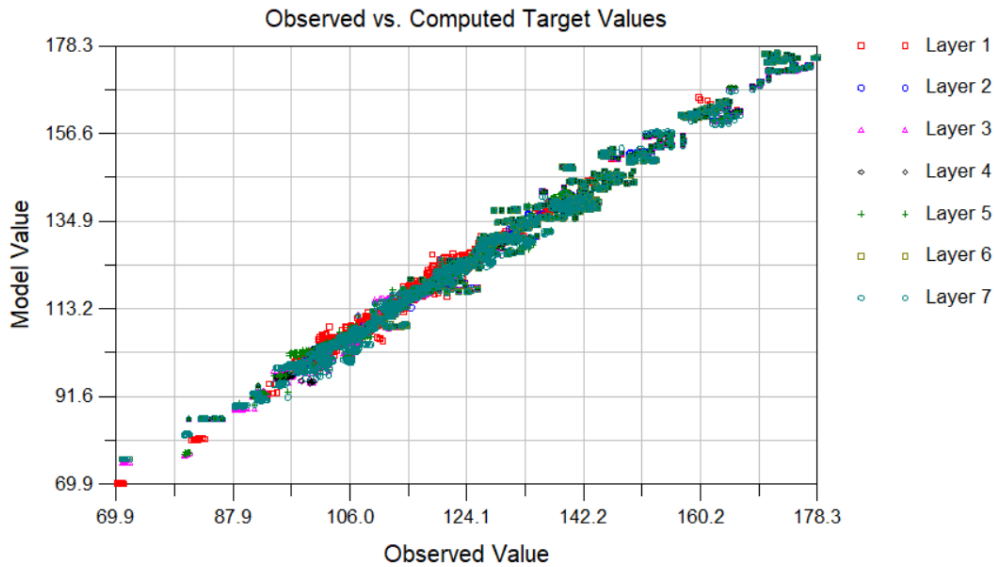


Figura 36: Scatter plot dei valori osservati e simulati [3]

Risultati simili si ottengono con il Modello GHB. I valori scalati di deviazione standard e media assoluta restano pressoché invariati risultando inferiori al valore di 10%; si registra un miglioramento della media assoluta dei residui che diminuisce a 1.98 m e un peggioramento della deviazione standard che passa da 2.55 m a 2.70 m.

Complessivamente, le analisi effettuate consentono di affermare che entrambi i modelli sono in grado di riprodurre con una buona accuratezza le evoluzioni dei livelli di falda nel tempo determinate dalla variazione delle variabili in ingresso e in uscita del sistema.

4 Influenza delle condizioni al contorno sui risultati del modello

Nel seguente capitolo viene analizzato l’impatto della variazione delle condizioni al contorno del Modello CH sui risultati della simulazione. Il modello in esame è stato implementato e calibrato con l’obiettivo di svolgere simulazioni previsionali e fornire una stima dei carichi piezometrici della falda sottostante la Città Metropolitana di Milano. È quindi importante conoscere quali sono le condizioni al contorno (e le proprietà) che maggiormente influenzano i livelli simulati all’interno del modello.

In questo caso, le condizioni che sono state fatte variare sono quelle implementate nei confini settentrionale, meridionale e nei limiti Ovest ed Est del modello, questi ultimi coincidenti con i fiumi Ticino ed Adda. Tutte e quattro le condizioni, come spiegato nel Capitolo 3, sono state inserite nel modello assegnando alle relative celle un carico idraulico costante (CH). In particolare, le analisi sono state svolte facendo sia diminuire che aumentare i carichi delle quantità riportate in *Tabella 5*.

Tabella 5: Valori delle variazioni imposte alle condizioni al contorno

Condizione	Variazione imposta al carico [m]					
Adda	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5
Ticino	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5
Adda e Ticino	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5
Nord	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5
Sud	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5
Nord e Sud	-1.5	-1	-0.5	+0.5	+1	+1.5

Oltre alle condizioni al contorno, è stato anche analizzato il ruolo che ricoprono le pratiche irrigue, componente importante della ricarica verticale, nei confronti dei livelli di falda. È quindi stata fatta variare la ricarica dovuta all’irrigazione facendola diminuire prima del 15% e poi del 30% rispetto a quella presente nel modello di partenza.

Per verificare l’influenza delle variazioni delle condizioni al contorno sui livelli all’interno della città di Milano, sono state elaborate sia mappe che grafici in particolari punti del dominio. Le

mappe permettono di visualizzare l'effetto delle variazioni in modo distribuito nell'areale di interesse mentre i grafici mostrano più nel dettaglio gli andamenti dei carichi piezometrici nel tempo in determinati punti del dominio. I punti di monitoraggio sono stati scelti considerando i quattro punti cardinali: ne sono stati selezionati quattro all'interno del Comune di Milano (o60-BignamiM5, o10-FamagostaM2, o64-SanSiroM5 e o4-LambrateM2) e quattro all'esterno, più vicini ai bordi del dominio (o112, o110, o106 e o115). La loro ubicazione è riportata in [Figura 37](#).

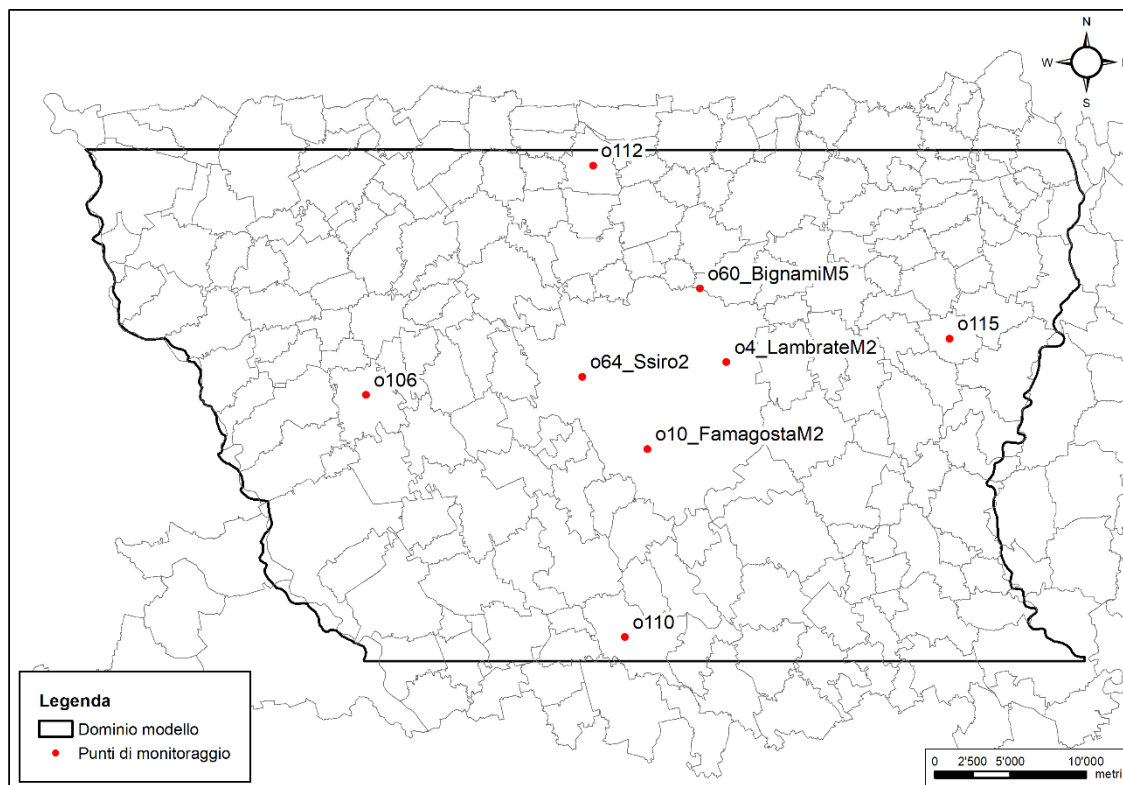


Figura 37: Ubicazione dei punti di monitoraggio considerati per lo studio dei carichi nel tempo

4.1 Variazione dei carichi di Adda e Ticino

Le prime condizioni che sono state analizzate sono quelle relative ai due fiumi che rappresentano i confini occidentale ed orientale del modello. Come illustrato in [Tabella 5](#), sono stati fatti variare i carichi prima di Adda e Ticino singolarmente e poi di entrambi contemporaneamente con lo scopo di valutare le influenze sui carichi dovute ad una variazione simultanea dei livelli dei due fiumi.

Per valutare gli effetti di tali variazioni è stata utilizzata la funzione *Automatic Sensitivity Analysis* disponibile all'interno della suite di Groundwater Vistas 7. Tale analisi permette di

scegliere il parametro da far variare, il *reach* da modificare, il numero di simulazioni da valutare e le entità delle variazioni da imporre al parametro stesso (Figura 38).

Automatic Sensitivity Analysis

Parameter to Modify: Constant Head

Zone or Reach to modify during analysis: 104

Number of Simulations: 6

Boundary Condition Reach to Monitor: 0

Base Residual Sum of Squares: 1

Use Weights in Computing Calibration Statistics:

Option to Save Output: Save Only Headsave Files

Use Addition instead of Multiplication for Boundary Heads:

Script File

Run from Script File

Script File Name: C:\GV7\TESI\Modello_MM\Mod_2020

Output File Name: C:\GV7\TESI\Modello_MM\Mod_2020

Use Super Script to Automatically Update Parameters

Number of Super Script Iterations: 5

Run MODFLOW Minimized

Save Detailed Residual Analysis to file

Save Data from Last Time Step for Monitoring Wells

Distributed Computing

Use Remote Model Launch for Distributed Computing

Write Complete Model Datasets at Start of Analysis

Figura 38: Schermata di GV7 in cui inserire i valori desiderati per svolgere l'analisi di sensitività automatica

In questo caso, il parametro modificato è la condizione CH con cui sono stati implementati i fiumi variando in ogni cella il carico originariamente assegnato avente valore decrescente da Nord a Sud. Sono state svolte 6 simulazioni e le variazioni che sono state imposte hanno mantenuto valori decrescenti nel senso del deflusso fluviale e vengono riportate in Tabella 5.

Per quanto riguarda la variazione in simultanea dei carichi dei due corsi d'acqua, l'analisi è stata eseguita manualmente sfruttando la funzione *Simplified Boundary Condition Editing* (Figura 39), che richiede i valori dei *reach* da modificare e l'entità delle variazioni dei carichi (è infatti possibile sfruttare l'*Automatic Sensitivity Analysis* solo per far variare un parametro di un solo *reach* alla volta).

Simplified Boundary Condition Editing

The following operations will be performed on the current Boundary Condition Type:

OK
Cancel

Location of Cells to Modify

Reach number: 103 to 104
 Layer Number: 1 to 7
 Row number: 1 to 338
 Column Number: 1 to 663
 HSU Zone Number: 0 to 9999

Special Boundary Condition Properties

Stream width: Not Modified 0
 Stream Roughness: Not Modified 0
 Stream Slope: Not Modified 0
 Wall (HFB) Thickness: Not Modified 0

Common Boundary Condition Properties

Head, Q, or Stage: Add -1.5
 Head Calculation Performed on Layer Bottom Elevation
 Head Calculation Performed only on Heads Below Layer Bottom

Reach Number: Not Modified 0
 Concentration: Not Modified 0
 Hydraulic Conductivity: Not Modified 0
 River-Stream Bottom: Not Modified 0
 Calculation Performed on River or Stream Stage Elevation

Change Title

Change Boundary Color

Color...

Figura 39: Schermata di GV7 in cui inserire i valori per modificare i carichi delle condizioni al contorno

Una volta svolti tutti i run con i carichi dei fiumi opportunamente modificati, sono stati valutati i carichi piezometrici ottenuti, confrontandoli con quelli ricavati dalla simulazione del modello originale. In particolare, per ogni scenario è stata calcolata la variazione di carico della falda (innalzamento o abbassamento) corrispondente, rispetto alle condizioni iniziali del sistema simulate dal Modello CH. La variazione di carico è stata calcolata tramite differenza, cella per cella, tra i carichi piezometrici ottenuti da ogni scenario e quelli ricavati dal modello di partenza in modo tale che i valori positivi corrispondessero ad innalzamento della falda e i valori negativi rappresentassero un abbassamento dei livelli dell'acqua.

In [Figura 40](#), sono riportati, a titolo di esempio, le variazioni dei livelli idrici dovute ad un incremento e decremento dei carichi dei fiumi di $\pm 1.5 m$. Le immagini sono riferite all'ultimo SP, corrispondente al periodo compreso tra il 16 settembre e il 31 dicembre 2018.

Le variazioni piezometriche maggiori si registrano ai margini del modello lungo i fiumi Adda e Ticino dove si raggiungono abbassamenti (o innalzamenti) della falda di massimo $1.5 m$. Si osserva inoltre come aumentando o diminuendo i carichi delle condizioni al contorno si ottengano le stesse zone di influenza per variazioni della stessa intensità in modulo.

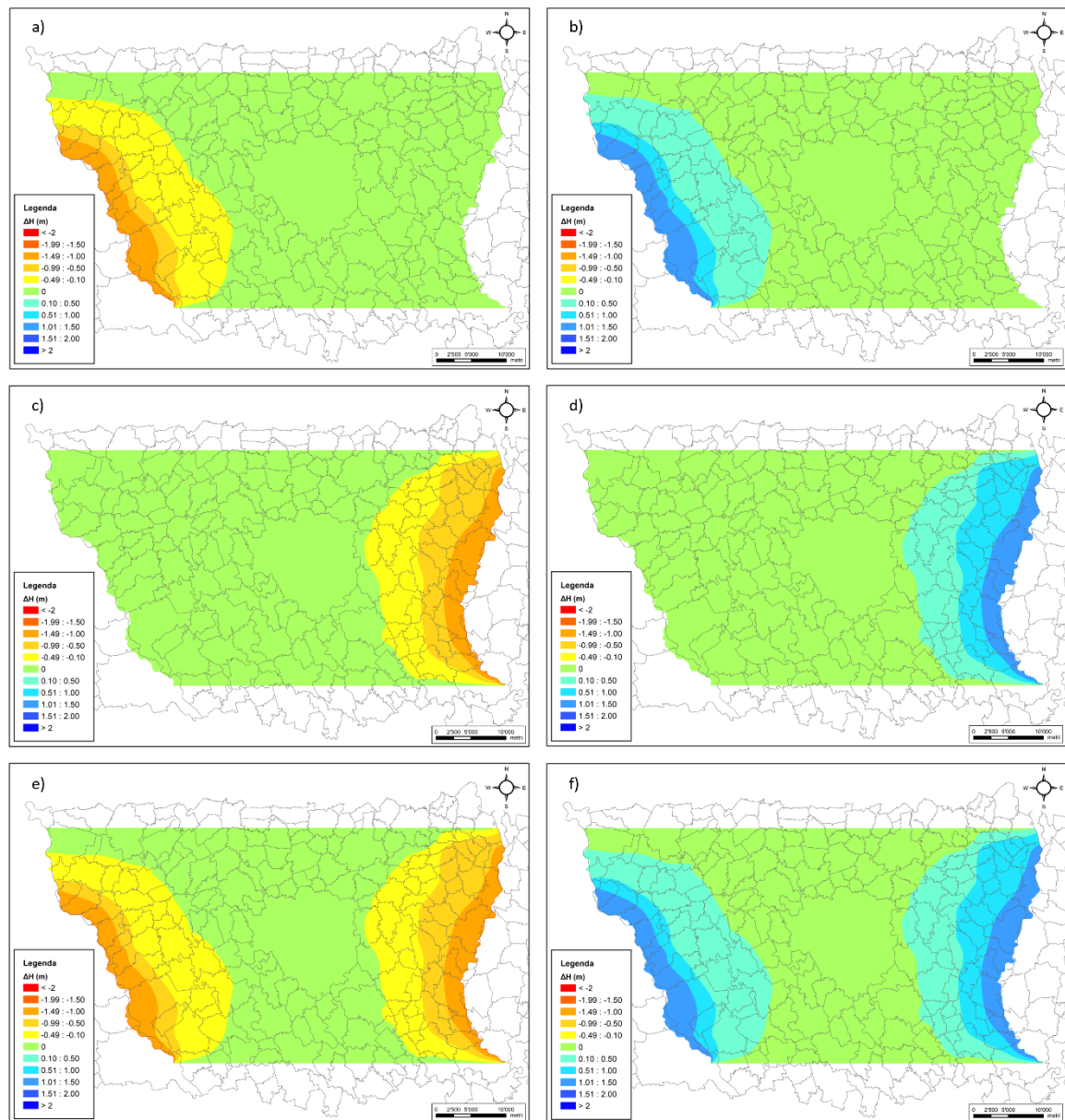


Figura 40: Variazione del carico idraulico relativi ad una variazione di $-1.5m$ (a, c, e) e $+1.5m$ (b, d, f) del fiume Ticino (a, b), del fiume Adda (c, d) e di entrambi (e, f)

La variazione di carico del Ticino di $1.5 m$ (Figura 40 a, b), ha un'influenza sull'area del modello che si estende verso Est fino al Comune di Gaggiano rimanendo quindi distante dalla zona di maggior interesse riguardante il Comune di Milano.

L'influenza dell'Adda invece (Figura 40 c, d) arriva fino al Comune di Segrate, più vicino quindi alla città di Milano, con variazioni massime di circa $0.25 m$.

Si può inoltre notare come, variando i carichi di entrambi i fiumi (Figura 40 e, f) contemporaneamente, le zone di influenza rispettivamente di Adda e Ticino rimangono invariate

rispetto a quelle ottenute facendo variare i carichi dei fiumi singolarmente; non si ha quindi una sovrapposizione degli effetti dovuta alla variazione simultanea dei carichi di entrambi i fiumi. Si fa inoltre presente che nelle zone Nord e Sud più prossime alle condizioni al contorno di monte e di valle, queste ultime, non essendo state variate, contrastano la variazione imposta nei fiumi pressoché annullandone l'effetto.

È possibile quindi affermare che, per l'area di interesse, le condizioni al contorno definite da Adda e Ticino non hanno un'influenza elevata sui carichi piezometrici risultanti della simulazione del modello. Infatti, anche nel caso i fiumi si dovessero costantemente abbassare di ben 1,5 m rispetto al livello medio assegnato nel Modello CH, gli effetti più consistenti sui livelli di falda rimarrebbero comunque limitati ad una fascia di circa 2,5 Km dall'alveo. Questo avviene perché i due fiumi scorrono per gran parte del loro percorso in una valle profondamente incisa rispetto al livello medio di pianura, costituendo, a prescindere dal livello delle acque superficiali, un elemento drenante della falda milanese.

4.2 Variazione dei carichi a Nord e Sud

Per quanto riguarda le condizioni ai bordi Nord e Sud, anch'esse implementate come CH, sono state fatte variare seguendo i passaggi svolti in precedenza per Adda e Ticino; è stata modificata prima solo la condizione a Nord, poi solo quella a Sud ed infine entrambe contemporaneamente.

È stato possibile utilizzare la funzione *Automatic Sensitivity Analysis* solo per la condizione a Sud in quanto implementata mediante un solo *reach* (102) all'interno del modello. Per quanto riguarda la condizione a Nord invece, essendo implementata mediante tre *reach* differenti (105, 106, 107), è stato necessario far variare i carichi manualmente mediante il comando *Simplified Boundary Condition Editing*. In questo caso, i carichi sono stati modificati non solo nel primo *layer* ma in tutti i *layers* in cui sono implementate le condizioni a Nord e a Sud.

Le variazioni di carico analizzate sono riportate in *Tabella 5* e al termine delle simulazioni sono state calcolate le variazioni di carico rispetto a quelli simulati dal modello di partenza, come già fatto per le condizioni di Adda e Ticino.

In *Figura 41*, sono riportate le variazioni dei livelli piezometrici relative a cambiamenti del carico pari a ± 1.5 m. Anche in questo caso, le immagini si riferiscono allo SP 20.

Come già avveniva per i fiumi Adda e Ticino, è possibile osservare come le zone di influenza che si ottengono coincidano aumentando o diminuendo i carichi delle condizioni al contorno. Come atteso, le variazioni di carico sono più marcate nei pressi dei bordi settentrionale e meridionale del modello e diminuiscono procedendo verso la città di Milano.

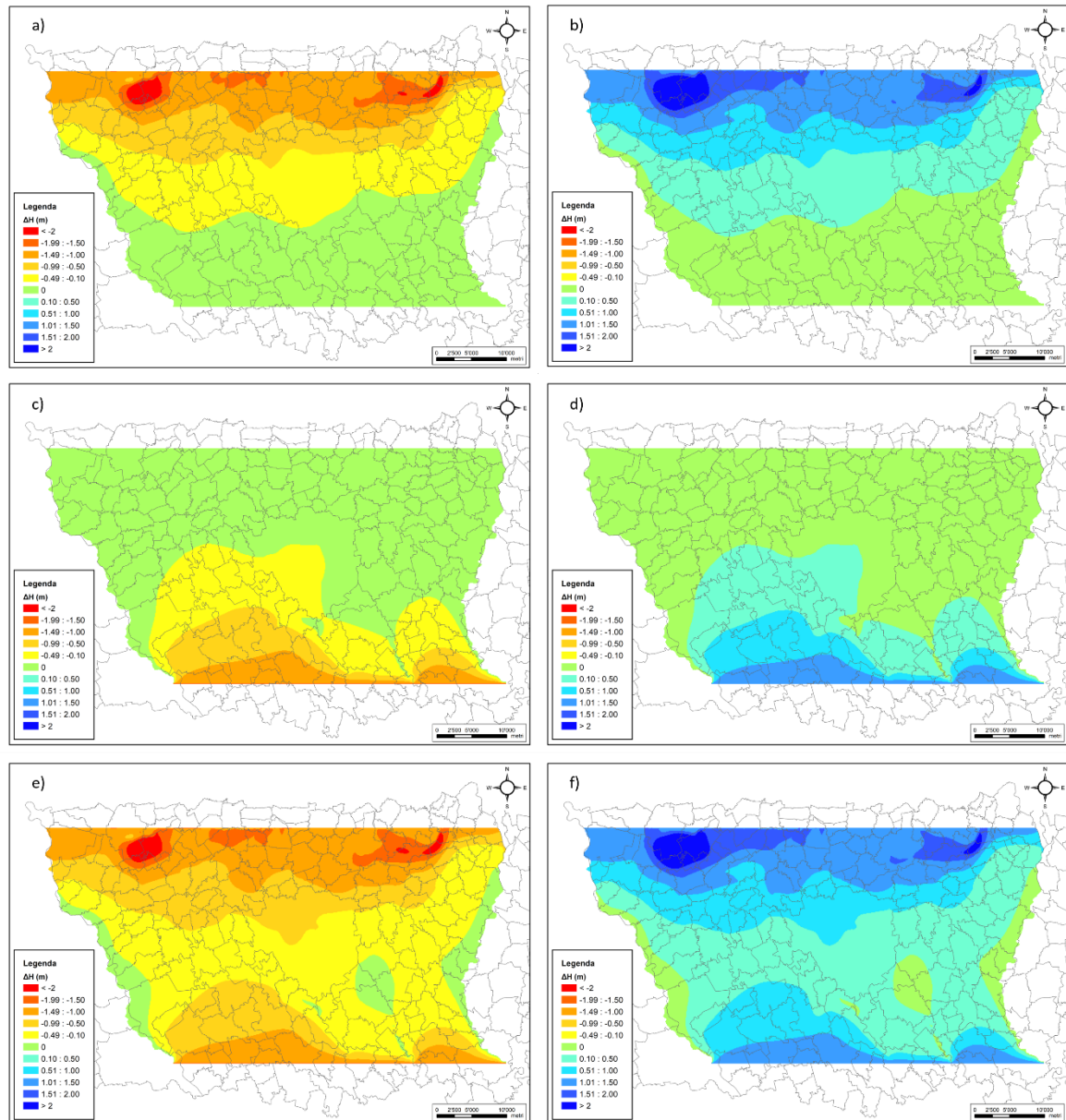


Figura 41: Variazione del carico idraulico relativi ad una variazione di $-1.5m$ (a, c, e) e $+1.5m$ (b, d, f) della condizione a Nord (a, b), a Sud (c, d) e di entrambe (e, f)

La zona di influenza che si ottiene variando il carico della condizione a Nord (Figura 41 a, b) è molto più estesa rispetto a quelle viste in precedenza. Se, per esempio, si considera l'aumento di $1.5 m$ del carico, si possono osservare variazioni dei livelli di falda che ricoprono anche buona parte della città di Milano. L'area che ne risente maggiormente è quella a Nord del modello in cui si

registrano variazioni anche maggiori di 2 m; questo è probabilmente dovuto alle condizioni geologiche dell'area e in particolare all'alternarsi di strati permeabili e lenti argillose che rendono difficoltoso il deflusso del maggior quantitativo d'acqua immesso dalle condizioni al contorno di monte. All'interno dei confini di Milano invece si registrano oscillazioni di carico di circa 0.5 m fino ad arrivare ad un massimo di 1 m nella fascia più a Nord del comune.

Facendo variare la condizione a Sud (*Figura 41 c, d*) si ottiene una zona di influenza di estensione minore, ma comunque superiore a quelle relative ai fiumi Adda e Ticino. Anche in questo caso, infatti, aumentando (o diminuendo) il carico di 1.5 m si ottengono degli innalzamenti (o abbassamenti) della falda a Milano. In particolare, nella città viene interessata solo una fascia che si estende in direzione Sud-Ovest in cui si registrano variazioni dei livelli piezometrici di circa 0.5 m.

Infine, si osserva che imponendo una variazione di carico contemporaneamente alle due condizioni al contorno (*Figura 41 e, f*), si ottiene un'area di influenza che non è la semplice sovrapposizione delle aree viste prima. In questo caso quasi tutta l'area di modellazione è soggetta ad oscillazioni dei livelli di falda ad eccezione dei confini laterali (vincolati dai fiumi) e di un'area circoscritta nella zona Sud-Est del dominio dove è presente il fiume Lambro. La falda sottostante la città di Milano è soggetta a variazioni dei livelli che raggiungono un massimo di 1 m nella zona più a Nord.

Dato che le condizioni a Nord e Sud portano a variazioni dei livelli piezometrici all'interno della zona di maggior interesse, è stato analizzato più dettagliatamente il loro effetto sui carichi nel tempo all'interno del capoluogo lombardo tramite la realizzazione di grafici in punti specifici. In particolare, in *Figura 42* sono riportati gli andamenti dei carichi ottenuti durante i cinque anni di simulazione riferiti ai pozzi di monitoraggio di Bignami (Nord di Milano) e Famagosta (Sud di Milano). In ogni grafico, oltre alla linea tratteggiata rappresentante l'andamento dei carichi del modello di partenza, sono riportati gli andamenti dovuti alle variazioni delle condizioni al contorno di ± 1.5 m e ± 1 m. In *Figura 42 a, b* vengono modificati solo i carichi a Nord, in *Figura 42 c, d* solo quelli a Sud e in *Figura 42 e, f* vengono fatti variare entrambi.

Dai grafici si evince come l'influenza delle variazioni dei carichi nelle condizioni al contorno aumenti all'aumentare del tempo; è necessario che trascorra circa un anno prima di osservare discostamenti rilevanti dalla soluzione iniziale (linea tratteggiata). Si osserva inoltre come i carichi di entrambe le stazioni, pur essendo poste alle estremità superiore e inferiore della città di Milano,

siano maggiormente influenzati dalla condizione di Nord che porta ad una variazione massima di circa 1 m nel pozzo “o60” e di 0.3 m nel pozzo “o10”.

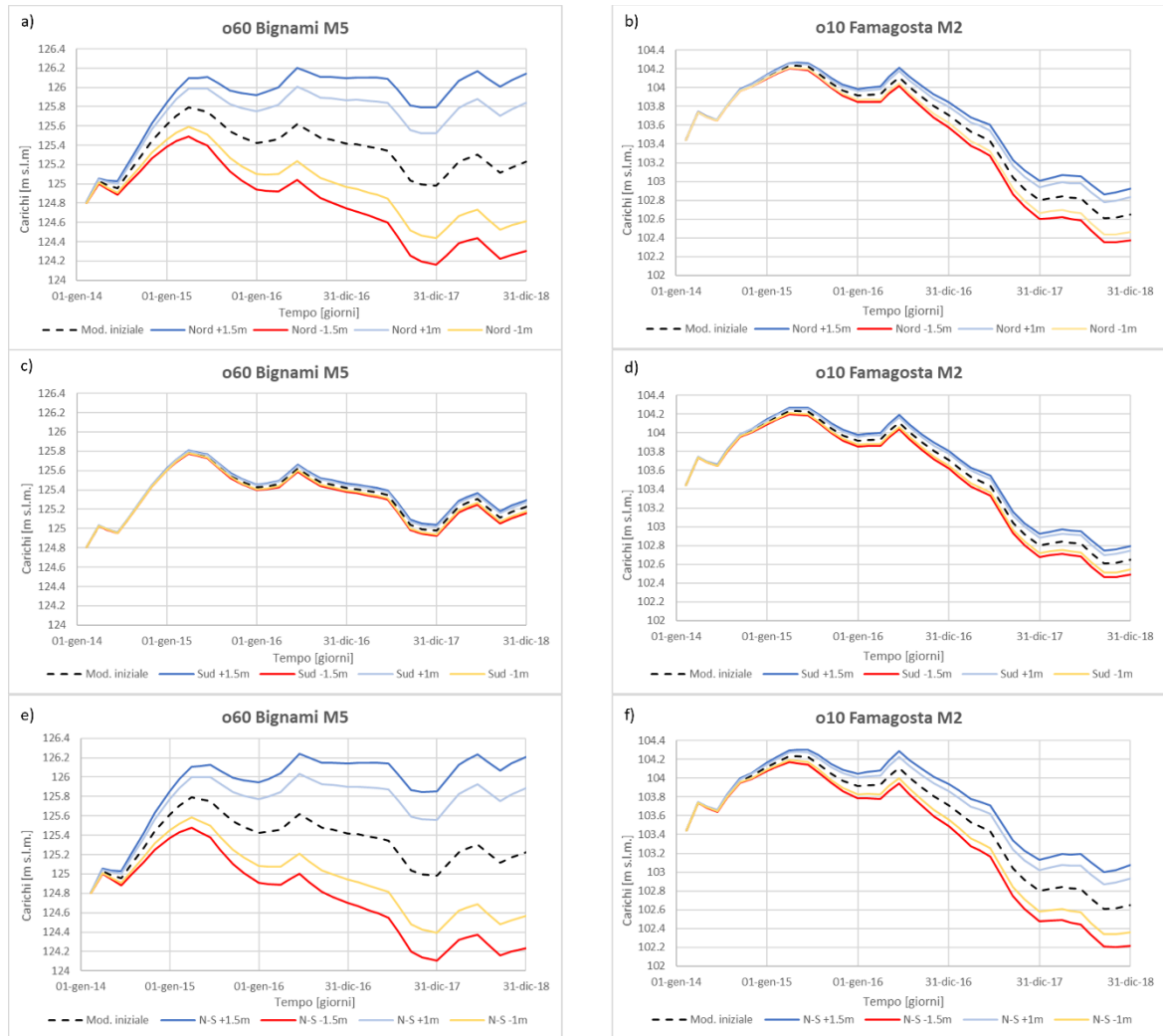


Figura 42: Andamento dei livelli piezometrici nel tempo nei punti di monitoraggio ubicati nelle stazioni metropolitane di Bignami (a, c, e) e Famagosta (b, d, f) per diverse variazioni di carico, ovvero dall’alto al basso solo a Nord, solo a Sud ed entrambe

Nella stazione di Famagosta, inoltre, si nota come la variazione in simultanea di entrambe le condizioni (Figura 42f) comporti un effetto più accentuato sui livelli piezometrici portando ad abbassamenti o innalzamenti massimi della falda di circa 0.5 m. Lo stesso effetto lo si ritrova, anche se meno evidente, anche nella stazione di Bignami. I grafici permettono anche di evidenziare come a partire dal terzo anno di simulazione il modello sia tornato in equilibrio con le mutate condizioni al contorno: le diverse linee di tendenza appaiono infatti non più divergenti rispetto la linea tratteggiata nera del modello originale, ma a lei parallela e parallele tra loro. Questo perché dal terzo anno in avanti l’entità stagionale della ricarica e dei prelievi idrici sono tornate ad essere le forzanti principali che regolano le oscillazioni della falda.

Si può quindi concludere che le condizioni al contorno a Sud e, in particolar modo, a Nord del modello, pur essendo molto distanti dalla Città Metropolitana di Milano, ne influenzano in modo non trascurabile i livelli piezometrici. Per questo motivo, per poter utilizzare il modello a scopo previsionale relativamente agli effetti dei cambiamenti climatici, tali condizioni dovranno essere opportunamente ridefinite perché siano meno forti e possano variare nel tempo in risposta alla variazione dei termini di ricarica futuri.

4.3 Variazione della ricarica irrigua

Una volta valutata l'influenza delle condizioni al contorno sui risultati delle simulazioni, è stato analizzato il ruolo che ricopre la ricarica irrigua sul bilancio totale del modello. L'area circostante la città di Milano, infatti, è caratterizzata dalla presenza di numerosi campi dedicati all'agricoltura aventi un'estensione totale di circa 910 km^2 , che vengono principalmente irrigati tramite la tecnica dello scorrimento superficiale; per l'irrigazione di tali aree vengono sfruttate le portate d'acqua transitanti all'interno dei Navigli e dei canali principali (Villoresi, Muzza). È dimostrato che questo tipo di irrigazione fornisce un contributo rilevante nell'alimentazione delle acque sotterranee [3], [33].

Le direttive europee ed in particolare la Water Framework Directive (2000/60/EC) dall'inizio degli anni 2000 incentivano le politiche gestionali che consentono un risparmio idrico. È opinione diffusa che il sistema irriguo a scorrimento utilizzato nella pianura lombarda, sia un sistema obsoleto a bassa efficienza in quanto utilizza grossi quantitativi di acqua prelevata dai fiumi che solo in minima parte vengono utilizzati dalle colture. Si stima che il 60-70% dell'acqua utilizzata con tale sistema s'infiltri nel sottosuolo. In realtà il volume che s'infiltra non costituisce uno spreco, ma una voce importante nella ricarica del sistema idrico sotterraneo. Per tale ragione nel presente studio sono stati simulati scenari di riduzione della quantità d'acqua a disposizione al fine di preliminarmente valutare quali impatti avrebbero sui livelli di falda eventuali politiche di risparmio idrico nel campo irriguo. Gli scenari qui adottati prevedono la riduzione della portata destinata all'irrigazione del 15% e del 30%.

In [Figura 43](#) e [Figura 44](#) sono riportati gli abbassamenti relativi all'ultimo anno di simulazione (2018), ovvero dopo 5 anni dall'ipotizzato cambiamento delle politiche irrigue. In questo caso è stata riportata un'immagine per ognuno dei 4 SP del 2018 in quanto il contributo irriguo ha un peso diverso durante l'anno solare e quindi la sua variazione avrà un'influenza differente sui livelli piezometrici a seconda del periodo analizzato.

Dalle immagini si può notare come, in entrambi i casi, la porzione del dominio che viene influenzata dalle variazioni della ricarica irrigua risulta essere molto estesa, con effetti maggiori nei comuni posti ad Est ed Ovest di Milano. Si hanno infatti abbassamenti della falda di almeno 0.1-0.5 m sull'intera area modellata ad eccezione dei bordi del dominio dove ovviamente le condizioni al contorno a carico costante del modello originale regolano i livelli delle acque sotterranee. È ben visibile l'influenza stagionale che la ricarica irrigua ha sui risultati del modello; nello SP 17 (*Figura 43a, Figura 44a*), rappresentate i primi tre mesi del 2018, mesi invernali in cui di norma l'irrigazione è pressoché nulla, la riduzione di tale ricarica ha un effetto minore sui livelli piezometrici mentre negli SP successivi la sua influenza aumenta progressivamente.

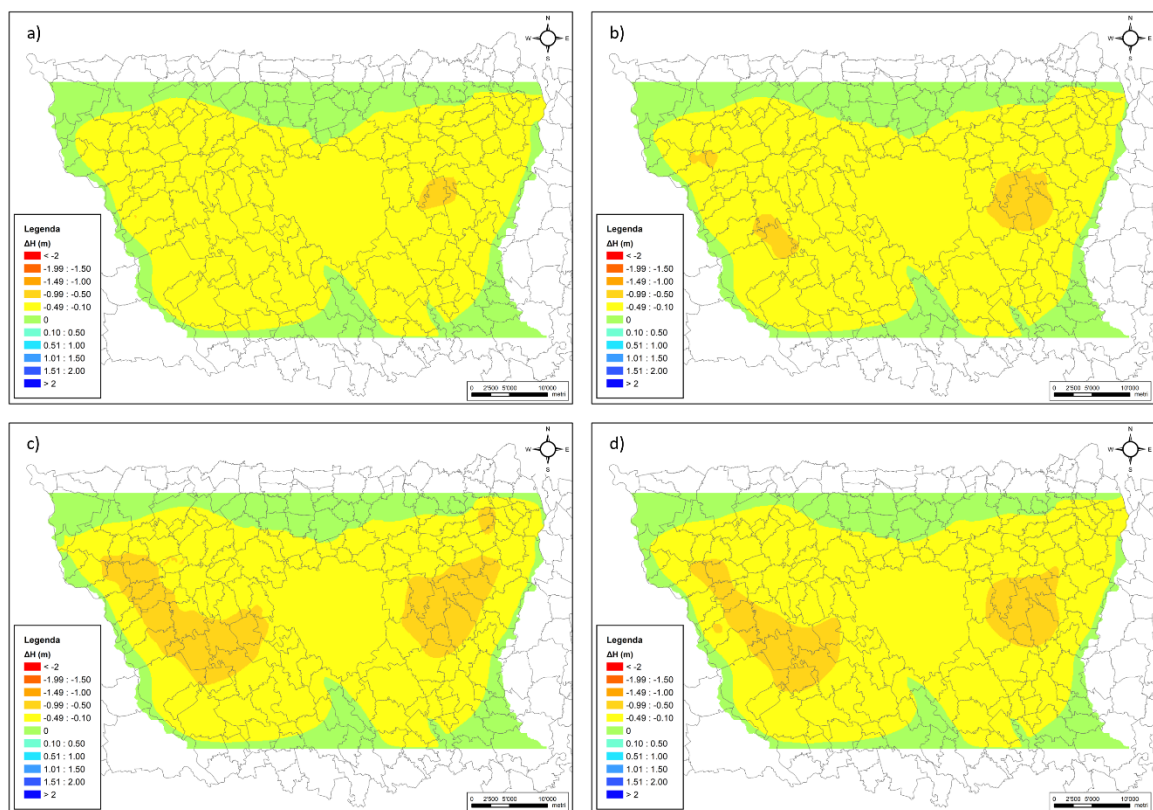


Figura 43: Variazione del carico idraulico per gli SP 17 (a), 18 (b), 19 (c) e 20 (d) relativi ad una riduzione del 15% della ricarica irrigua

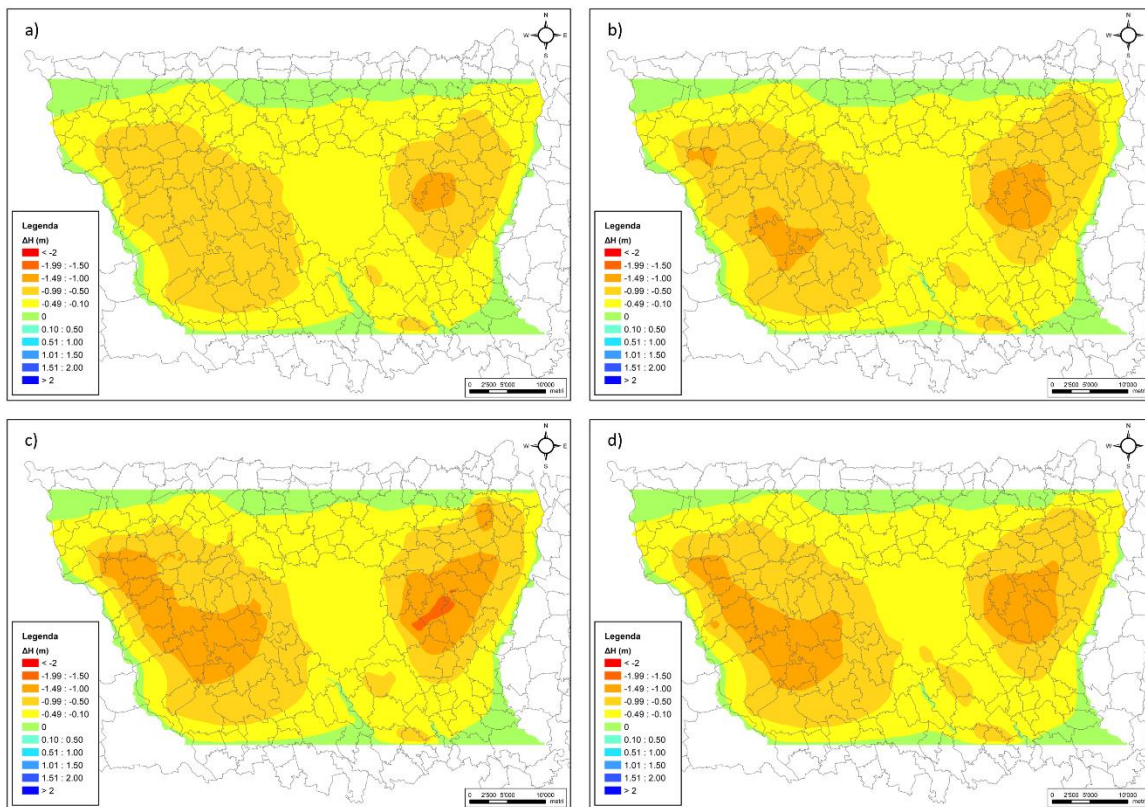


Figura 44: Variazione del carico idraulico per gli SP 17 (a), 18 (b), 19 (c) e 20 (d) relativi ad una riduzione del 30% della ricarica irrigua

La differenza principale tra i due scenari la si nota nella zona Sud, al centro del dominio: nello scenario di riduzione del 15% si osserva una fascia verde che si prolunga verso Milano in cui non si registrano variazioni di carico rilevanti. Tale fascia la si ritrova, più ristretta, solo nello SP 17 dello scenario di riduzione del 30% per poi sparire quasi completamente negli SP successivi, in cui la componente irrigua ha un peso maggiore. Questo comportamento potrebbe essere spiegato dalla presenza, proprio in quella fascia, del fiume Olona (rappresentato mediante il pacchetto RIVER) che ha un rapporto alimentante rispetto la falda e quindi, per piccole diminuzioni di ricarica irrigua ne riesce a compensare i livelli. In entrambi i casi gli abbassamenti maggiori si registrano durante lo SP 19 (Figura 43c, Figura 44c) che infatti rappresenta il periodo compreso tra il 16 giugno e il 15 settembre in cui le quantità d'acqua utilizzate per le pratiche irrigue sono più ingenti.

Analizzando nel dettaglio i singoli scenari, si osserva come una riduzione del 15% della ricarica irrigua (Figura 43) porti ad abbassamenti massimi di 0.9 m circoscritti a due zone ubicate ai lati della città di Milano. Tali aree, infatti, sono quelle caratterizzate dalla maggior superficie agricola e sono servite dal sistema di irrigazione dei principali canali lombardi (Naviglio Grande e Naviglio Martesana).

Per quanto riguarda lo scenario di riduzione del 30% (Figura 44), si registra un'intensificazione degli abbassamenti in tutto il dominio. La città di Milano viene interessata, nella zona più ad Ovest, da abbassamenti piezometrici di circa 1 m. In questo caso, l'abbassamento maggiore risulta essere di 1.64 m registrato nel Comune di Settala, ad Est di Milano.

Sono stati poi analizzati gli andamenti dei carichi nel tempo in quattro punti di monitoraggio: "o64" ed "o4" rispettivamente vicini alle stazioni di San Siro e Lambrate ed i punti "o106" e "o115" (Figura 45), ubicati ad Ovest e ad Est della città di Milano. In ogni grafico, oltre alla linea tratteggiata rappresentante l'andamento dei carichi del modello di partenza, sono riportati gli andamenti dovuti alla diminuzione della risorsa irrigua del 15% e del 30%.

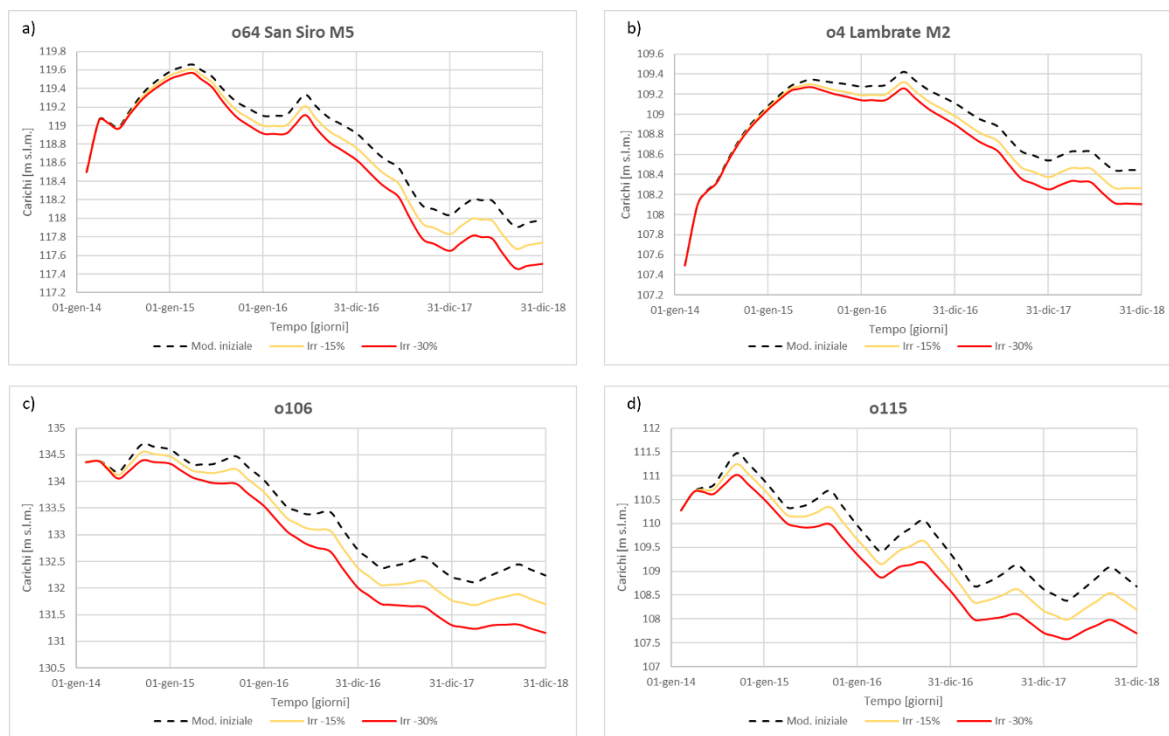


Figura 45: Andamento dei livelli piezometrici nel tempo nei pozzi di monitoraggio "o64", "o4", "o106" e "o115"

In tutti e quattro i pozzi si può osservare come la riduzione della ricarica irrigua dopo soli 5 anni porti ad abbassamenti non trascurabili dei livelli di falda; nei punti presenti all'interno della città di Milano (Figura 45 a, b) tali abbassamenti diventano ben visibili solo dopo un anno e mezzo mentre in quelli ai lati (Figura 45 c, d), il discostamento dalla linea tratteggiata è individuabile già dai primi mesi del 2014.

Gli abbassamenti maggiori nei pozzi della zona di maggior interesse (Milano) si riscontrano nella stazione di San Siro, in cui si raggiunge un abbassamento di 0.47 m. Le differenze maggiori in termini assoluti si riscontrano invece nel pozzo "o106" nel Comune di Corbetta dove, nel settembre

2018 (mese in cui termina l'attività irrigua), si registrano abbassamenti di 1.2 *m* dovuti alla riduzione del 30% della ricarica irrigua.

In conclusione, si può affermare che la ricarica irrigua svolga un ruolo importante per quanto riguarda i risultati delle simulazioni. Una sua variazione anche non ingente, infatti, porta ad abbassamenti nel modello influenzando anche i carichi sottostanti la città di Milano.

5 Scenari futuri della risorsa irrigua

Una volta descritto il modello implementato in MODFLOW e analizzate le condizioni al contorno che maggiormente ne influenzano i risultati, esso è stato utilizzato per valutare l’impatto che possibili scenari futuri potrebbero avere sui livelli di falda. Tali simulazioni costituiscono un punto di partenza per prevedere nel Comune di Milano i livelli piezometrici futuri in funzione di alcuni scenari di variazione del bilancio idrologico, così da fornire agli enti gestori delle acque uno strumento da sfruttare nel processo decisionale per la gestione delle acque sotterranee.

All’interno del progetto MODEL-MI elaborato dal Politecnico di Milano in collaborazione con il gestore integrato dei servizi idrici MM, sono stati considerati diversi scenari previsionali in funzione dell’evoluzione socio-economica e climatica attesa nei prossimi 30 anni [3]. Sono stati studiati gli effetti che i possibili mutamenti futuri di prelievo dei pozzi e dei cambiamenti climatici potranno avere sui livelli di falda idrica in un periodo compreso tra gli anni 2018 e 2048. In *Tabella 6* sono riportati nel dettaglio tutti gli scenari che sono stati valutati nel all’ambito del progetto MODEL-MI [3].

Tabella 6: Elenco degli scenari previsionali analizzati da MM

Descrizione	Scenario	Parametri
Variazione prelievi	WA	Riduzione media prelievo
	WB	Incremento demografico
	WC	Riduzione del 70% prelievo
	WD	Prelievo assente
Cambiamento climatico	RIC45min	RCP 4.5 -ricarica min
	RIC45med	RCP 4.5 -ricarica med
	RIC45max	RCP 4.5 -ricarica max
	RIC85min	RCP 8.5 -ricarica min
	RIC85med	RCP 8.5 -ricarica med
	RIC85max	RCP 8.5 -ricarica max
	RIC85_ICHEC-RCA4	RCP 8.5 -ricarica transitoria
Scenario misto	WA-RIC45	WA+RCP 4.5 medio

Lo scenario WC, per esempio, è stato realizzato ipotizzando una drastica e istantanea riduzione dei prelievi pubblici di Milano, pari al 70% di quanto prelevato nel 2018. I risultati ottenuti hanno dimostrato come una riduzione così consistente delle portate prelevate porta ad un considerevole aumento del livello di falda, soprattutto nelle aree più centrali del Comune di Milano, dove si

osservano innalzamenti di circa 8 m rispetto al livello iniziale. Procedendo verso Sud, invece, gli innalzamenti sono risultati più contenuti, fino ad un valore minimo di circa 1 m ai confini del Comune di Milano. I restanti scenari, ed in particolar modo quelli relativi ai cambiamenti climatici, hanno portato a valori di variazione di carico più contenute. Gli scenari che prevedono una condizione futura di precipitazione media (RIC45med, RIC85med) portano ad innalzamenti all'interno del Comune di Milano compresi tra 0.5 m e 1.5 m; diversamente, gli scenari più estremi prevedono abbassamenti di circa 4 m (RIC45min, RIC85min) e innalzamenti di 2.5 - 3 m (RIC45max, RIC85max) [3].

In aggiunta rispetto al progetto MODEL-MI, nel presente elaborato di tesi è stato analizzato l'effetto delle possibili variazioni del carico dovute alla ricarica irrigua. Come dimostrato nel Capitolo 3, la componente della ricarica dovuta all'irrigazione ricopre un ruolo rilevante rispetto ai carichi piezometrici simulati nel modello in gran parte del dominio di modellazione.

È stato mantenuto l'orizzonte temporale di 30 anni simulando una variazione della ricarica irrigua dal 2018 al 2048. Considerando l'eventualità legata ad un perfezionamento futuro dei sistemi irrigui in sostituzione agli attuali metodi a scorrimento e sommersione che determinano una scarsa efficienza dal punto di vista agricolo, ma dal punto di vista idrogeologico una forte ricarica delle falde, sono stati valutati alcuni scenari di riduzione del quantitativo di acqua a disposizione degli agricoltori. In particolare, sono stati valutati degli scenari di riduzione della ricarica irrigua del 15%, 30% e del 50%. Tali simulazioni sono state eseguite sfruttando sia il Modello CH sia il Modello GHB in modo tale da poter valutare, anche nelle simulazioni previsionali, l'effetto delle condizioni al contorno sui carichi simulati, in quanto la condizione di flusso dipendente dal carico (GHB) risulta più flessibile e viene ritenuta più adatta per rappresentare fenomeni che sono in grado di influenzare i livelli piezometrici. In totale sono stati quindi valutati tre diversi scenari in sei simulazioni differenti (*Tabella 7*).

Tabella 7: Scenari previsionali di riduzione dell'apporto della ricarica irrigua

Descrizione	Scenario	Modello CH	Modello GHB
Diminuzione della ricarica irrigua	A	15%	15%
	B	30%	30%
	C	50%	50%

In primo luogo, è stato necessario apportare alcune modifiche ai modelli di base descritti nel Capitolo 3, estendendo l'orizzonte temporale di simulazione fino al 2048. È stata mantenuta, per l'estensione temporale considerata (2019 – 2048), la discretizzazione di 4 SP per ogni anno per un totale di 140 SP, ognuno avente 2 *Time Steps*. È stato ipotizzato che il quinquennio 2014-2018 si ripeta ciclicamente durante il periodo di simulazione; pertanto, tutte le condizioni al contorno ed interne, tranne la componente irrigua della ricarica, sono state ripetute ciclicamente fino al 2048. Nello specifico, nessuna modifica è stata apportata ai valori di ricarica nelle aree miste, così come per le aree urbane; per quanto riguarda le aree verdi, la ricarica meteorica calcolata per gli anni 2014 – 2018 è stata replicata in serie per l'intero orizzonte temporale degli scenari, ipotizzando che gli eventi meteorici del quinquennio di riferimento si ripetano in modo identico fino al 2048. In tal modo si è potuto valutare il solo affetto del cambiamento nelle pratiche irrigue senza sommare altri effetti dovuti all'entità dei pompaggi o all'eventuale diversa ricarica meteorica futura dovuta ai cambiamenti climatici. Indubbiamente in futuri lavori sarà interessante valutare gli effetti combinati di tali elementi.

La valutazione dei risultati dei diversi scenari elencati in *Tabella 7* viene supportata dall'analisi dell'andamento futuro dei livelli di falda in corrispondenza di una serie di punti di osservazione posizionati nel solo Acquifero A (superficiale) lungo le principali linee metropolitane e nei punti di maggior interesse. A titolo esemplificativo, nel corso della trattazione dei risultati, verranno rappresentati solo alcuni dei punti considerati per l'analisi complessiva. In *Figura 46* si riporta la posizione di tutti i punti di osservazione rispetto all'intero dominio di modellazione e alle linee metropolitane esistenti.

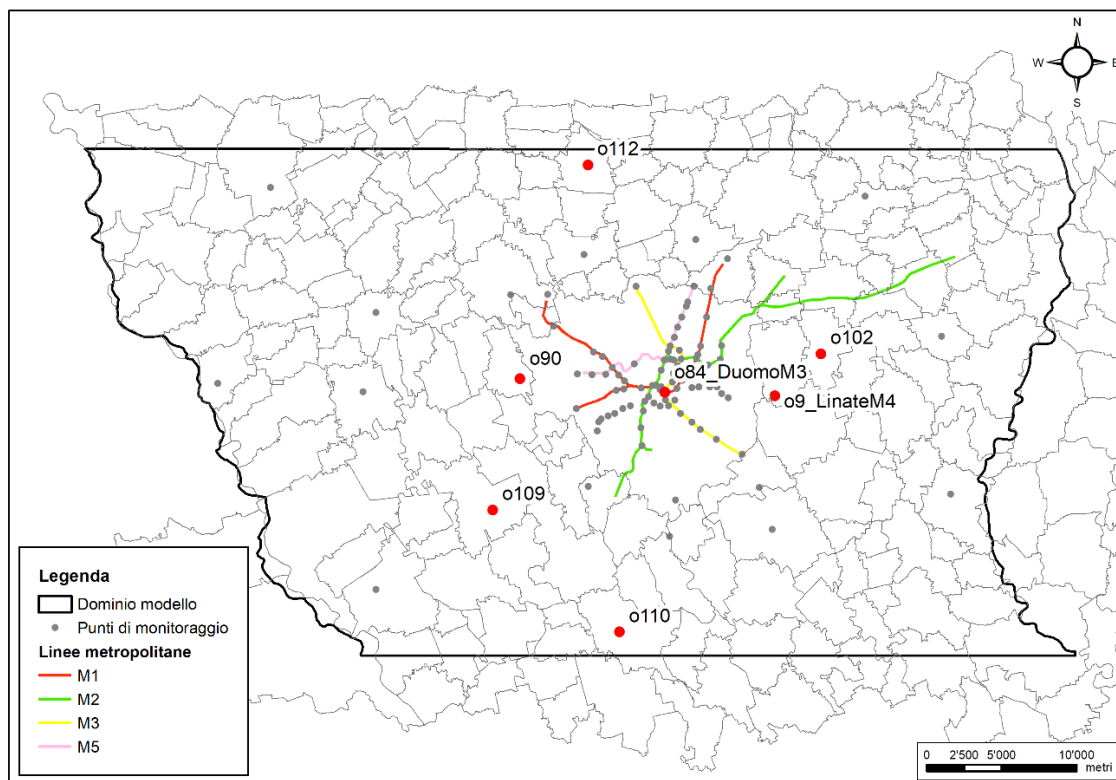


Figura 46: Ubicazione dei 115 punti di monitoraggio dell'acquifero superficiale (A) nel progetto MODEL-MI; in rosso sono riportati quelli utilizzati in questo elaborato di tesi per la valutazione dei risultati degli scenari

5.1 Scenario A: riduzione del 15% della ricarica irrigua

Il primo scenario è quello più conservativo tra quelli analizzati e prevede una riduzione della ricarica irrigua del 15% a partire dall'anno 2019 fino al 2048.

In [Figura 47](#) si riporta la differenza tra i carichi idraulici al termine della simulazione (2048) ed il carico iniziale (2018). Il confronto è stato effettuato assumendo come stato finale della simulazione, quello risultante al 2048, in quanto caratterizzato dagli stessi valori di precipitazione dell'anno 2018. In questo modo è stato possibile valutare esclusivamente l'influenza delle variazioni indotte dalla ricarica irrigua. In [Figura 47a](#) sono riportati i risultati ottenuti utilizzando il Modello CH, mentre in [Figura 47b](#) vi sono quelli riferiti al Modello GHB.

La riduzione del 15% della ricarica irrigua comporta un generale abbassamento dei livelli idrici della falda su gran parte del dominio di modellazione. Le aree più colpite sono quelle ubicate ai lati del Comune di Milano, ovvero le zone che presentano una superficie agricola più estesa e che sono servite dal sistema di irrigazione dei canali lombardi.

Analizzando più nel dettaglio la [Figura 47a](#) si osserva come nei confini superiore ed inferiore del modello non vi siano variazioni di carico rilevanti. Questo è dovuto al fatto che le CH, essendo condizioni molto rigide, non sono preferibili per rappresentare fenomeni che possono portare a variazioni di carico, in quanto mantengono costanti i livelli piezometrici nelle celle in cui sono implementate. All'interno del Comune di Milano, gli abbassamenti più marcati si registrano nella zona Ovest della città, valutabili in circa 1 m, mentre nelle porzioni più ad Est gli abbassamenti della falda sono più contenuti, raggiungendo valori compresi tra 0.1 m e 0.5 m. Le variazioni di carico massime osservate sono di 1.30 m ma sono localizzate nei pressi del fiume Ticino, lontane quindi dalla zona di maggior interesse.

In [Figura 47b](#) è possibile osservare la presenza di variazioni di carico anche nei limiti Nord e Sud del modello. Questo avviene grazie all'implementazione delle GHB che, in questo caso, permettono di ottenere abbassamenti dei livelli di circa 0.5 m anche nelle celle presenti ai confini. L'intero Comune di Milano è soggetto a variazioni di carico comprese tra 0.5 m e 1 m in modulo. Gli abbassamenti maggiori sono di 1.7 m, registrati anche in questo caso lontano da Milano.

In generale, utilizzando condizioni di tipo GHB si osserva una espansione in direzione Nord-Sud della superficie rappresentante gli abbassamenti compresi tra 0.1 e 0.49 m e in direzione Ovest-Est di quella che rappresenta abbassamenti di 0.5 – 1 m. Si ottengono inoltre abbassamenti di carico superiori al metro anche nella zona ad Est del modello. Complessivamente, si può affermare che una riduzione della ricarica irrigua del 15% non ha un impatto rilevante sui livelli di falda e porta ad abbassamenti poco significativi all'interno del Comune di Milano.

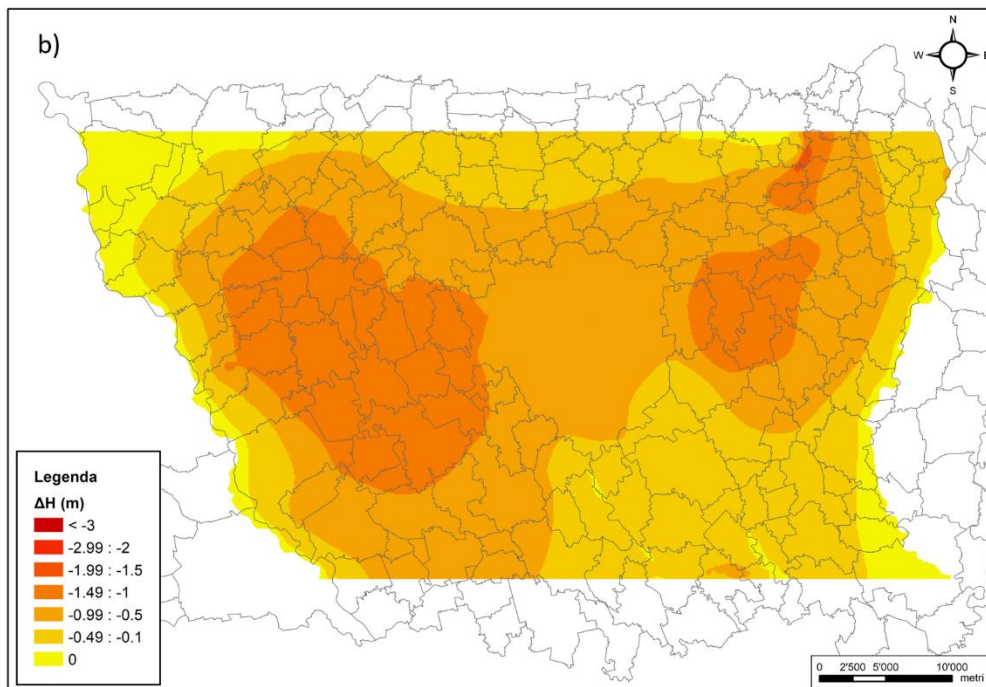
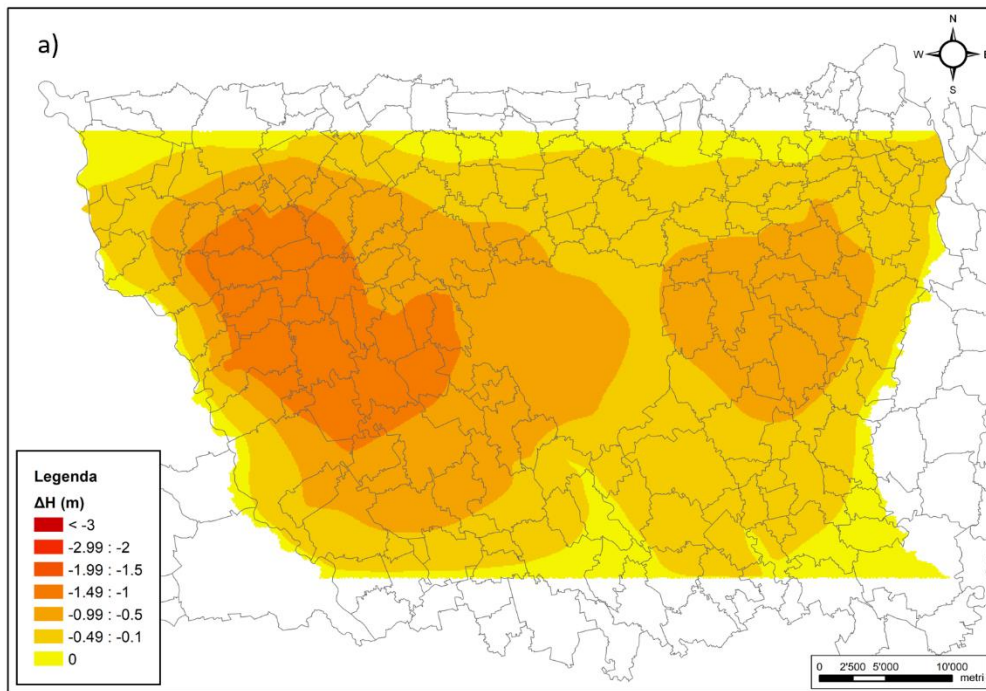


Figura 47: Scenario A: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b)

5.2 Scenario B: riduzione del 30% della ricarica irrigua

Il secondo scenario analizzato prevede una diminuzione della ricarica irrigua intermedia, cioè pari al 30%.

In [Figura 48](#) sono riportate le differenze tra i carichi ottenuti al termine della simulazione (2048) e quelli iniziali (2018) sia per il modello con le CH sia per quello con le GHB. I risultati confermano quanto già osservato nello scenario A: le aree che subiscono abbassamenti maggiori sono quelle poste ai lati di Milano ma in questo caso, l'influenza sui livelli di falda all'interno della città è di entità maggiore. In entrambi i modelli risulta più evidente, rispetto allo scenario precedente, come la presenza dei fiumi Olona e Lambro influisca sui carichi, moderandone gli abbassamenti nella zona più a Sud del dominio.

Pur intensificando la riduzione della ricarica irrigua dal 15% al 30%, dalla [Figura 48a](#) si riscontra nuovamente che le condizioni di carico costante poste ai confini Nord e Sud limitano gli abbassamenti dei livelli idrici ad un massimo di 0.1 m. La falda sottostante il Comune di Milano è soggetta a variazioni di massimo 1.9 m localizzate nel confine Ovest mentre, spostandosi verso Est, si osservano abbassamenti compresi tra 1 e 1.5 m nel centro città e tra 0.5 e 1 m nei confini Nord-Est del comune. Le variazioni di carico massime sono di 2.15 m riscontrate nella porzione più ad Ovest del dominio del modello (lontane quindi dalla città di Milano).

Analizzando i risultati in [Figura 48b](#) si osserva che le condizioni di flusso dipendente dal carico permettono al modello di simulare variazioni dei livelli piezometrici anche nei confini Nord e Sud. In particolare, sia nel limite settentrionale che in quello meridionale del modello si registrano abbassamenti massimi di 1.54 m. Nella città di Milano la falda è soggetta ad abbassamenti di circa 1.4 m ad eccezione della fascia più ad Ovest dove si riscontrano variazioni di poco superiori ai 2 m e di quella a Sud, in cui gli abbassamenti non risultano essere superiori ad 1 m.

In conclusione, una riduzione della ricarica irrigua del 30% porta a variazioni non trascurabili dei livelli dell'acquifero superficiale, causando abbassamenti diffusi di circa 2 m nella porzione occidentale del dominio e valori massimi di 2.25 m anche in prossimità di Milano.

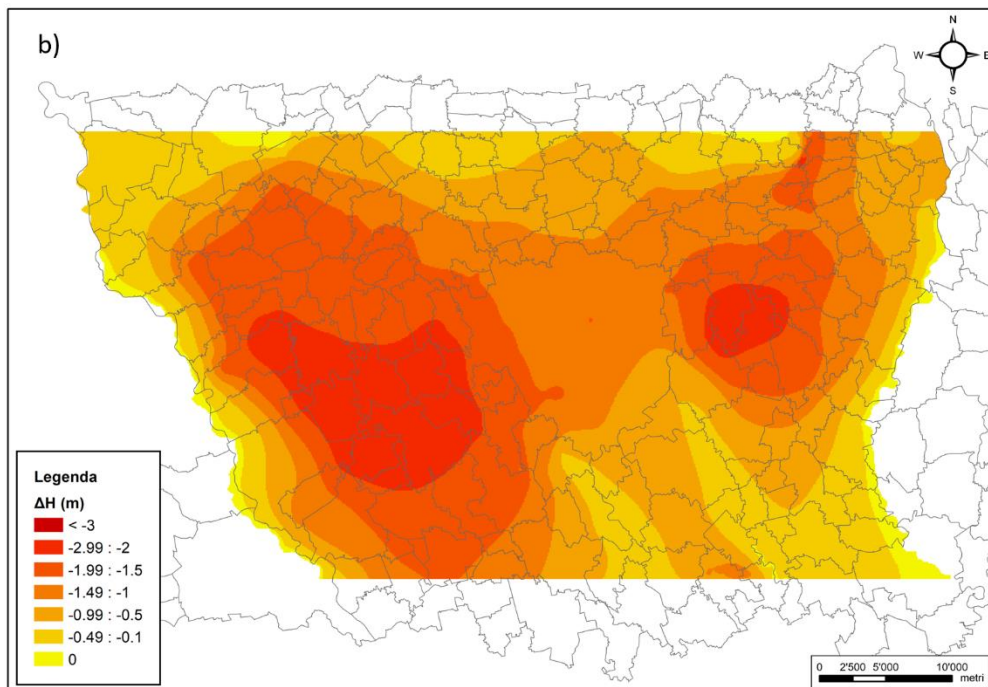
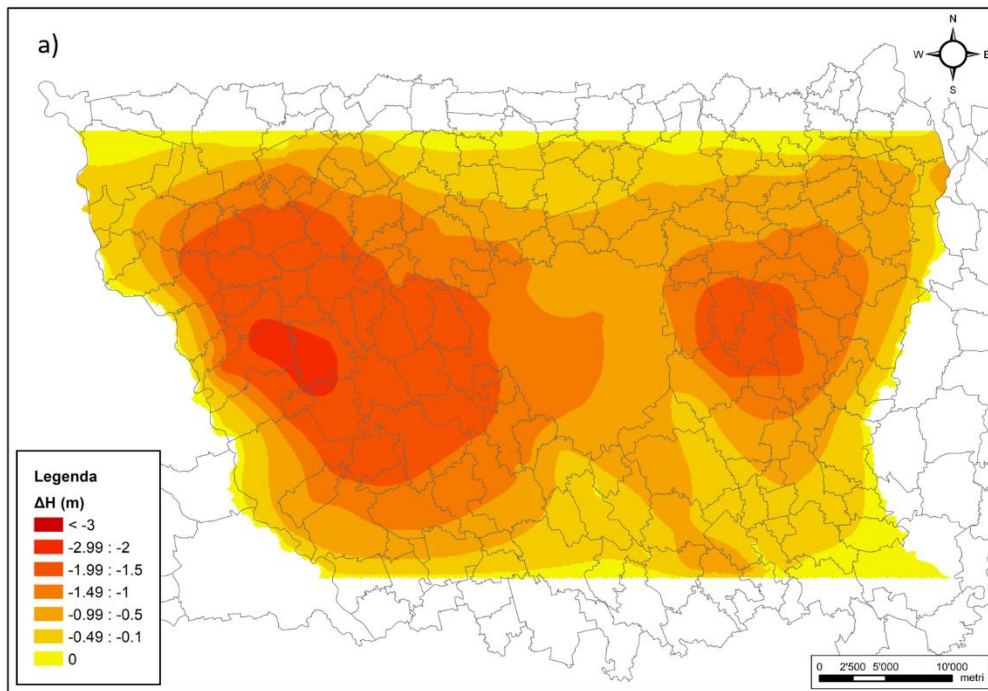


Figura 48: Scenario B: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b)

5.3 Scenario C: riduzione del 50% della ricarica irrigua

Il terzo scenario è stato realizzato ipotizzando una drastica e istantanea riduzione della ricarica irrigua, pari al 50% di quella prima del 2018. Uno scenario di questo tipo, pur essendo poco probabile nell'immediato futuro, consente di individuare la risposta del sistema a fronte di una situazione estrema che si potrebbe avere in termini di abbassamento della falda.

Le differenze tra i carichi finali (2048) e quelli iniziali (2018) del modello sono riportate in [Figura 49](#). In questo scenario sono visibili consistenti variazioni dei livelli piezometrici su gran parte del dominio di modellazione. Tuttavia, è ancora visibile, anche se meno accentuato, il rapporto alimentante che hanno i fiumi interni all'area nei confronti dell'acquifero di interesse.

In [Figura 49a](#) si osserva come le aree in cui non si hanno variazioni di carico sono circoscritte lungo i quattro confini del modello, dove sono poste le condizioni a carico costante, mentre altrove si registrano variazioni minime di 0.3 m. Gli abbassamenti all'interno del Comune di Milano si differenziano secondo tre fasce aventi orientamento Nord-Sud: una fascia più ad Est in cui si hanno abbassamenti di circa 1.2 m, una centrale in cui le variazioni arrivano fino ad 1.95 m e quella più occidentale dove gli abbassamenti variano tra i 2 e 3 m. Il Modello CH restituisce valori massimi di abbassamento della falda pari a 3.27 m.

Le zone che non sono influenzate dalla riduzione della ricarica irrigua nel Modello GHB ([Figura 49b](#)) sono individuabili solo lungo i fiumi Adda e Ticino, implementati come condizioni a carico costante. Le zone maggiormente interessate (ossia quelle ai lati di Milano) risentono fortemente del cambio di condizioni al contorno aumentando la loro estensione in tutte le direzioni. Anche all'interno della città di Milano si risente l'effetto delle condizioni a carico variabile; gli abbassamenti vanno da un minimo di 1.5 m (nella zona più ad Est) ad un massimo di 3.3 m (nella porzione più ad Ovest).

Si può quindi affermare che una riduzione del 50% della ricarica irrigua porta ad importanti abbassamenti della falda raggiungendo valori massimi di 3.78 m e andando ad interessare fortemente i carichi tra Adda e Ticino con abbassamenti rilevanti anche nella città di Milano.

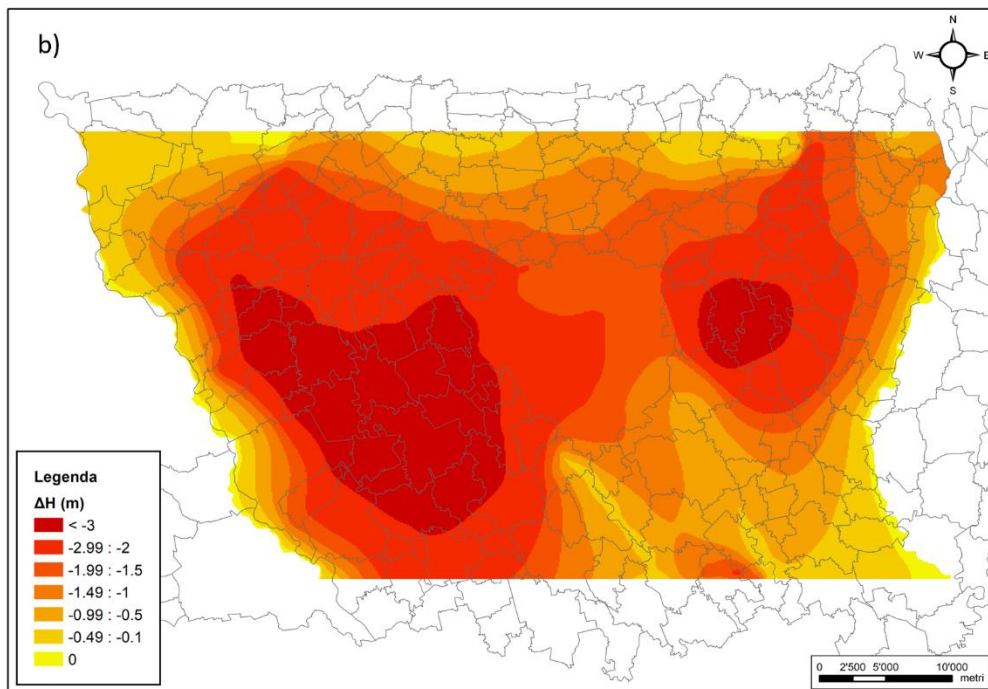
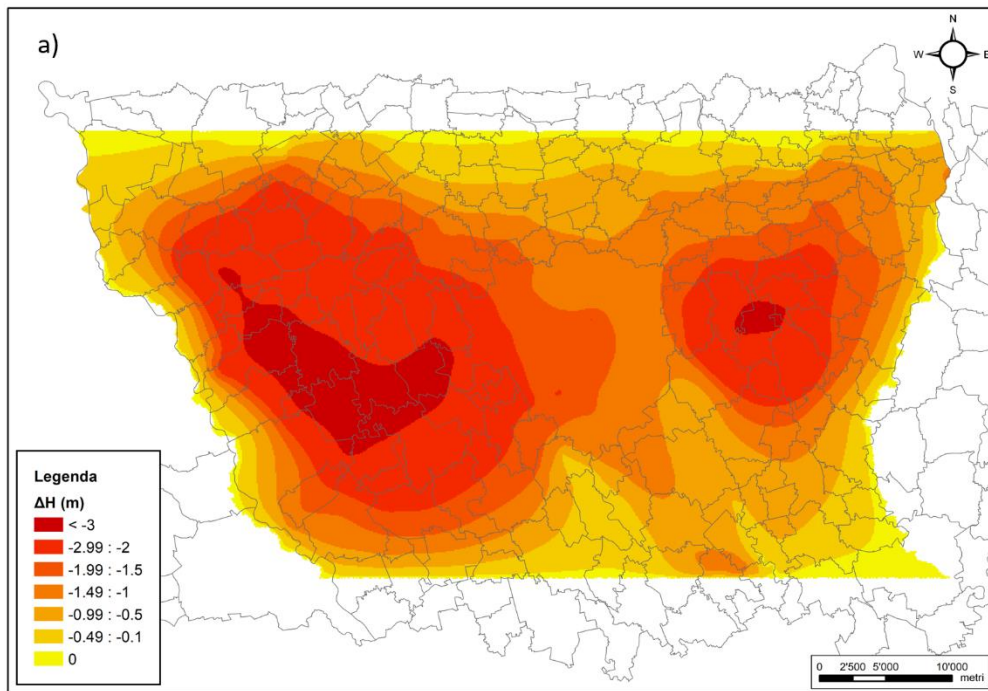


Figura 49: Scenario C: variazione del carico idraulico utilizzando a Nord e Sud le condizioni CH (a) e GHB (b)

5.4 Confronto tra i risultati dei diversi scenari di riduzione di ricarica irrigua

Nel seguente paragrafo vengono analizzati più nel dettaglio le variazioni dei carichi all'interno del dominio di modellazione, andando a valutare il loro andamento nel tempo. I punti di monitoraggio che sono stati considerati sono quelli riportati in [Figura 46](#); in particolare, sono stati scelti tre punti all'interno del Comune di Milano ("o9", "o84" e "o90") in quanto rappresenta la zona di maggior interesse, due punti nelle zone che maggiormente sono influenzate dalla riduzione della ricarica irrigua ("o102" e "o109") e due punti nei pressi delle condizioni al contorno Nord e Sud ("o112" e "o110") per poter valutare nel dettaglio la diversa influenza che le condizioni CH e GHB hanno sui livelli piezometrici circostanti. In tutti i grafici sono riportati gli andamenti dei carichi considerando, a titolo esemplificativo, lo scenario A (-15%) e lo scenario C (-50%).

I grafici riportati evidenziano come la ricarica meteorica sia la componente che maggiormente influenza l'andamento dei carichi. Si osserva infatti un andamento ciclico dei livelli ogni cinque anni dovuto al fatto che le precipitazioni degli anni 2014 – 2018 sono state replicate per tutto l'orizzonte temporale. Lo scenario A comporta abbassamenti di carico caratterizzati da una tendenza decrescente omogenea, non si riscontrano variazioni repentine dei livelli. Viceversa, nello scenario C si osserva come il secondo quinquennio risenta moderatamente della forte riduzione della ricarica irrigua ma si registrano bruschi abbassamenti a partire dal terzo ciclo (anno 2024) per poi riprendere una tendenza decrescente simile a quella dello scenario A. Per entrambi gli scenari invece, si osserva una sostanziale stabilizzazione degli abbassamenti dei carichi intorno al quinto ciclo, rappresentante il periodo compreso tra il 2034 e il 2038; tuttavia per i punti di monitoraggio più distanti dalle condizioni al contorno (es. Duomo o84) si può notare come anche dopo 20 anni si sia vicini all'equilibrio ma non lo si sia ancora raggiunto pienamente un valore medio asintotico.

Sulla base dei risultati osservati nei paragrafi precedenti, i punti di monitoraggio presenti a Milano sono stati ubicati nel confine Ovest ("o90"), in centro ("o84") e nel confine Est ("o9") con l'obiettivo di cogliere le variazioni di carico che si registrano nelle tre fasce orientate Nord-Sud e descritte in precedenza. A conferma dei risultati osservati in [Figura 49](#), il punto che maggiormente risente di una riduzione del 50% della ricarica irrigua è il "o90" in cui si registrano abbassamenti di circa 3 m rispetto all'anno 2018. Nelle stazioni di Duomo e Linate gli abbassamenti ottenuti al termine della simulazione sono di entità inferiore, rispettivamente pari a 2.5 e 2 m.

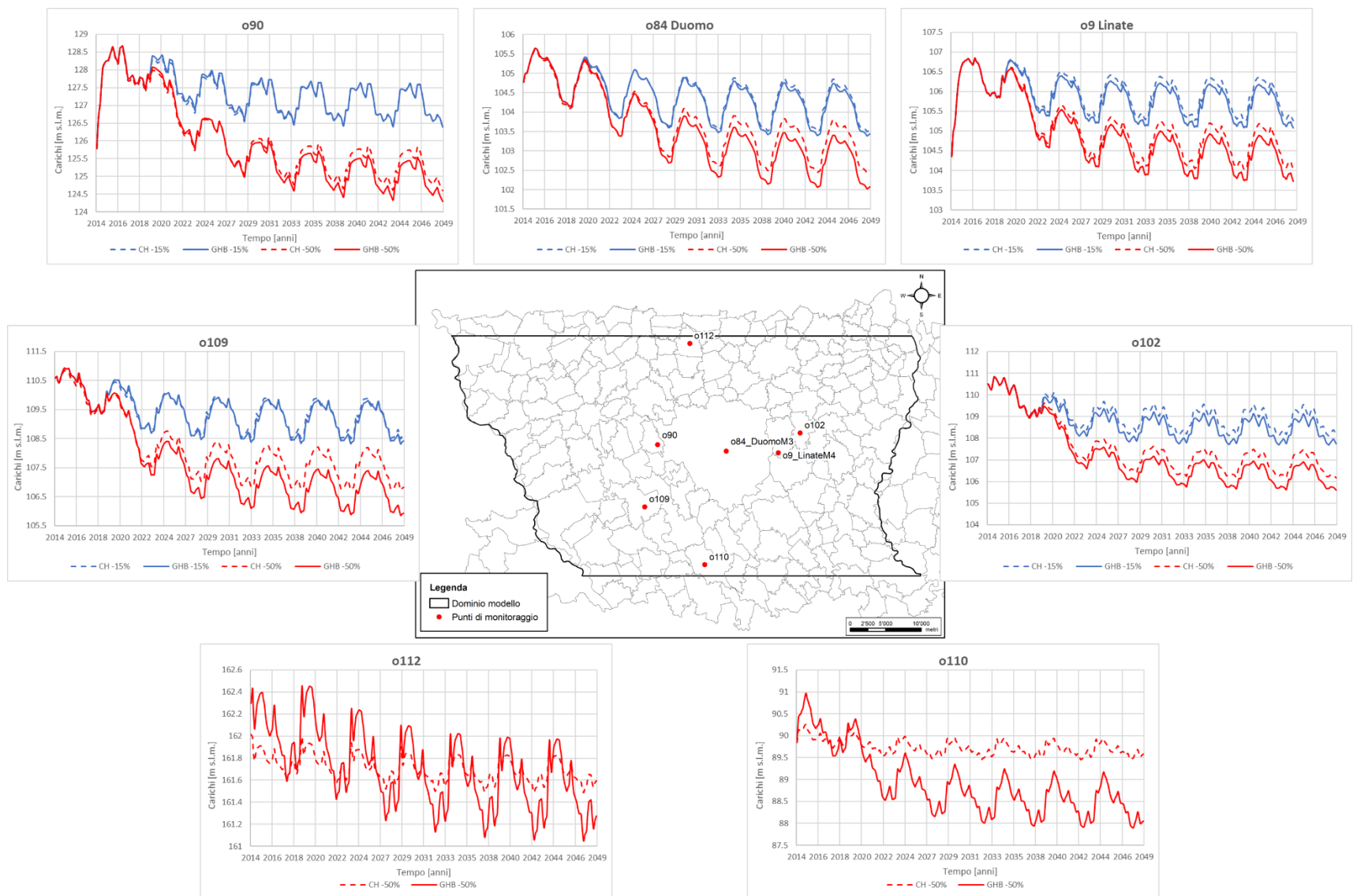


Figura 50: Previsione dell'andamento dei livelli di falda per gli scenari di variazione di ricarica irrigua nel periodo 2018-2048

Nei punti “o102” e “o109”, posti rispettivamente ad Est e a Sud-Ovest del Comune di Milano, si registrano le variazioni maggiori. In particolare, nel punto “o102” le differenze massime rispetto all’anno 2018 per lo scenario A sono di 1.3 *m* e per lo scenario C arrivano fino a 3.4 *m* mentre nel punto “o109” sono di 1 *m* (scenario A) e di 3.5 *m* (scenario C).

Dall’andamento temporale dei carichi nei punti di monitoraggio è possibile apprezzare i diversi risultati ottenuti implementando le condizioni CH o GHB nei confini settentrionale e meridionale del modello. In tutti i punti e scenari considerati, il Modello GHB porta ad abbassamenti maggiori rispetto al Modello CH. Per quanto riguarda lo scenario A, i discostamenti maggiori si trovano nel punto “o102” (Est) dove la differenza al 2048 è di 0.5 *m*; per lo scenario C invece, la differenza massima tra i risultati dei due modelli la si trova nel punto “o109” (Ovest) dove, la condizione GHB porta ad abbassamenti di 1 *m* superiori rispetto a quelli ottenuti con le CH. Nei pozzi presenti all’interno del Comune di Milano si osservano differenze rilevanti tra il Modello CH e il Modello GHB per lo scenario A solo nel pozzo di Linate, a conferma del fatto che la zona Est del dominio risente maggiormente la differenza delle condizioni al contorno per una riduzione della ricarica irrigua del 15%. Per quanto riguarda lo scenario C, il pozzo presente all’interno di Milano a risentire maggiormente delle diverse condizioni al contorno è quello presenta nella stazione di Duomo, a conferma del fatto che diminuzioni più importanti della ricarica irrigua hanno effetti maggiormente distribuiti andando ad influenzare in modo rilevante anche i carichi sottostanti la città di Milano.

La diversa influenza che hanno le condizioni al contorno sui livelli piezometrici del dominio di modellazione è ben visibile nei punti “o112” e “o110” posti rispettivamente all’estremo Nord e Sud del dominio. Per facilitare la lettura del grafico, in questi punti è stato riportato solamente lo scenario C (i restanti scenari presentano risultati del tutto paragonabili). Si può osservare come le condizioni a carico costante regolino fortemente i livelli piezometrici circostanti permettendo variazioni massime di solo 0.1 *m* in un periodo temporale di 30 anni. Al contrario, le condizioni GHB portano ad una variabilità dei carichi più marcata, rappresentando meglio sia la variabilità stagionale dei livelli idrici sia il trend decrescente a cui sono soggetti dal 2018 al 2048.

Si può quindi concludere che le condizioni di flusso dipendente dal carico (GHB), grazie alla loro flessibilità, riescono a rappresentare più fedelmente l’andamento decrescente dei carichi anche nei confini del dominio in quanto lasciano ai carichi stessi una maggior libertà di variazione in funzione delle forzanti del modello (in questo caso la ricarica), portando a considerare più accurati anche i risultati ottenuti nella zona di maggior interesse.

6 Aggiornamento del modello di flusso

Nel seguente capitolo vengono descritti i passaggi che sono stati svolti con l'obiettivo di migliorare il modello di flusso che rappresenta la falda sottostante la città di Milano. In particolare, è stato aggiornato il calcolo della ricarica meteorica e la classificazione dell'uso del suolo nel dominio di modellazione che, nell'ambito del progetto MODEL-MI, erano stati fatti introducendo alcune approssimazioni. È stato quindi utilizzato il *software* Soil Water Balance (SWB) così come fatto in MODEL-MI, ma si sono valutati più nel dettaglio i parametri in input per poter ottenere valori della ricarica più accurati. Precisamente, sono stati aggiornati:

- Il metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione;
- Il file GRID relativo all'Hydrologic Soil Group (HSG);
- Il file GRID relativo all'Available Water Capacity (AWC);
- Il file GRID relativo al Land Cover.

6.1 Selezione del dataset

Per la presente analisi, sono state selezionate le stesse stazioni meteorologiche utilizzate nel progetto MODEL-MI, ossia le stazioni di Lambrate, Busto Arsizio e Sant'Angelo Lodigiano ([Figura 51](#)).

I dati meteorologici sono stati reperiti con una discretizzazione giornaliera, dall'Archivio dati idro-nivo-meteorologici di ARPA Lombardia, per gli anni compresi tra il 2014 e 2018. Nello specifico i parametri utilizzati sono:

- Precipitazione cumulata [*mm*];
- Temperatura massima, minima e media [$^{\circ}\text{C}$];
- Umidità relativa [%];
- Velocità del vento [*m/s*];
- Radiazione solare [W/m^2]

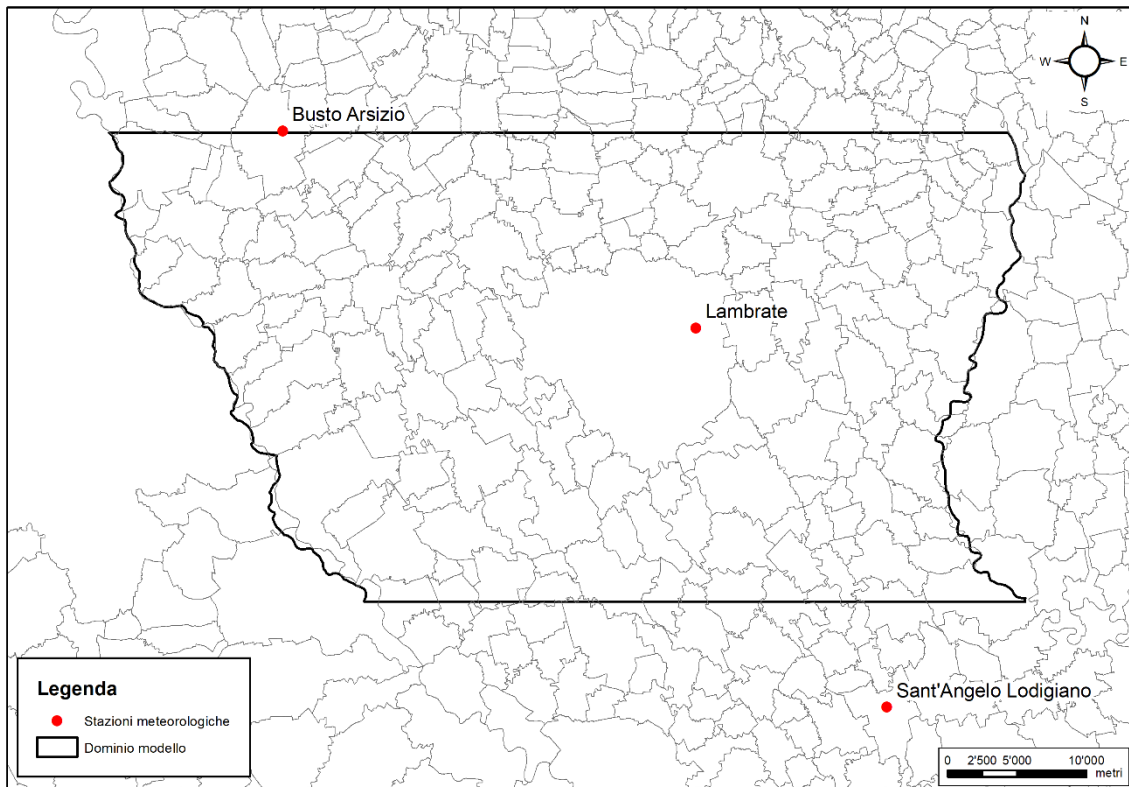


Figura 51: Ubicazione delle tre stazioni meteorologiche considerate per il calcolo della ricarica

Il calcolo della ricarica meteorica per il modello di flusso originale era stato svolto sfruttando i soli valori di precipitazione e temperatura in quanto rappresentano i dati minimi, ossia quelli obbligatori che SWB richiede per poter compiere il calcolo della ricarica stessa e per utilizzare il metodo di Thornthwaite-Mather (T-M) per il calcolo dell'evapotraspirazione. Con lo scopo di ottenere una stima più accurata del valore di ricarica e valutare l'utilizzo di differenti metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione, sono stati scaricati anche i valori opzionali di umidità relativa, velocità del vento e radiazione solare.

Si è resa poi necessaria una fase preliminare di trattamento di alcuni dei dati climatici in cui sono state convertite le unità di misura a seconda di quelle richieste da SWB. Il *software* dell'US Geological Survey (USGS) richiede infatti i dati di precipitazione in inches ($1 \text{ mm} = 0.03937 \text{ in}$) e le temperature in gradi Fahrenheit ($0 \text{ }^\circ\text{C} \times 9/5 + 32 = 32 \text{ }^\circ\text{F}$). I valori di radiazione solare, scaricati con frequenza oraria, sono stati invece utilizzati per calcolare la percentuale di ore di sole giornaliera, ovvero il rapporto delle ore di sole effettive rispetto al totale delle ore di sole giornaliere possibili, in percentuale. A partire dai valori orari, sono state calcolate, per ogni giorno, le ore in cui si è registrato un valore di radiazione solare diverso da zero (ore di sole effettive) e tali valori sono stati divisi per 24 (ore di sole giornaliere possibili) e infine moltiplicati per 100 in modo tale da ottenere

una percentuale. I dati di velocità del vento ed umidità relativa non sono invece stati modificati in quanto già scaricati con le unità di misura adatte

6.2 Scelta del metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione

Come già descritto nel paragrafo 1.3, SWB permette di utilizzare diversi metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione e, ogni metodo, richiede dei dati climatici differenti da fornire in input. In *Tabella 8* è riportato l'elenco dei quattro metodi disponibili in SWB e i relativi dati richiesti per il calcolo dell'evapotraspirazione oltre a quelli di precipitazione.

Tabella 8: Dati richiesti dai vari metodi per il calcolo dell'evapotraspirazione

Metodo	Dati richiesti
Thornthwaite-Mather (T-M)	Temperatura dell'aria [°F]
Jensen-Haise (J-H)	Temperatura dell'aria [°F] Ore di sole giornaliere [%]
Turc	Temperatura dell'aria [°F] Umidità relativa [%] Ore di sole giornaliere [%]
Hargreaves	Temperatura dell'aria [°F]

Per il modello implementato nel progetto MODEL-MI, la ricarica è stata calcolata sfruttando il metodo T-M che consiste nel metodo che SWB utilizza di default a meno che non venga impostato diversamente. Con l'obiettivo di ottenere una stima più accurata dell'evapotraspirazione e quindi della ricarica, sono stati valutati i risultati ottenuti sfruttando tutti i metodi. In particolare, sono stati utilizzati, per ogni metodo, i soli valori obbligatori (precipitazione e temperatura) e poi anche quelli opzionali (umidità relativa, velocità del vento e ore di sole giornaliere). In *Figura 52* sono riportati, a titolo esemplificativo, i risultati ottenuti utilizzando i dati climatici delle stazioni di Lambrate e Busto Arsizio.

A conferma di quanto riportato in *Tabella 8*, è possibile osservare come gli unici due metodi che non risentono dei diversi dati forniti in input sono il metodo T-M e il metodo Hargreaves in quanto non sfruttano per il calcolo dell'evapotraspirazione le informazioni aggiuntive rappresentate dai dati opzionali.

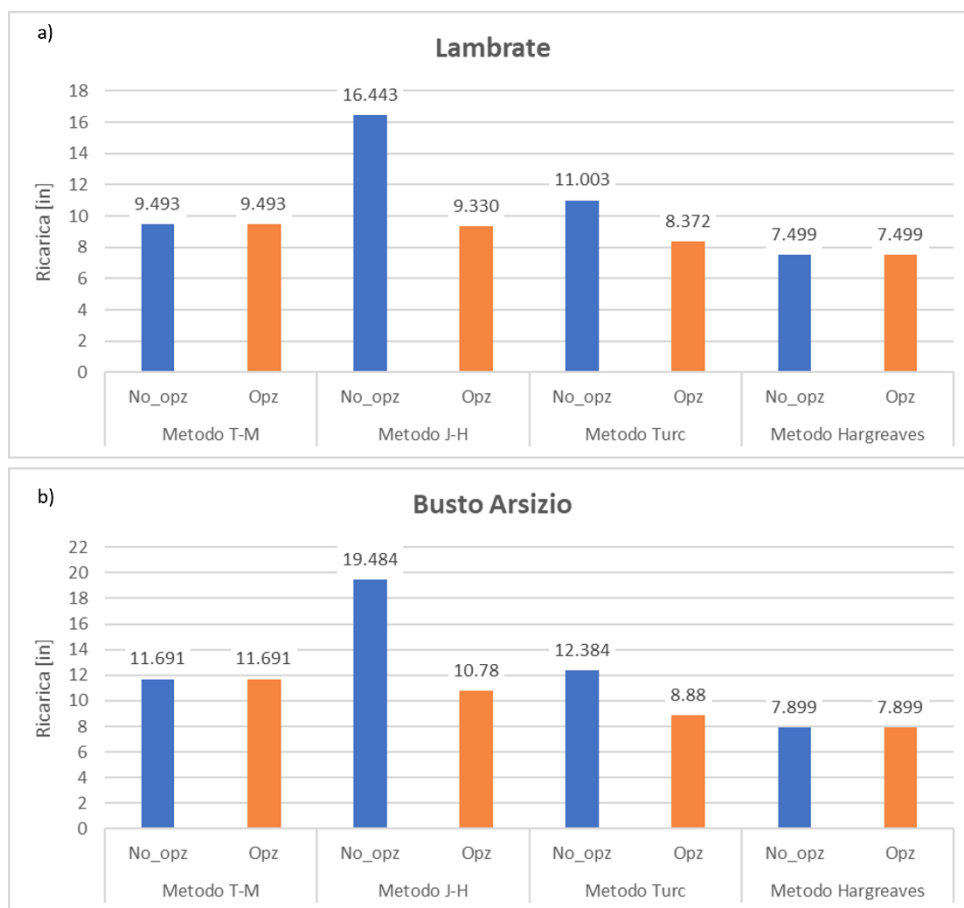


Figura 52: Valori di ricarica ottenuti utilizzando, per ogni metodo, prima i soli valori obbligatori (in blu) e poi anche i valori opzionali (in arancio) per le stazioni di Lambrate (a) e Busto Arsizio (b)

Osservando invece i valori ottenuti dai metodi J-H e Turc, si nota come l'aggiunta dei valori opzionali influenzi fortemente i risultati portando a valori più bassi anche di 9 in (228,6 mm) come nel caso di Busto Arsizio (Figura 52b). Per la scelta del metodo da utilizzare sono stati quindi considerati i soli valori ottenuti sfruttando tutti i dati climatici disponibili (obbligatori + opzionali). È possibile notare come il metodo T-M restituisca i valori di ricarica più elevati mentre il più conservativo è il metodo Hargreaves. È stato deciso di utilizzare il metodo J-H sulla base di due aspetti:

- Fornisce valori di ricarica medi rispetto ai quattro metodi disponibili;
- Si è voluto privilegiare l'utilizzo di un metodo che sfruttasse anche i dati climatici opzionali e il metodo J-H è risultato il più sensibile ad essi.

D'ora in avanti quindi, tutte le simulazioni che verranno descritte sfrutteranno il metodo J-H per il calcolo dell'evapotraspirazione.

6.3 Ottimizzazione dei file GRID in input a SWB

Stabilito il metodo per il calcolo dell'evapotraspirazione, ci si è concentrati sui file GRID che SWB richiede in input per poter calcolare il deflusso in superficie e quindi il tasso di infiltrazione per ogni cella della griglia. Tali file sono stati definiti con una maggior approssimazione nell'ambito del progetto MODEL-MI perciò ci si è focalizzati su una loro definizione più dettagliata; è stato inoltre valutato l'effetto che il loro aggiornamento ha portato sui valori medi di ricarica sul dominio ottenuti da SWB.

In particolare, i file grigliati richiesti dal *software* sono quelli relativi a: gruppo idrologico del suolo, capacità idrica del suolo, copertura del suolo, e direzione del flusso dell'acqua di superficie. Di questi quattro file, sono stati aggiornati solo i primi tre mentre, quello riferito alla direzione di ruscellamento superficiale, è stato mantenuto invariato rispetto a quello già implementato.

6.3.1 *Hydrologic Soil Group (HSG)*

Le diverse tipologie di terreno sono state classificate dal Natural Resource Conservation Service [18] in quattro gruppi idrologici in base al ruscellamento potenziale di ognuno di esse. Ai terreni viene assegnata una classe (A, B, C, D) in base al loro tasso di infiltrazione; A rappresenta la classe caratterizzata dal tasso di infiltrazione maggiore (e quindi ruscellamento potenziale minore) e D è quella con il tasso di infiltrazione minore (e quindi ruscellamento superficiale maggiore). SWB richiede in input un file GRID in cui, per ogni cella, viene specificato il gruppo idrologico del terreno presente nella zona di interesse assegnando un valore da 1 a 4 rappresentante rispettivamente le classi HSG da A a D.

Per il calcolo della ricarica meteorica svolto per il modello originale, tutta l'area del dominio è stata classificata con il gruppo idrologico B utilizzando quindi un file grigliato avente il valore 2 per ogni cella del modello. In questo elaborato di tesi invece si è voluto definire una classificazione più accurata. È stata scaricata dal Geoportale della Regione Lombardia la carta litologia della zona di interesse in cui le informazioni riportate derivano dall'interpretazione delle caratteristiche litologiche, rilevate con sondaggi effettuati fino alla profondità di 2 m.

Per svolgere la suddivisione delle diverse tipologie di terreno ci si è basati sulla classificazione contenuta nel capitolo 7 del *National Engineering Handbook* [34], in cui i diversi terreni vengono suddivisi nelle quattro classi come:

- Classe A: terreni aventi un elevato tasso di infiltrazione. Caratterizzati dalla presenza del 90% di ghiaia e sabbia;
- Classe B: terreni aventi un tasso di infiltrazione moderato. Caratterizzati dalla presenza del 70% di sabbia;
- Classe C: terreni aventi un basso tasso di infiltrazione. Caratterizzati dalla presenza del 50% di limo e 30% di argilla;
- Classe D: terreni aventi un tasso di infiltrazione molto basso. Caratterizzati dalla presenza di più del 40% di argilla.

Lavorando in ambiente GIS, è stata definita la classificazione della litologia riportata in *Tabella 9*. Le ghiaie sono state raggruppate nella classe A, le sabbie nella classe B, i limi e le argille rispettivamente nelle classi C e D.

Tabella 9: Classificazione HSG delle diverse tipologie di terreno

Tipologia terreno	Classe	HSG
Ghiaie dominanti	G1	A
Ghiaie con locali depositi fini	G2	
Ghiaie e depositi fini	G3	
Sabbie dominanti	S1	B
Sabbie con locali depositi fini	S2	
Sabbie con depositi fini	S3	
Limi dominanti	L4	C
Limi con sabbie e ghiaie	L5	
Argille dominanti	A4	D

In *Figura 53* è riportata la suddivisione nelle quattro classi HSG dei diversi terreni all'interno del dominio di modellazione. Si osserva come, la zona di interesse sia caratterizzata principalmente dalla presenza di ghiaie e sabbie (gruppi A e B) che ricoprono gran parte della superficie. Sono tuttavia presenti anche numerose aree a carattere limoso (gruppo C), in particolar modo nella porzione a Sud-Est del dominio, e poche zone argillose (gruppo D), circoscritte in una piccola area a Sud-Ovest.

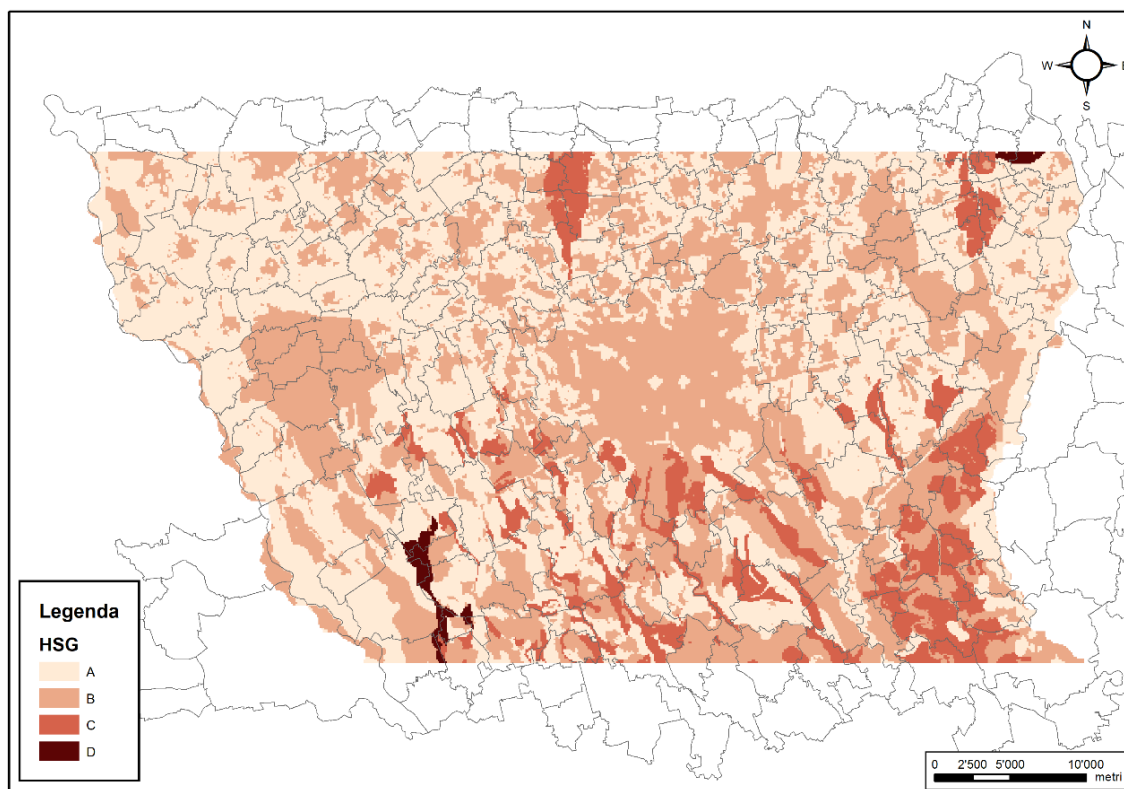


Figura 53: Classificazione dei gruppi idrologici dei diversi terreni presenti nel dominio di modellazione

6.3.2 Available Water Capacity (AWC)

L'Available Water Capacity rappresenta la quantità di acqua che il terreno può immagazzinare al suo interno e che diventa disponibile per la crescita della vegetazione. All'interno del file di controllo di SWB è riportata la tabella di Thornthwaite in cui, per ogni tipologia di terreno, viene riportato il corrispondente valore di AWC (Figura 54).

SOIL TEXTURE	AVAILABLE WATER CAPACITY (in / ft)
sand	1.20
loamy sand	1.40
sandy loam	1.60
fine sandy loam	1.80
very fine sandy loam	2.00
loam	2.20
silt loam	2.40
silt	2.55
sandy clay loam	2.70
silty clay loam	2.85
clay loam	3.00
sandy clay	3.20
silty clay	3.40
clay	3.60

Figura 54: Tabella di Thornthwaite riportante i valori di AWC per ogni tipologia di suolo

Nell'ambito del progetto MODEL-MI tutta l'area di interesse è stata classificata come *loam*, assegnando ad ogni cella del modello un valore di AWC pari a 2.20 *in/ft*.

In questo caso invece, lavorando in ambiente GIS, è stata mantenuta la stessa suddivisione compiuta per l'HSG assegnando un valore medio di AWC, tra quelli riportati in [Figura 54](#), per ghiaie, sabbie, limi e argille. In [Tabella 10](#) sono riportati i valori di AWC scelti per ogni tipologia di suolo.

Tabella 10: Valori di AWC [in/ft] per ogni tipologia di suolo

Tipologia terreno	Classe	AWC
Ghiaie dominanti	G1	1.1
Ghiaie con locali depositi fini	G2	
Ghiaie e depositi fini	G3	
Sabbie dominanti	S1	1.4
Sabbie con locali depositi fini	S2	
Sabbie con depositi fini	S3	
Limi dominanti	L4	2.2
Limi con sabbie e ghiaie	L5	
Argille dominanti	A4	3

La suddivisione spaziale che si ottiene ([Figura 55](#)) coincide con quella già vista per i gruppi idrologici. Anche in questo caso si passa quindi da una classificazione omogenea, in cui tutto il dominio è rappresentato da un unico valore di AWC ad una più dettagliata, differenziata in base alla tipologia di suolo presente nei primi metri della zona di interesse.

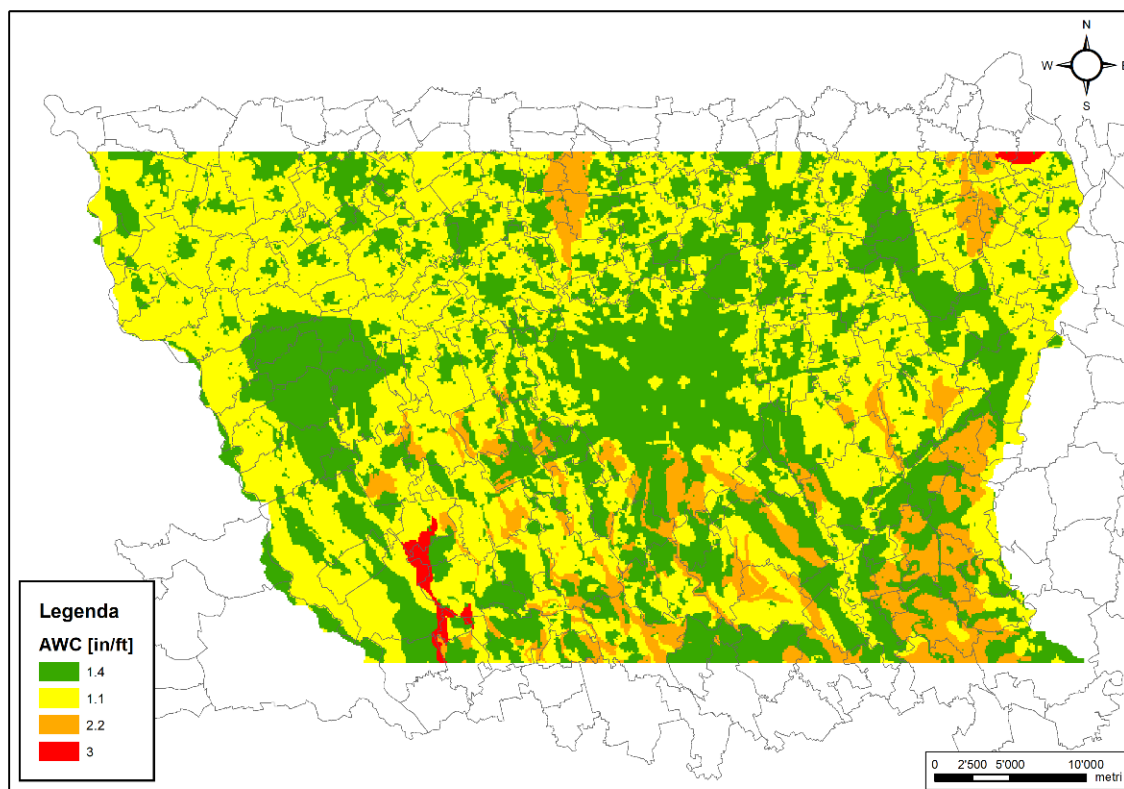


Figura 55: Classificazione della capacità idrica delle diverse tipologie di suolo presenti nel dominio di modellazione

6.3.3 Land use/cover

L'ultimo file GRID che è stato aggiornato per ottenere un valore di ricarica più accurato è quello relativo alla copertura del suolo. Nel modello originale, la classificazione era stata fatta individuando 4 diverse aree all'interno del dominio di modellazione (Figura 33): area urbana, area agricola, area verde ed area mista. In quest'ultima zona non è stata individuata un'univoca copertura del suolo e le è stato assegnato un valore di ricarica costante, non ottenuto quindi da una stima di SWB. Infine, la suddivisione mostrava una netta prevalenza di aree verdi, in contrasto con la forte urbanizzazione che invece caratterizza l'area di studio.

Le informazioni riguardanti l'uso del suolo sono state reperite dal DUSAF (Destinazione d'Uso dei Suoli Agricoli e Forestali) risalente al 2018 tramite il Geoportale della Regione Lombardia. All'interno di tale database sono classificate in più livelli le tipologie di aree presenti all'interno della zona di interesse; in questo studio ci si è soffermati solo sulla classificazione definita dal primo livello in quanto ritenuta sufficientemente dettagliata per le dimensioni dell'area di studio. È stata quindi individuata una corrispondenza tra la classificazione del DUSAF e quella presente in SWB, assegnando alle diverse celle dell'area di interesse i relativi parametri di Curve Number (CN).

In *Tabella 11* sono riportate le aree corrispondenti tra il DUSAF ed SWB.

Tabella 11: Classificazione dell'uso del suolo all'interno del DUSAF e in SWB

Classificazione DUSAF	Classificazione SWB
Area antropizzata	Urban
Aree agricole	Agricoltura
Territori boscati	Forest
Aree umide	Grassland
Corpi idrici	Open water

Si ottiene quindi una classificazione dell'uso del suolo (*Figura 56*) in cui l'area urbana e quella agricola ricoprono la maggior parte del dominio di modellazione e le aree verdi coincidono con i parchi presenti all'interno della città di Milano e di Monza (a Nord del modello). Le aree boschive si trovano principalmente ai confini laterali del modello, lungo i fiumi Adda e Ticino mentre il principale corpo idrico è rappresentato dall'Idroscalo, visibile ad Est di Milano.

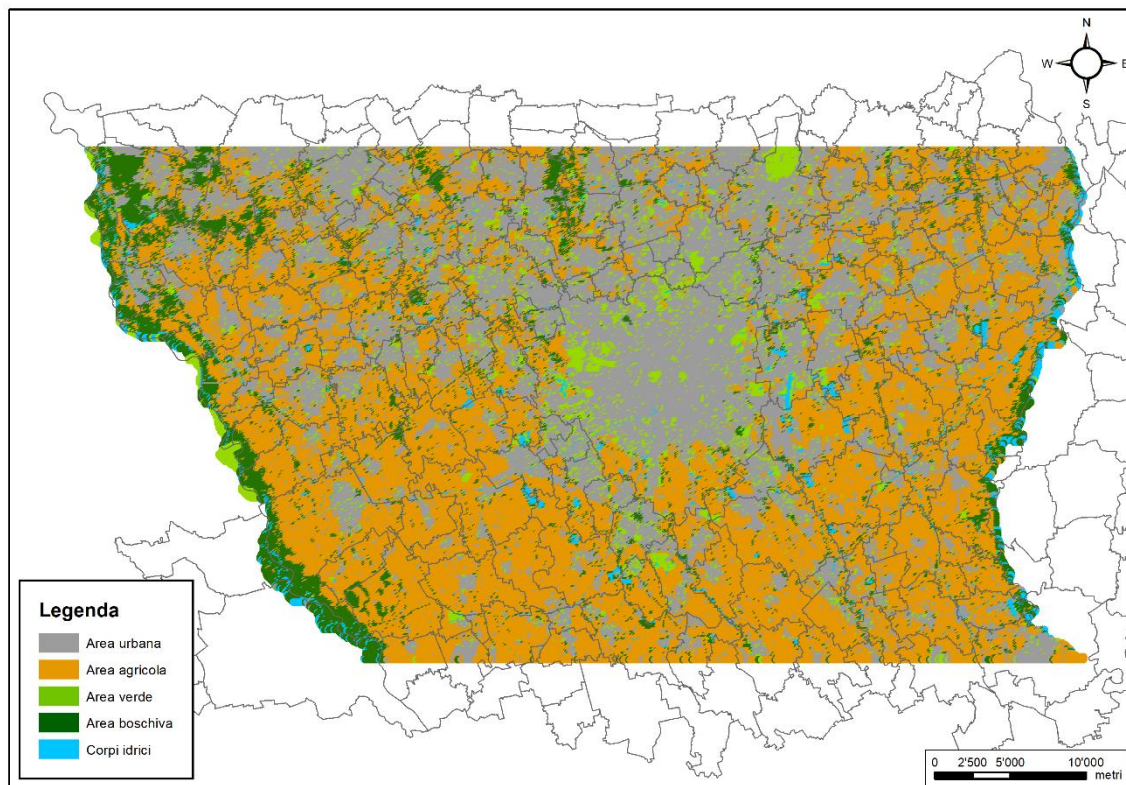


Figura 56: Classificazione dell'uso del suolo del dominio di modellazione

6.3.4 Sensibilità della ricarica meteorica all'aggiornamento degli input

Una volta aggiornati i file GRID da fornire in input a SWB, è stata valutata l'influenza che gli stessi hanno sui valori di ricarica stimati. In particolare, la ricarica è stata calcolata aggiornando un parametro alla volta in modo da valutare il loro effetto singolarmente; prima è stato aggiornato solo il file relativo alla classificazione HSG, poi anche quello relativo all'AWC e infine il file relativo all'uso del suolo. A titolo esemplificativo, in *Figura 57* sono riportati i valori medi mensili di ricarica ottenuti da tali analisi per gli anni 2014 e 2018; essi sono confrontati con il valore di ricarica ottenuto mantenendo tutti i file GRID invariati (colonna blu) e l'andamento della precipitazione durante l'anno solare (linea rossa).



Figura 57: Valori di ricarica meteorica ottenuti aggiornando progressivamente il file HSG, il file AWC e quello relativo a Land cover per gli anni 2014 (a, c, e) e 2018 (b, d, f)

Si può osservare come in tutti i grafici, aggiornando i file GRID, si registri un aumento dei valori di ricarica rispetto a quelli ottenuti in origine. Tale aumento è evidente soprattutto nei mesi in cui sono presenti precipitazioni più intense. In particolare, la differenza maggiore la si riscontra passando dalla ricarica ottenuta dal modello originale a quella ottenuta aggiornando il file HSG; il motivo di tale differenza è dovuto al fatto che nel modello originale tutto il dominio era stato

classificato con il gruppo idrologico B, trascurando quindi la presenza diffusa delle ghiaie (gruppo A) che avendo un tasso d'infiltrazione più elevato, portano a valori maggiori di ricarica della falda.

Aggiornando anche il file relativo all'AWC invece non si registrano differenze rilevanti rispetto alle ricariche ottenute aggiornando il solo HSG. Le uniche differenze si riscontrano nel mese di novembre quando tipicamente si hanno valori di precipitazioni elevati preceduti da un periodo meno piovoso; in questo caso, il file AWC aggiornato porta a valori di ricarica ancora maggiori. Lo stesso comportamento lo si ritrova anche nel mese di luglio del 2014 (*Figura 57c*) e nel mese di maggio del 2014 (*Figura 57d*) per la stazione di Busto Arsizio in cui si sono registrati picchi di precipitazione rispetto ai due mesi precedenti.

Infine, aggiornando anche il file relativo all'uso del suolo (Land cover) e quindi tutti e tre i file GRID, si osserva che i valori di ricarica tendono a diminuire, seppur di poco. Tale diminuzione è ben evidente nel mese di novembre, quando le precipitazioni sono più intense, ma anche nei mesi di gennaio e febbraio dell'anno 2014 per le stazioni di Lambrate (*Figura 57a*) e Busto Arsizio (*Figura 57c*) e nel mese di ottobre dell'anno 2018 (*Figura 57 b, d*). In questo caso, i valori di ricarica tendono a diminuire in quanto nel modello originale veniva sottostimata la superficie urbana che, essendo fortemente impermeabile, riduce il tasso di infiltrazione di acqua nel sottosuolo.

6.4 Suddivisione spaziale dei valori di ricarica meteorica

Come detto, i valori di ricarica sono stati calcolati a partire dai dati climatici e di precipitazione delle tre stazioni meteorologiche di Lambrate, Busto Arsizio e Sant'Angelo Lodigiano. In questo modo, per ogni cella del dominio sono stati ottenuti tre differenti valori di ricarica meteorica; è stato quindi necessario scegliere un criterio di assegnazione per attribuire ad ogni cella il valore più verosimile. Dato che i valori di permeabilità presenti all'interno del modello di flusso sono stati calibrati in base ai valori di ricarica ottenuti nell'ambito del progetto MODEL-MI, si è deciso di mantenere il criterio di suddivisione utilizzato nel progetto stesso in modo tale da permettere un confronto più diretto delle statistiche e dell'andamento dei carichi piezometrici tra i diversi modelli. È stato quindi utilizzato come criterio quello dei poligoni di Thiessen, assegnando ad ogni cella del dominio il valore di ricarica ottenuto sfruttando i dati climatici della stazione meteorologica più vicina. La suddivisione ottenuta è riportata in *Figura 58*; si osserva come, sfruttando i poligoni di Thiessen, si ottiene una suddivisione del dominio in tre aree di influenza che hanno un'estensione che si sviluppa prevalentemente in direzione Nord-Sud.

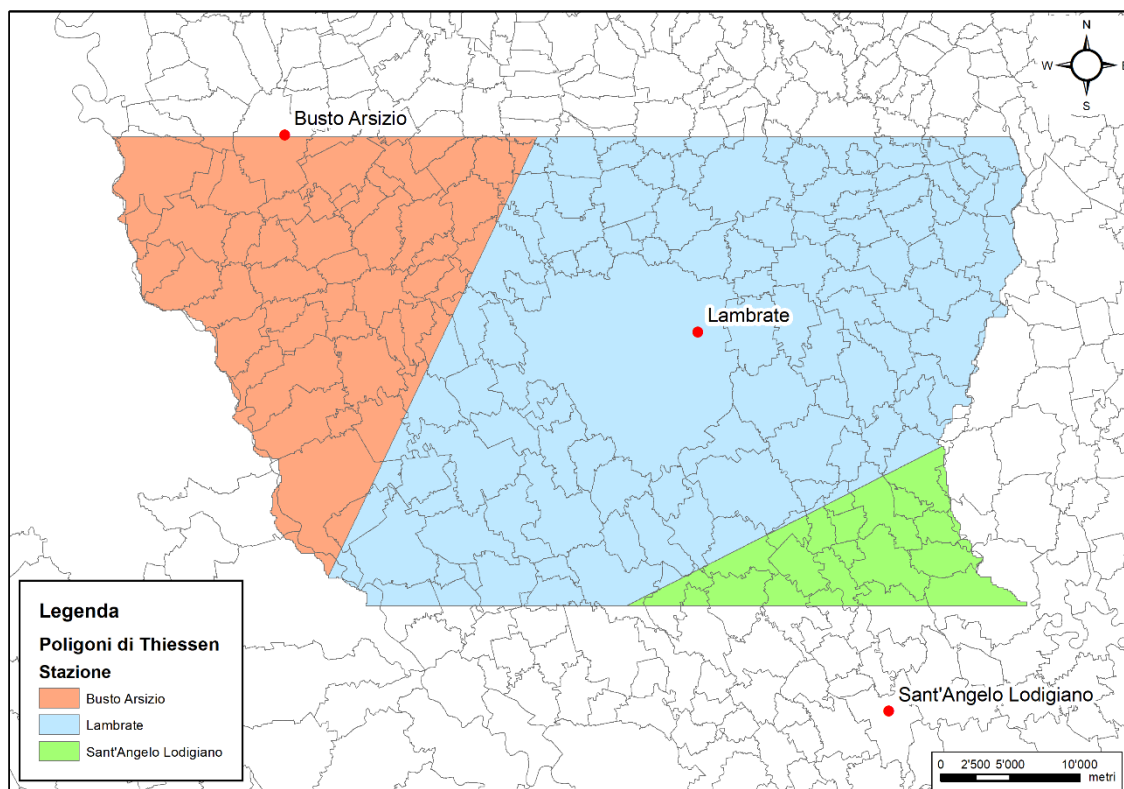


Figura 58: Zone di assegnazione dei valori di ricarica meteorica

6.5 Ricarica effettiva

Una volta assegnati, ad ogni cella del dominio, i valori di ricarica meteorica, è stata calcolata cella per cella la ricarica effettiva, considerando anche il contributo dovuto all'irrigazione e quello delle perdite acquedottistiche.

Per il calcolo della ricarica irrigua, sono stati sfruttati i dati disponibili relativi alle portate d'acqua concesse (m^3/sec) ai comprensori e sub-comprensori (Figura 34) derivanti dai principali canali irrigui lombardi (Navigli, Canale Villoresi, Martesana e Muzza). È stata quindi calcolata l'area agricola di ogni comprensorio e sub-comprensorio conteggiando il numero di celle classificate come agricole ricadenti nelle diverse aree e, sotto ipotesi di distribuzione uniforme dell'irrigazione all'interno di un comprensorio, è stata ottenuta la quantità d'acqua utilizzata per l'irrigazione per ogni cella di tipo agricolo (m/sec), mediante la formula [6.1]:

$$\frac{\text{portata d'acqua concessa } (m^3/sec)}{\text{area agricola del comprensorio } (m^2)} \quad [6.1]$$

Si è considerata inoltre la stagionalità delle pratiche irrigue caratterizzate da una variabilità durante l'anno solare già riportata in *Tabella 3*. Infine, i valori ottenuti sono stati ridotti del 30% ritenuta la percentuale di acqua che le coltivazioni riescono ad assorbire; pertanto, solo il 70% dell'acqua utilizzata per l'irrigazione si infiltra e va ad alimentare la falda. Tale dato è stato ricavato da una precedente tesi realizzata nell'area irrigua della Martesana.

La ricarica nelle zone urbanizzate è stata considerata come dovuta esclusivamente alle perdite dalla rete acquedottistica. Tale valore, in base alle informazioni raccolte presso i gestori acquedottistici, CAP e MM, è stato stimato essere pari al 15% del totale emunto dai pozzi pubblici [35]. In primo luogo, è stato necessario calcolare la portata totale emunta dai pozzi di ogni comune presente all'interno del dominio di modellazione (m^3/sec). Dividendo tali valori per l'area urbana del comune corrispondente (m^2), è stata ottenuta la quantità di acqua estratta dai pozzi per unità di area di tipo urbano (m/sec). Infine, per ottenere la ricarica dovuta alle perdite acquedottistiche, sono stati moltiplicati i valori ottenuti per 0.15.

I valori di ricarica ottenuti sono stati assegnati basandosi sulla classificazione dell'uso del suolo descritta nel paragrafo 6.3.3, in cui:

- Area urbana: la ricarica è data dalle sole perdite delle reti acquedottistiche;
- Area agricola: la ricarica è data dalla somma della ricarica meteorica e quota parte dell'irrigazione;
- Area verde: la ricarica è data dalla sola ricarica meteorica;
- Area boschiva: la ricarica è data dalla sola ricarica meteorica;
- Corpi idrici: la ricarica è data dalla sola ricarica meteorica, che SWB valuta pari a zero.

In *Figura 59* è riportata la distribuzione dei valori di ricarica nel dominio di modellazione; i valori aggiornati (*Figura 59b*) sono stati confrontati quelli utilizzati nel modello di partenza (*Figura 59a*).

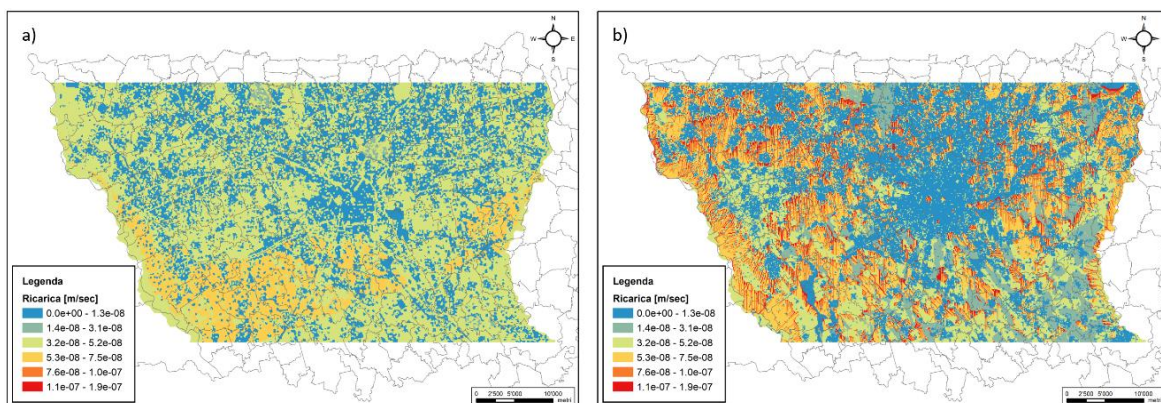


Figura 59: Distribuzione dei valori di ricarica del modello originale (a) e di quello aggiornato (b)

Passando dai valori di ricarica originali a quelli aggiornati si nota come la classe rappresentante i valori più bassi (di colore blu) ricopra una superficie maggiore; tale classe rappresenta la ricarica dovuta alle perdite acquedottistiche e quindi, implicitamente, le zone urbane, che nel progetto MODEL-MI erano state sottostimate. Ai lati del Comune di Milano, nel confine Ovest e in quello Nord-Ovest del modello, invece, si osservano valori di ricarica superiori. Questo è probabilmente dovuto all'aggiornamento dei file grigliati HSG e AWC in quanto, proprio in quelle aree è presente terreno ghiaioso e quindi fortemente permeabile. Viceversa, nella porzione a Sud-Est del dominio, dove invece sono presenti strati limosi e quindi meno permeabili, si riscontrano valori di ricarica minori rispetto a quelli calcolati per il modello di partenza.

Dai risultati osservati, è evidente come una classificazione più dettagliata dei gruppi idrologici, della capacità idrica dei terreni e dell'uso del suolo influenzi in modo non trascurabile i valori di ricarica che si ottengono.

6.6 Risultati del modello

La ricarica totale aggiornata è stata infine implementata in MODFLOW e, mantenendo invariate tutte le condizioni al contorno ed interne, è stata svolta una simulazione in transitorio per gli anni 2014-2018. Al termine della simulazione si è proceduto all'analisi degli indici statistici del modello che hanno permesso di confrontare i valori simulati con quelli osservati.

In *Tabella 12* sono messi a confronto i principali indici statistici ottenuti dal modello di partenza con quelli derivanti dal modello aggiornato. È possibile osservare come l'aggiornamento dei valori di ricarica abbia portato ad un generale miglioramento dei carichi simulati nonostante i valori di permeabilità non siano stati ricalibrati; si riscontra infatti una diminuzione della quasi totalità degli indici statistici.

Tabella 12: Principali indici statistici del modello di flusso di partenza e di quello aggiornato

Indice statistico	Modello CH	Modello aggiornato
Media dei residui [m]	-0.59	-0.24
Media assoluta dei residui [m]	2.02	1.71
Deviazione standard [m]	2.55	2.38
Residuo minimo [m]	-9.49	-8.95
Residuo massimo [m]	7.83	8.50
Media assoluta scalata [%]	1.9	1.6
Deviazione standard scalata [%]	2.4	2.2

La media assoluta dei residui passa da un valore di 2.02 m a 1.71 m così come la deviazione standard che diminuisce, passando da 2.55 m a 2.38 m. I valori scalati variano di poco rispetto a quelli ottenuti col modello originale e rimangono ancora ampiamente al di sotto del 10%, ritenuto la soglia limite al di sotto della quale si considera accettabile la modellazione [31], [32]. L'unico indice che peggiora è quello del residuo massimo che aumenta di circa 0.7 m.

Per valutare più nel dettaglio l'impatto che l'aggiornamento della ricarica ha avuto sulla stima dei livelli di falda, sono stati analizzati gli andamenti dei carichi nel tempo confrontandoli con quelli osservati. In [Figura 60](#) è riportata l'ubicazione dei punti di monitoraggio considerati.

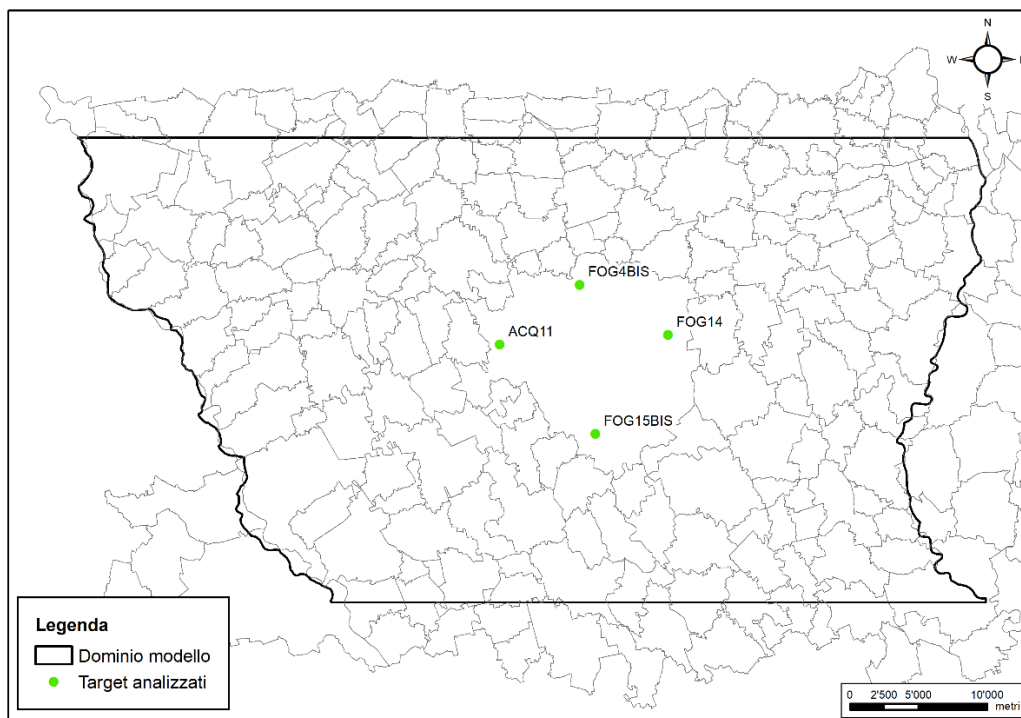


Figura 60: Ubicazione dei target analizzati

I punti considerati si trovano all'interno del Comune di Milano (zona di maggior interesse) ed identificano i quattro punti cardinali: Nord (FOG4BIS), Sud (FOG15BIS), Ovest (ACQ11) ed Est (FOG14). In [Figura 61](#) sono riportati, per ogni punto, gli andamenti dei carichi osservati, l'andamento dei carichi simulati con il modello sviluppato nel progetto MODEL-MI e l'andamento dei carichi con il modello aggiornato.

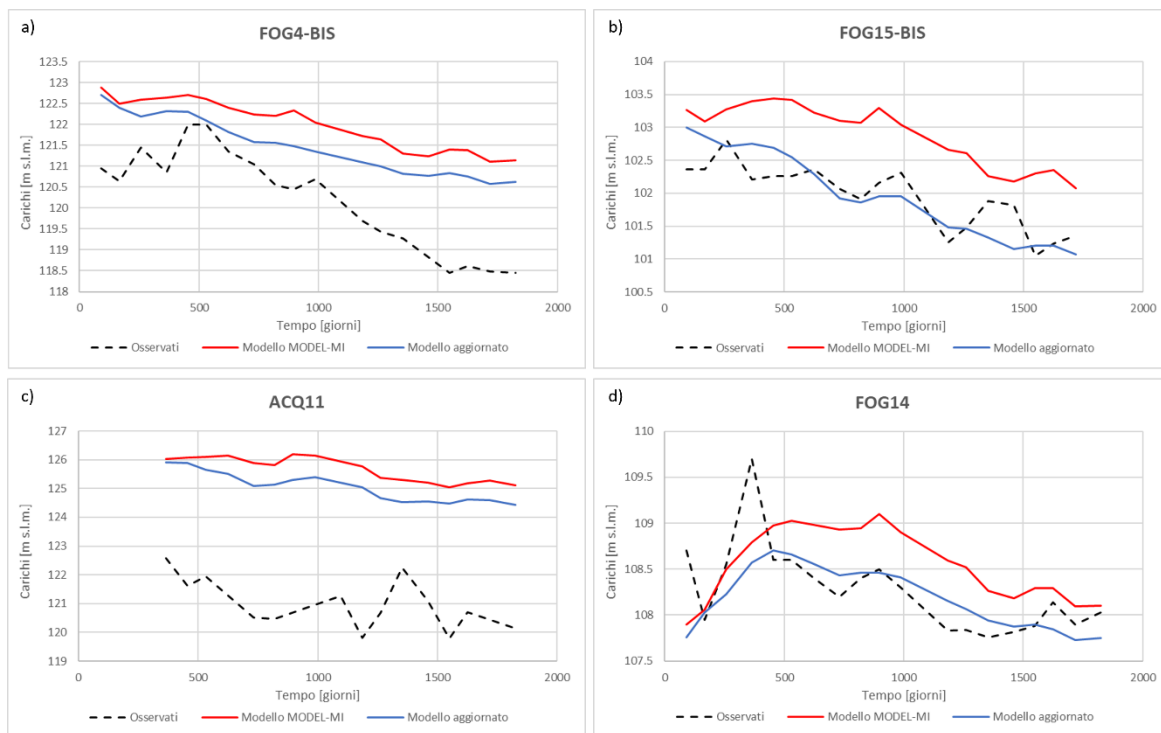


Figura 61: Confronto dei livelli di falda dei due modelli con i valori osservati

In generale si osserva come i carichi simulati dal modello avente i valori di ricarica aggiornati siano caratterizzati da valori più bassi rispetto ai risultati ottenuti con il modello di partenza e rappresentino meglio l'andamento dei livelli osservati. In particolare, nei punti presenti nella zona Sud-Ovest di Milano (Figura 61 b, d) si ottiene un'elevata corrispondenza tra valori simulati ed osservati mentre nei punti a Nord-Est (Figura 61 a, c) si hanno ancora discostamenti che vanno dai 2 ai 4 m.

Si può quindi affermare che ricalcolare più dettagliatamente i valori di ricarica meteorica da fornire in input al modello di flusso, porta a stime dei livelli di falda che meglio rappresentano i reali andamenti osservati.

Conclusioni

Nel presente elaborato di tesi è stato utilizzato il modello di flusso (sviluppato nell'ambito del progetto MODEL-MI) rappresentante l'andamento dei livelli di falda al di sotto della Città Metropolitana di Milano. In primo luogo, è stata valutata l'influenza delle diverse condizioni al contorno e della componente della ricarica dovuta all'irrigazione sui risultati del modello all'interno della città di Milano. Successivamente, sono stati svolti scenari previsionali considerando tre diverse riduzioni della ricarica irrigua in un arco temporale di 30 anni (2018-2048). Infine, è stato aggiornato il modello di flusso, calcolando più nel dettaglio i valori di ricarica meteorica sfruttando il *software* SWB.

I risultati ottenuti dall'analisi delle condizioni al contorno hanno evidenziato come le condizioni rappresentanti i confini laterali del dominio (fiumi Adda e Ticino) siano caratterizzate da una zona di influenza limitata, che non va ad interessare i carichi piezometrici sottostanti la città di Milano. Tale effetto è legato al fatto che i fiumi scorrono all'interno di valle profondamente incise rispetto al livello medio della pianura milanese e pertanto il livello delle acque superficiali risulta sempre essere inferiore rispetto a quello medio della falda con conseguente effetto drenante. Viceversa, le condizioni a carico costante (Dirichelet) implementate nei bordi settentrionale e meridionale del dominio, pur essendo lontane dal Comune di Milano, ne influenzano in modo non trascurabile i livelli della falda. Diversamente, la riduzione della ricarica irrigua ha portato ad abbassamenti moderati ma distribuiti sull'intero dominio di modellazione, a conferma del fatto che la componente irrigua della ricarica ha un'influenza importante sui livelli dell'acquifero superficiale; in questo caso, le variazioni di carico maggiore si sono registrate ai lati della città di Milano, in cui i comprensori irrigui sono riforniti dai principali canali artificiali (Navigli lombardi, Muzza e Canale Villoresi).

Data la forte influenza delle condizioni di monte e di valle è stato approfondito l'uso di condizioni di flusso dipendente dal carico (Cauchy) mediante il pacchetto GHB. Gli scenari previsionali al 2048 sono stati svolti sfruttando sia il Modello CH sia il Modello GHB, ovvero sono state considerate condizioni al contorno più rigide (CH) e più flessibile (GHB). Gli abbassamenti ottenuti nei tre scenari con riduzione progressiva della ricarica irrigua (15%, 30%, 50%) sono concordi con quanto già precedentemente riscontrato indipendentemente dalle condizioni al contorno adottate: la ricarica irrigua è una componente importante all'interno del bilancio di

massa della falda acquifera presente nella zona di interesse e una sua riduzione consistente (scenario -50%) può portare, nell'arco di 30 anni, ad abbassamenti anche maggiori di 3 m. Tuttavia, dal confronto dei risultati tra i modelli che adottano differenti condizioni al contorno di monte e di valle, si evince come le condizioni di flusso dipendente dal carico (GHB) permettano di ottenere variazioni dei livelli anche nei confini Nord e Sud del modello in quanto, essendo dipendenti dal carico interno al modello, lasciano ai carichi una maggior libertà di variazione. Per questo motivo si ritiene che le condizioni GHB in un'ottica di previsione di livelli piezometrici futuri siano più adatte a rappresentare i flussi in ingresso ed in uscita dal modello in direzione Nord-Sud portando a risultati più verosimili anche all'interno del Comune di Milano.

Successivamente alla fase di analisi di sensitività e implementazione degli scenari di riduzione irrigua tutti realizzati con il modello del progetto MODEL-MI, si è voluto procedere ad un miglioramento dello stesso attraverso l'aggiornamento dei file relativi alla tipologia di terreno e all'uso del suolo in modo da ottenere una stima più accurata della ricarica nell'area in esame. Sfruttando il *software* SWB è stata quindi ricalcolata la ricarica meteorica ed è stata poi implementata nel modello di flusso. I risultati del modello aggiornato sono stati confrontati con quelli ottenuti dal modello originale. Gli indici statistici del modello aggiornato dimostrano un generale miglioramento della simulazione dei carichi; i livelli simulati in corrispondenza di alcuni target presentano valori ed andamenti più vicini ai valori osservati, pur non avendo effettuato una nuova calibrazione dei parametri del modello.

Alla luce dei risultati ottenuti è possibile affermare che nella prossima attività di ricerca, per utilizzare il modello a scopo predittivo, è necessario valutare attentamente i valori di carico da assegnare alle condizioni Nord e Sud in fase preliminare ed eventualmente sfruttare le condizioni GHB piuttosto che CH. Inoltre, per ottenere una rappresentazione dei carichi più accurata sarà necessario calibrare nel dettaglio i valori di permeabilità, utilizzati all'interno delle GHB, dipendenti dalle proprietà idrogeologiche della zona a monte e a valle del dominio di modellazione.

Allo stesso modo, per raggiungere una maggiore accuratezza dei risultati simulati in termini di carico idraulico, dovrà essere realizzata una nuova calibrazione delle permeabilità all'interno del dominio, utilizzando i nuovi valori di ricarica calcolati all'interno di questo elaborato di tesi.

In futuro, la simulazione dei carichi piezometrici mediante il modello di flusso implementato nel progetto MODEL-MI, potrà essere ulteriormente perfezionata analizzando più nel dettaglio alcuni aspetti. È possibile, per esempio, svolgere una classificazione più dettagliata (limitata alla

sola città di Milano) riguardo alla tipologia di terreno e all'uso del suolo in modo da ottenere valori di ricarica più accurati.

Considerando inoltre che i valori di precipitazione variano principalmente in funzione della latitudine, è possibile aggiornare il criterio di assegnazione della ricarica meteorica all'interno del dominio. Nell'elaborato sono stati utilizzati i poligoni di Thiessen per definire le aree di influenza di ognuna delle stazioni meteorologiche considerate, ottenendo tre aree caratterizzate da un'estensione avente uno sviluppo prevalente in direzione Nord-Sud. Così facendo vengono assegnati a celle di latitudine diverse gli stessi valori di ricarica meteorica e, implicitamente, di precipitazione. Per tale motivo è opportuno procedere o utilizzando un diverso criterio di assegnazione (per esempio a fasce orizzontali) o mantenere il criterio dei poligoni di Thiessen considerando un numero maggiore di stazioni meteorologiche.

Lo sviluppo di modelli numerici atti a simulare il deflusso delle acque sotterranee a scala regionale permette di avere strumenti a supporto dei gestori delle acque per la gestione quantitativa della risorsa idrica sotterranea. Tali modelli possono essere utilizzati per valutare gli effetti dovuti dalla variazione delle forzanti climatiche ed antropiche all'interno del territorio, come possono essere gli effetti dovuti ai cambiamenti climatici (aumento delle precipitazioni o periodi di siccità), il cambiamento nelle destinazioni d'uso del suolo, l'implementazione di nuove infrastrutture per la captazione delle acque a scopo idropotabile o i cambiamenti delle pratiche irrigue. Il presente lavoro di tesi dimostra come una possibile variazione delle metodologie di irrigazione, nell'ottica del risparmio della risorsa idrica superficiale, possa in realtà influenzare notevolmente i livelli della falda nell'area della pianura milanese e nella stessa città di Milano. Pertanto, una corretta gestione della risorsa idrica ed una pianificazione che tenga conto di tali aspetti risulta cruciale nell'area di studio.

Bibliografia

- [1] Marelli F., Scesi S., “L’acqua di Milano: falde e interferenza con le infrastrutture”. Workshop “L’acqua e l’ingegneria: oggi e domani” del 22 marzo 2016. Politecnico di Milano.
- [2] Harbaugh A. W., “MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular groundwater model: the ground-water flow process”. US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA, 2005.
- [3] Scesi L., Alberti L., Gattinoni P., Cantone M., Colombo L., La Licata I. and Ortelli A., “Progetto MODEL-MI, revisione e aggiornamento della modellazione numerica del flusso idrico sotterraneo e del trasporto nell’area urbana di Milano – Parte II: modello matematico del flusso idrico e scenari previsionali”, 2021.
- [4] Alberti L., Francani V., Masetti M., Parri A., “Valutazione del livello massimo raggiungibile dalla falda nel Comune di Milano”, Quaderni di tecniche di protezione ambientale, Milano, 2000.
- [5] Gerosa S., “Previsione degli effetti sui livelli di falda nell’area metropolitana di Milano determinati da diversi scenari di cambiamento climatico”, Politecnico di Milano, 2020.
- [6] Regolamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo e del consiglio del 25 maggio 2020 recante prescrizioni minime per il riutilizzo dell’acqua, Gazzetta Ufficiale dell’Unione Europea, 2020.
- [7] Commissione Europea, “Carenza idrica e siccità nell’Unione Europea”, Ufficio delle pubblicazioni, 2011.
- [8] Gandolfi C., “Ricerca sui consumi irrigui e le tecniche di irrigazione in Lombardia”, Istituto di idraulica agraria, Università degli Studi di Milano, 2003.
- [9] Gandolfi C., “Acqua e irrigazione per nutrire il pianeta. La realtà della Pianura Padana lombarda”, Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali, Università degli Studi di Milano.
- [10] Alberti L., “Lezioni del corso di Idrogeologia Applicata”, Milano, Lombardia, Italia: Politecnico di Milano, 2018.
- [11] Diersch H., “Feflow: Interactive, graphics-based finite-element simulation system for modeling groundwater flow, contaminant mass and heat transport processes,” WASY Institute for Water Resources Planning and System Research Ltd., Berlin, Germany, pp. 401–425, 1998.
- [12] Westenbroek S. M., V. Kelson, W. Dripps, R. Hunt, and K. Bradbury, “SWB, a modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for estimating groundwater recharge”, US Department of the Interior, US Geological Survey, Ground Resources, 2010.
- [13] Thornthwaite C. and Mather J., “The water balance, publ. 8, 104 pp,” Lab. Of Climatol., Centerton, NJ, 1955.
- [14] Cronshey R., Roberts R., and Miller N., “Urban hydrology for small watersheds (TR-55 rev.),” in Hydraulics and hydrology in the small computer age, pp. 1268–1273, ASCE, 1985.
- [15] Jensen M. E., & Haise H. R., “Estimating evapotranspiration from solar radiation”, Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1963.
- [16] Turc, L., “Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date”, Ann. Agron, 1961.
- [17] Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A., “Estimating potential evapotranspiration”, Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1982.

- [18] United States Department of Agriculture (USDA), Conservation Engineering Division, "Urban Hydrology for Small Watersheds" 1986.
- [19] PGT Comune di Milano, Documento di valutazione ambientale strategica (VAS), allegato 2: "Quadro di riferimento territoriale ed ambientale", (comune.milano.it).
- [20] Nordio E., "Il sottosuolo di Milano. Comune di Milano", Servizio acqua potabile, Milano, 1957.
- [21] Francani V., Formentin G., Fumagalli D., "Gli strumenti idrogeologici per la gestione delle acque sotterranee nella Città Metropolitana di Milano", 2015.
- [22] Regione Lombardia - Eni Divisione Agip "Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia"; a cura di Cipriano Carcano e Andrea Piccin, SELCA (Firenze), 2002.
- [23] Scesi L., Alberti L., Gattinoni P., Cantone M., Colombo L., La Licata I. and Ortelli A., "Progetto MODEL-MI, revisione e aggiornamento della modellazione numerica del flusso idrico sotterraneo e del trasporto nell'area urbana di Milano – Parte I: modello concettuale" 2021.
- [24] Rumbaugh, J. O., & Rumbaugh, D. B., "Command Reference Manual for Groundwater Vistas 6", Environmental Simulations, Inc 2006.
- [25] Alberti L., Francani V. "Studio idrogeologico sulle cause del sollevamento della falda nell'area milanese", 2001.
- [26] Alberti L., Cantone M., Colombo L., Piana A. and Lombi S., "Numerical model of regional groundwater flow in the Adda-Ticino basin: advances and new results (2016)", "Rendiconti Online Società Geologica", Società Geologica Italiana, Novembre 2016.
- [27] ARPA Lombardia PROGETTO PLUMES INTEGRAZIONE – Report Finale; Milano, Aprile 2016.
- [28] ARPA Lombardia PROGETTO PLUMES – Sintesi Report Conclusivo; Milano, Febbraio 2015.
- [29] INTERREG AMIIGA PROJECT (CE32) "INTEGRATED APPROACH TO MANAGEMENT OF GROUNDWATER QUALITY IN FUNCTIONAL URBAN AREAS", Implementation of pilot action 3: distinction of pilot action 3: distinction between site-specific and diffused contamination in Milan FUA.
- [30] Doherty, J. PEST, "Model-Independent Parameter Estimation", Watermark Numerical Computing, 1994.
- [31] Anderson, M.P.; Woessner, W.W.; Hunt, R.J. "Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport", Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2015.
- [32] ASTM D5981-96(2008), "Standard Guide for Calibrating a Groundwater Flow Model Application" (Withdrawn 2017); ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 2008.
- [33] Alberti L, Francani V., Innocenti I., "La gestione integrata delle risorse idriche lombarde: valutazione del contributo alla ricarica da parte della rete irrigua", 2008.
- [34] United States Department of Agriculture (USDA), "National Engineering Handbook", "Hydrologic Soil Groups", 2007
- [35] Alberti, L., "Model calibration using the automatic parameter estimation procedure (PEST) of the North-eastern zone of the Milan Functional Urban Area (Italy)", *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 2018).
- [36] Mazzon P., "Modellazione stocastica per la valutazione degli effetti in falda di potenziali sorgenti contaminanti nel Nord Ovest di Milano," Master's thesis, Politecnico di Milano, 2018.