

Osservazioni sull'opportunità di una cartografia lombarda delle aree inondabili dalla risalita del livello freatico

Vincenzo Francani, Dario Fumagalli, Carla Rampolla

vincenzo.francani@tethys.srl , dario.fumagalli@tethys.srl

Premessa

In diversi Paesi europei si sono attuate cartografie a scala nazionale o sono stati predisposti sistemi di monitoraggio atti a prevedere il rischio di esondazione delle acque di falda.

Le modalità di realizzazione di questi interventi sono varie e conviene effettuarne una breve panoramica che permetta di chiarirne l'interesse anche per la Lombardia.

Si riportano nell'occasione alcune considerazioni atte a esaminare alcuni dettagli dei rapporti fra corsi d'acqua e falda , che appaiono utili per la redazione di cartografie dalle aree che in Italia si rivelano soggette a questi non rari eventi.

Infine, vengono riportati i criteri di applicazione a un'area della pianura milanese delle tecniche esaminate, ai fini della redazione di una cartografia del rischio di inondazione da acque di falda.

1.Esempi di cartografie del rischio di inondazione da falda

La direttiva europea 2007/60/CE menziona solo brevemente il problema dei rischi derivanti dalle inondazioni delle acque sotterranee e le tecniche per la mappatura dei rischi che si verificano a causa dell'aumento del livello delle acque sotterranee sono state trattate dal punto di vista scientifico ancora in modo differente per le diverse nazioni. Per la Lombardia , la Regione dispone, in un cenno, alla necessità di provvedere a una valutazione del pericolo di inondazione nel corso dei progetti di smaltimento delle acque (Normativa 2020 sull'invarianza idraulica).

Da questi studi e dalle loro applicazioni il rischio derivante dall'innalzamento eccessivo del livello delle acque sotterranee risulta dipendere da una serie di fattori legati al regime delle acque superficiali e sotterranee, alla geologia dell'area e alla sua morfologia; presenta quindi aspetti molto vari e di gravità differente secondo le summenzionate caratteristiche delle diverse aree.

In Francia la cartografia nazionale (BRGM) delle aree sensibili a questo tipo di inondazioni consente di localizzare le aree in cui vi è un'alta probabilità di straripamenti per l'emergere della falda dal terreno o allagamenti di scantinati a pochi metri sotto la superficie del terreno. A tal fine , vengono distinte tre classi

- aree potenzialmente soggette a tracimazioni di acque sotterranee
- aree potenzialmente soggette a allagamenti in cantina
- nessun traboccamento di acque sotterranee o allagamenti di cantina.

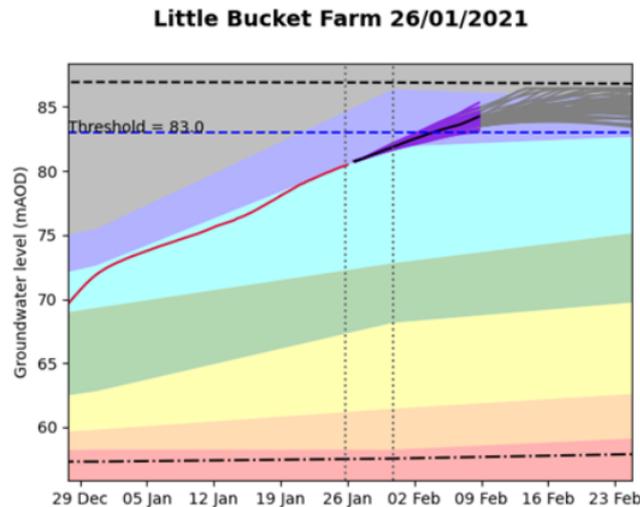
La mappatura effettuata non è valida per le aree carsiche (che mostrano un comportamento particolare e relativamente sconosciuto in alcuni settori), le aree urbane (il cui sviluppo modifica i flussi sotterranei) e le aree post-estrazione mineraria (in fase di cambiamento nei flussi sotterranei a causa del pompaggio dell'acqua di miniera o della cessazione del pompaggio).

Lo sfruttamento della mappa di sensibilità alle esondazioni di questo tipo è possibile solo su una scala inferiore a 1:100.000. In altre parole, per gli studi locali, che richiedono una risoluzione di dettaglio (a scala 1:25.000, 1:50.000), questa cartografia nazionale secondo il BRGM (Géorisques, 2020) non può essere utilizzata.

In Irlanda sono state redatte cartografie delle aree inondabili per sollevamenti di falda, concentrate soprattutto nelle depressioni morfologiche dove già sono presenti conche lacustri e torbiere.

In Inghilterra sono stati predisposti in alcune regioni sistemi di previsione con una rete di monitoraggio dalla quale possono essere ricavati i dati per la previsione delle esondazioni della falda. La tecnica adottata, denominata GeoSmart Groundwater Forecast, fornisce un preavviso fino a 30 giorni dei rischi di alluvione delle acque sotterranee, consentendo una pianificazione mirata degli interventi atti ad incrementare la resilienza delle aree maggiormente vulnerabili. La previsione fornisce indicazioni anche in relazione alla durata per cui potrebbero verificarsi inondazioni, altro elemento particolarmente critico.

Agli utenti dei servizi vengono forniti dati in tempo reale su cui prendere decisioni informate e valutare il probabile rischio futuro per le loro risorse.



Geosmart's groundwater flood forecasting system predicted groundwater levels at an indicator borehole for Nailbourne in East Kent issued on 26th January, predicting groundwater levels to rise above the threshold. A groundwater flood alert was issued for the area by the Environment Agency on 2nd February.

Figura 1 : sistema previsionale sperimentato in Gran Bretagna

Il sistema descritto utilizza una rete di piezometri in tutto il Paese e monitora la cronologia delle infiltrazioni e le ultime previsioni di precipitazioni al fine di prevedere con un adeguato anticipo dove i livelli delle acque sotterranee saranno pericolosamente alti.

2. Le cause del dissesto e l'incidenza delle piene dei corsi d'acqua sulla piezometria e gli allagamenti conseguenti

I fattori che maggiormente contribuiscono a rendere eccessivo il sollevamento piezometrico si possono dividere in occasionali e strutturali, dei quali i primi, come le precipitazioni eccezionali, gli allagamenti prodotti dalla tracimazione dei corsi d'acqua e delle conche lacustri, costituiscono oggetto di analisi idrologiche su base statistica e possono essere previsti stabilendone frequenza e tempo di ritorno.

I contributi dovuti a cause strutturali e congenite con la natura idrogeologica, sono innanzitutto la ridotta soggiacenza della falda, la permeabilità dei terreni superficiali (in quanto favorisce la rapida infiltrazione anche in caso di eccezionali eventi pluviometrici) e la struttura idrogeologica del bacino, soprattutto quando è caratterizzata da un volume dell'acquifero ridotto a fronte degli elevati afflussi idrici dalla zona di alimentazione. Fra le cause più frequenti di quest'ultimo tipo si collocano le risposte della piezometria alle variazioni idrometriche. Le conseguenze sui livelli freatici degli afflussi dalle piogge sono, come noto, valutabili tramite un'adeguata modellazione matematica. Le aree circostanti ai corsi d'acqua naturali e artificiali che sono in stretto rapporto di alimentazione-scambio con la falda freatica sono sottoposte anche agli effetti della variazione del livello idrometrico, in particolare delle piene più persistenti ed elevate. Ai fini dell'analisi delle conseguenze sulla piezometria del regime dei corsi d'acqua, Pinder & Cooper (1969) hanno proposto una metodologia che prevede l'utilizzo di un modello semplificato a passi discreti ai fini di

valutare la variazione del carico piezometrico della falda nel corso di una piena di andamento anche complesso, e della sua fase di esaurimento.

Questa tecnica è stata fra le prime ad essere diffusamente applicata negli studi sulla dinamica degli alvei, insieme con quella di Carslaw & Jaeger (1959). Alla fine degli anni '80 De Marsily (1986), ha richiamato alcune interessanti soluzioni del problema che migliorano quella di Pinder & Cooper (1969) per alcuni casi specifici. Inoltre un significativo contributo teorico è stato portato da Iversen & Richard (2000) per valutare le conseguenze delle precipitazioni, in particolare per legare l'instabilità delle ripe e la variazione del carico idraulico dovuto alle precipitazioni con i parametri idrogeologici dei versanti. Negli anni successivi l'approccio quantitativo alla difesa delle ripe si avvale di studi improntati all'analisi della dinamica degli alvei per casi di particolare interesse.

Più di recente si sono approfondite le modalità della risalita della falda alimentata da sistemi carsici (F.Fiorillo, 2011) e le variazioni nella piezometria imposte dall'urbanizzazione (Alberti e al.2018 , Bonomi e al.20017).

Il quadro delle conoscenze evidenzia quindi che sono disponibili tutti i mezzi e le nozioni per un approfondimento tecnico e scientifico della prevenzione del rischio di allagamento dei terreni prodotto dalle acque sotterranee.

Relazioni analitiche per la valutazione del rapporto fra idrometria e piezometria

Per comprendere le ripercussioni delle variazioni idrometriche sulla piezometria, il modello di Pinder & Cooper (1969) , sia pure con importanti variazioni, risulta ancor oggi valido, e costituisce un punto di partenza fondamentale. La tecnica proposta consente di esprimere le oscillazioni piezometriche imposte dalle piene tramite due parametri calcolabili o misurabili (la trasmissività T e il coefficiente di immagazzinamento S dell'acquifero). Di seguito si ricorda brevemente lo schema dei passaggi matematici attraverso i quali gli Autori sono pervenuti alla soluzione proposta.

Il modello utilizzato da Pinder & Cooper (1969) (Fig. 4) prevede un acquifero confinato orizzontalmente di spessore uniforme limitato da un lato da un fiume (contorno aperto) con un dominio semi-infinito , mentre il fiume è assunto come completamente penetrante l'acquifero.

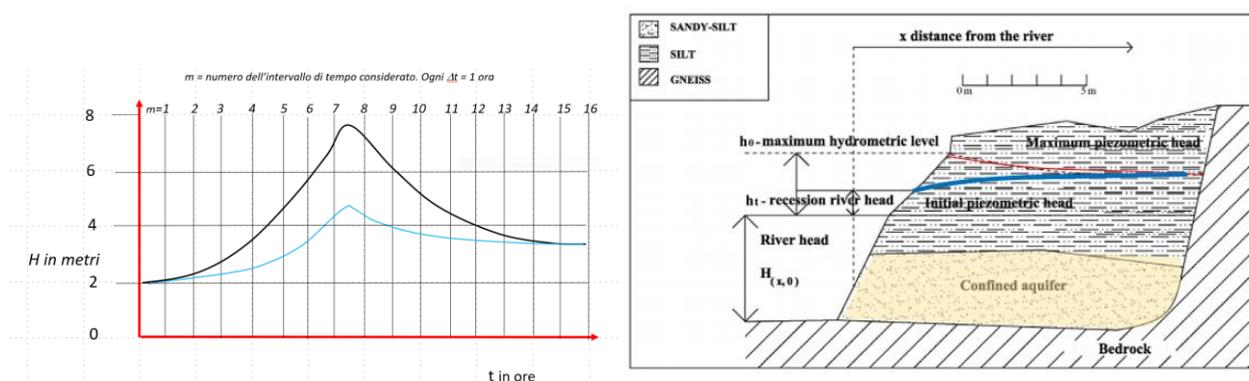


Figura 4 L'immagine schematica mostra i valori idrometrici del corso d'acqua H confrontati con quelli della falda (h_p), rilevati nel tempo t pari a pDt dall'intervallo m pari a 1 a quello con $m = p$. A destra sono rappresentati in sezione l'acquifero e le fluttuazioni dei livelli del corso d'acqua (H) e della falda (h) in fase statica (blu) e in fase di piena (rosso)

Il sistema di flusso monodimensionale è descritto dall'equazione del flusso saturo lineare non stazionario di un acquifero confinato dove $h[m]$ è la fluttuazione del carico piezometrico nell'acquifero, $x [m]$ è la distanza dall'intersezione acquifero-corpo idrico, $t [s]$ è il tempo, S è il coefficiente di immagazzinamento, $T [m^2 /s]$ è la trasmissività dell'acquifero e il rapporto tra T ed S è definita diffusività dell'acquifero.

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{T}{S} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$$

La soluzione data da Pinder & Cooper (1969) all'equazione del flusso usa una discretizzazione approssimata dell'idrogramma dell'andamento del corpo idrico superficiale. Questo approccio di tipo discreto permette l'utilizzo di idrogrammi di qualsiasi forma (ad esempio curve sinusoidali o asimmetriche). Per ciascun incremento di livello idrometrico nel corso d'acqua, il carico nell'adiacente acquifero semi-infinito è dato dalle soluzioni dell'equazione del flusso con le rispettive condizioni iniziali ed al contorno. Il sollevamento del livello piezometrico h_p nell'acquifero è dato quindi da

$$h_p = \sum_{m=1}^p \Delta H_m \left\{ \operatorname{erfc} \frac{u}{2\sqrt{p-m}} \right\}$$

$\Delta H_m [m]$ rappresenta l'innalzamento istantaneo della superficie al tempo $t = m\Delta t$ con m numero intero, a partire da 1 (primo intervallo) .

In sintesi quindi , secondo gli Autori, il sollevamento del livello h_p nel piezometro distante x dal corso d'acqua in una piena di durata $p \cdot \Delta t$, dopo un numero m di intervalli di tempo Δt , è pari alla sommatoria dei sollevamenti dati dal secondo membro della relazione . Questa funzione descrive , approssimando bene la realtà, l'andamento nel tempo della variazione di H nel fiume e quello del minore sollevamento nel piezometro posto alla distanza x dal fiume, fino all'esaurimento totale della piena per una falda in pressione.

Negli ultimi intervalli di tempo diviene insensibile il sollevamento nel piezometro, che inizia con un piccolo ritardo rispetto a quello della piena. La relazione si può adattare al caso di acquifero freatico, ma non tiene conto in questo caso degli effetti dell'infiltrazione di acqua di pioggia che, per gli acquiferi liberi dotati di scarsa soggiacenza ,ha invece un influsso rilevante e spesso determinante nel determinare l'entità del sollevamento piezometrico.

3. L'effetto 'bank storage'

Quando si confrontano i livelli piezometrici di punti di monitoraggio vicini al fiume con quelli idrometrici, si nota che non sempre massimi e minimi sono strettamente corrispondenti: un intervallo di ore o giorni è anzi piuttosto frequente.

E' da ritenere più che probabile che, essendo il comportamento di corsi d'acqua simile nelle linee generali a quello di una trincea a contatto con la falda , questo scostamento dipenda almeno in parte dal fatto che tanto nel caso di un pozzo in emungimento che viene spento, quanto in quello di una trincea dalla quale si sospendono i prelievi , l'arresto dei prelievi corrisponde

sostanzialmente all'immissione nell'opera drenante di una portata equivalente a quella prima estratta. Tale sovrapposizione degli effetti è regolata dalla relazione :

$$s(H+h) = QZ(r, c+t) - QZ(r,t)$$

in cui s in m denota la differenza $H-h$, Q la portata in m^3/s , $Z(r,t)$ la funzione di abbassamento nel dreno, con r e t rappresentativi della distanza dal centro del dreno in m e tempo trascorso dall'inizio del pompaggio in secondi; c indica invece la lunghezza dell'intervallo di tempo in cui l'opera drenante ha prelevato la portata costante Q .

Il supporto dato dall'applicazione della sovrapposizione degli effetti può quindi spiegare almeno in parte il ritardo della risposta piezometrica nei punti di controllo siti a breve distanza dal fiume. Il fenomeno può essere descritto con un procedimento analogo a quello utilizzato per le prove di risalita dei pozzi per acqua, tramite il metodo della sovrapposizione degli effetti. La relazione di Pinder e Cooper non tiene tuttavia conto di questo fenomeno che riguarda le aree adiacenti ai corsi d'acqua, e necessita quindi di una integrazione.

Per comprendere le modalità che richiedono questo miglioramento, è opportuno utilizzare il modello descritto da D.K.Todd (1959) e successivamente ripreso da vari Autori per analizzare le relazioni tra idrometria e piezometria (figura 5) per effetto del cosiddetto 'bank storage' .

Questo termine rappresenta il fatto che il contatto fiume falda può essere semplificato con la similitudine di tale struttura a quella di una vasca alla quale affluiscano contemporaneamente acque di fiume e di falda. In effetti, se il livello idrometrico è inferiore (es. in fase di esaurimento della piena), è la sola falda ad alimentare il fiume .

Con l'arrivo della piena nel fiume, mentre il livello idrometrico sale molto rapidamente, per effetto del rallentamento che il flusso idrico subisce entrando nell'acquifero, la 'vasca' continua a colmarsi di acqua di falda finché la variazione di pressione imposta dall'idrometria e il conseguente aumento del flusso dal fiume alla falda vi determina un apporto anche dal fiume. La consistenza dell'apporto aumenta nel tempo ma non eguaglia quello della falda se non dopo qualche tempo, perché la velocità di propagazione della piena dipende dalla diffusività idraulica .

Quindi nel contorno del fiume il livello piezometrico raggiunge il suo culmine in ritardo rispetto a quello idrometrico, come indicato nella figura 5, tratta dal citato studio di Todd.

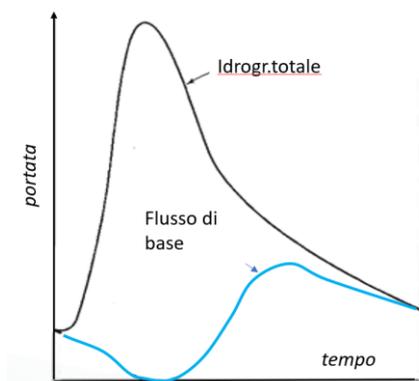


Figura 5 Effetti di inerzia (o di bank storage) nel rapporto idrometria-piezometria descritti da Todd (1959). Si nota il ritardo nella propagazione dell'effetto della piena del corso d'acqua sulla piezometria per la sovrapposizione dell'afflusso dell'acqua di falda verso il fiume con la propagazione dell'acqua della piena verso la falda.

In queste circostanze, in vicinanza del corso d'acqua al moto di discesa prodotto dall'esaurimento si sovrappone l'impulso alla risalita determinato dal sollevamento del livello idrometrico in seguito alla nuova piena. Il livello dell'acqua nei piezometri è dunque la somma algebrica degli effetti dell'esaurimento e di quelli della nuova risalita.

L'effetto sulla piezometria si va riducendo con la distanza, tanto che esso si propaga al massimo fino a qualche centinaio di metri, come verificato nel caso di uno studio sul t.Pioverna (Colombo L. e al.,2015) e risulta molto sensibile in prossimità del corso d'acqua solo se si verificano effetti concomitanti che ne aumentano l'entità.

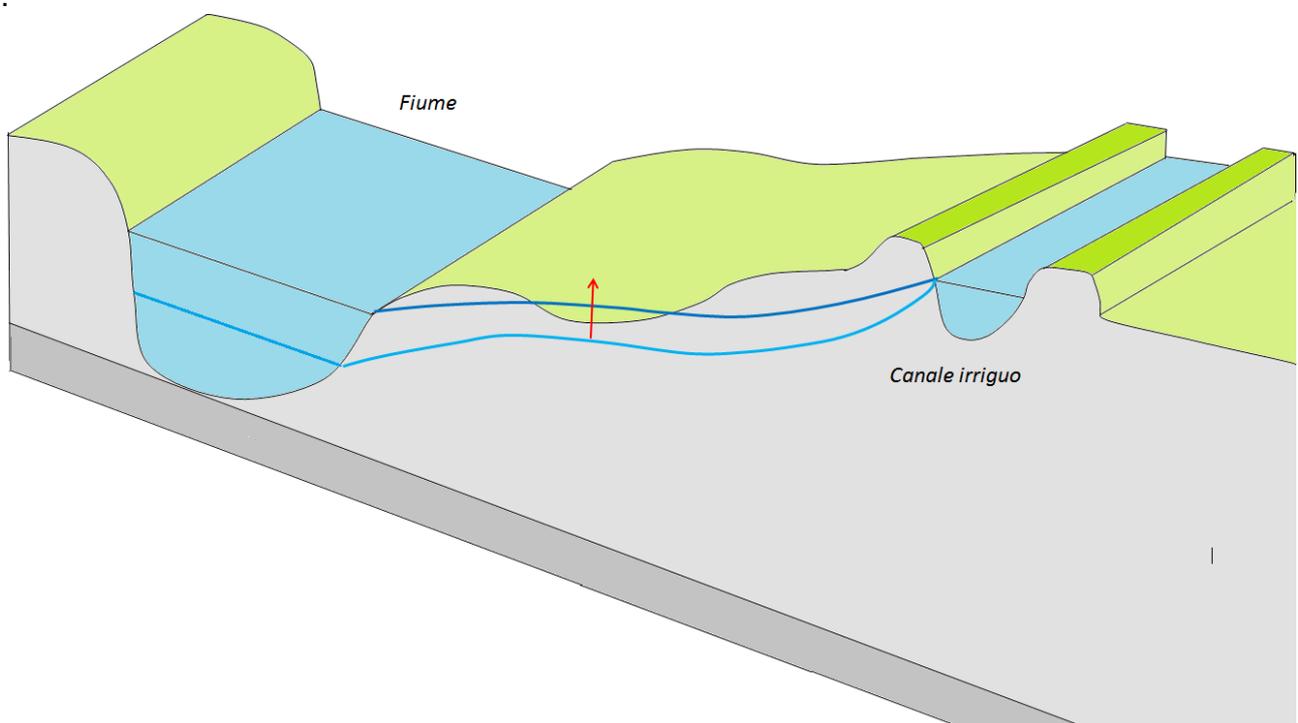


Figura 6 Negli acquiferi freatici le variazioni piezometriche prodotte dai corsi d'acqua si sommano facilmente a quelle determinate dalle precipitazioni e dalla presenza di fonti di alimentazione che, come i canali irrigui, mantengono elevati i livelli piezometrici. Negli acquiferi in pressione le fluttuazioni piezometriche risentono invece solo raramente di tali circostanze.

Uno di questi eventi si manifesta quando la falda freatica al contorno del corso d'acqua è mantenuta a livelli elevati dalla rete idrica superficiale o da altri fattori alimentanti, e di conseguenza è sufficiente un modesto sollevamento del livello freatico per produrre un allagamento delle depressioni.

Ad esempio Krebich e al. presentano il caso delle alluvioni del 2002 e del 2006 a Dresda, collegate con due piene del F.Elba accompagnate da un'elevazione del livello piezometrico superiore di un metro circa a quello idrometrico. Gli Autori sottolineano che, essendo la soggiacenza della falda già abitualmente molto ridotta, le precipitazioni che hanno alimentato le piene hanno contribuito notevolmente anche all'esondazione della falda.

Il ritardo nella propagazione dell'effetto della piena è stato in questi casi molto ridotto (solo due giorni nel caso di Dresda) . Tale risposta rapida si verifica solitamente quando il fiume ha tracimato gli argini, producendo la saturazione dei terreni superficiali permeabili e facilitando l'infiltrazione efficace.

Un altro fattore capace di aumentare il pericolo di esondazioni dalla falda è costituito dall'incremento inusuale delle portate affluenti ai canali di drenaggio utilizzati per lo smaltimento delle acque piovane nei centri urbani e per la regolazione dei livelli piezometrici nelle aree agricole. Gli apporti in eccesso durante i periodi di precipitazioni elevate provengono nei casi più consueti dal drenaggio della rete urbana , sia perché i loro recapiti (i fiumi) assumono per effetto delle piogge livelli idrometrici troppo alti per consentire lo smaltimento delle acque, sia per i maggiori afflussi che ricevono i cavi di drenaggio dalle superfici urbane impermeabilizzate .

Meno frequenti ma comunque di rilievo sono gli eventi in cui i cavi di drenaggio ricevono un eccesso di alimentazione dalla falda stessa, che si solleva per la riduzione delle portate estratte dai pozzi nei periodi di scarsa attività produttiva delle industrie, e quelli in cui la rete irrigua è alimentata da fonti molto sensibili alle precipitazioni.

4.Criteri per la redazione di cartografie di rischio per la pianura lombarda

Dagli esempi prodotti si ricava la conclusione che i parametri che influiscono sulla fluttuazione idrometrica e sulla sua pericolosità sono molto vari e che solo una buona serie di dati piezometrici, idrometrici e climatici può consentire di costruire un attendibile modello previsionale. La Lombardia è una delle regioni più interessate dal problema, perché l'estensione delle zone in cui affiorano le acque sotterranee (fontanili o risorgive) è molto ampia, tanto da avere nei secoli reso la pianura lombarda un esempio di produttività a livello europeo.

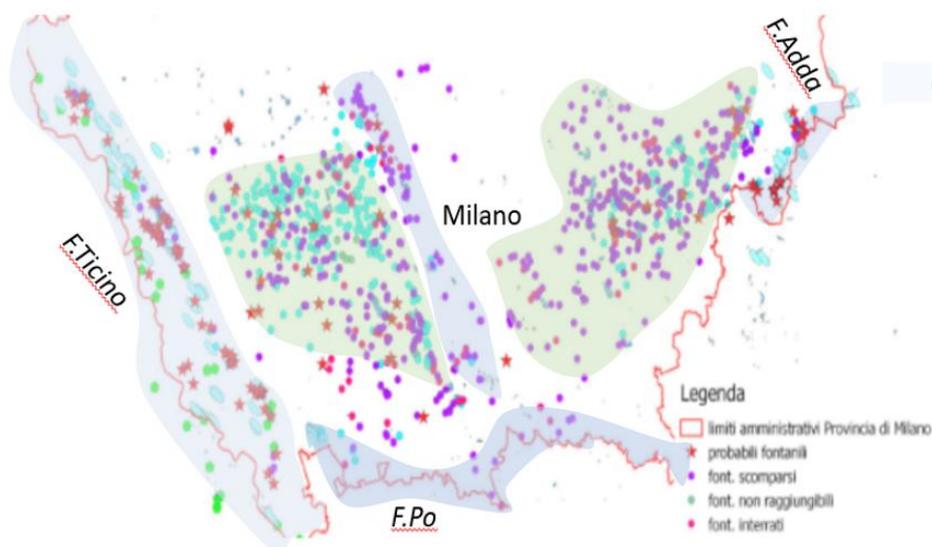


Figura 8: L'area che nella Provincia di Milano appare soggetta alle esondazioni, e dove sono molto frequenti le risorgenze. In azzurro sono indicate le aree nelle quali ha importanza determinante l'idrometria dei corsi d'acqua, mentre in verde sono riportate quelle in cui la soggiacenza è sempre ridotta a meno di 5 m.

Queste aree di affioramento della falda sono regolate da una razionale distribuzione di acque irrigue, che permette il mantenimento dell'efficienza delle sorgenti e non ostacola il drenaggio delle acque in eccesso. La risalita della falda può tuttavia determinare condizioni di rischio non compatibili con un ordinato sviluppo delle infrastrutture urbane e dei collegamenti viari, e da tale considerazione risulta l'opportunità di una riflessione sull'argomento. Si potrebbe affrontare questa ampia tematica sulla base delle considerazioni che hanno portato in Europa all'adozione di apposite cartografie di questi rischi, e risulta evidente che una delimitazione delle aree a rischio di esondazione da falda, corredata con la messa a punto e la sperimentazione di sistemi di monitoraggio e allerta può fornire una solida base di discussione. La raccolta dei dati e la loro analisi dei sistemi informativi geografici completata con la modellazione idraulica e idrogeologica sono tecniche fondamentali nella mappatura dei pericoli della potenziale emersione di acque durante le inondazioni.

In Lombardia i dati raccolti su idrologia, piezometrie e parametri idrogeologici sono molti, e permettono certamente di evidenziare che in molti casi, ad esempio in quelli delle piene del F. Lambro, si sono verificate escursioni dei livelli freatici nella pianura milanese che hanno prodotto gravi conseguenze economiche e anche vittime nel 1947 e 1951.

Appare quindi opportuno provvedere ad una cartografia descrittiva su scala almeno di Città Metropolitana delle aree vulnerabili ai rischi, seguendo i seguenti criteri:

- 1- Identificazione delle aree di ridotta soggiacenza della falda
- 2- Raccolta dei dati delle precipitazioni, delle portate e dei livelli idrometrici dei corsi d'acqua principali e loro informatizzazione
- 3- Modellazione delle risposte della falda in vari scenari climatici cautelativi, tenendo conto dell'esposizione ai fattori che incrementano localmente il rischio di esondazione della falda
- 4- Verifica tramite i dati disponibili sulle piezometrie delle variazioni della soggiacenza in seguito alle piene

Come esempio, viene di seguito riassunto brevemente lo studio finalizzato a verificare alcuni scenari plausibili di evoluzione del livello di falda nell'area interessata dal raccordo in un settore del Milanese, fra la tangenziale Est di Milano ed il Centro Intermodale di Segrate.

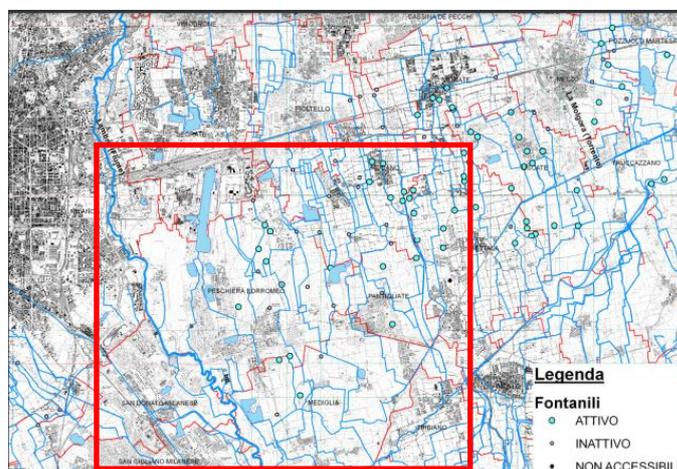


Figura9 : zona di studio

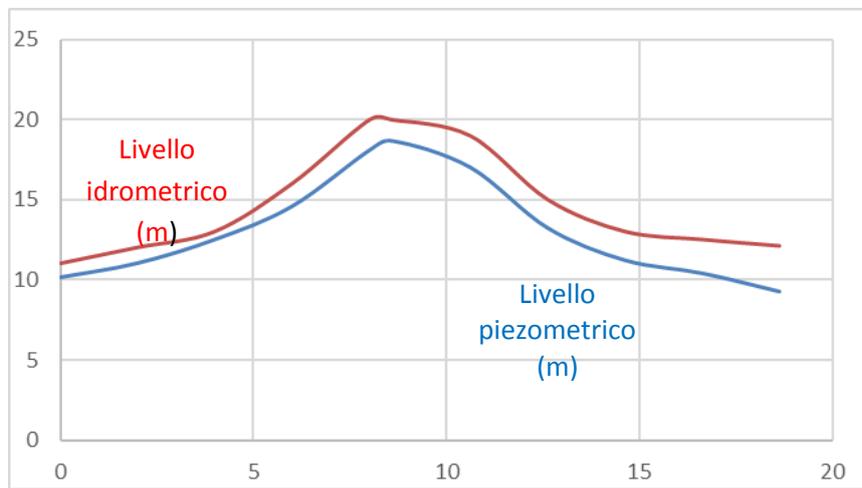
1. Sono state raccolte le più recenti informazioni disponibili circa l'andamento passato e presente delle variabili che influenzano il livello piezometrico della falda freatica: precipitazioni, irrigazione e prelievi. Su questa base sono stati svolti alcuni set di simulazioni.

Le precipitazioni sono state considerate come una variabile stazionaria, ipotesi questa volutamente cautelativa alla luce di mutamenti climatici sempre più evidenti.

Le ricariche superficiali derivanti dalle irrigazioni sono state valutate sulla base di un calcolo, aggiornato al 2010, delle portate distribuite nelle aree agricole ad est di Milano. Tali valori, sottratti della componente assorbita dalle coltivazioni o evapotraspirata, evidenziano come le irrigazioni costituiscano un contributo importante nel bilancio di flusso della falda freatica.

2. È stato svolto un primo set di simulazioni basato sull'evoluzione attesa dell'andamento dei prelievi nell'area interessata dal modello durante i prossimi cinque anni. I dati raccolti mostrano un decremento dei prelievi, sia pubblici che privati, in atto costantemente nella città di Milano a partire dal 1975. Il tasso di riduzione porta, se immutato, ad un decremento delle portate di circa il 7% entro il 2023. Circa l'andamento nel tempo oltre il 2024, non sono disponibili al momento dati che permettano di indirizzare la ricerca con la necessaria attendibilità. I prelievi sono infatti storicamente funzione delle esigenze sanitarie – idropotabili, agricole e di quelle industriali, che possono variare nel tempo in funzione di insediamenti o dismissioni anche importanti che dipendono da scelte economiche o amministrative. Si tenga presente ad esempio che sono sorte necessità di contenere, o comunque gestire, i livelli di falda, mediante l'accentuazione dei prelievi da pozzo finalizzata a limitare l'infiltrazione in infrastrutture sotterranee nelle aree urbanizzate. A tali elementi di incertezza si aggiunge il fatto che potranno essere nel tempo variate le profondità di attingimento: ad esempio, lo scadimento delle caratteristiche qualitative degli acquiferi superficiali porta alla realizzazione di pozzi fenestrati solo negli acquiferi più profondi. Poiché l'influenza del prelievo da questi acquiferi sul livello freatico è tanto minore quanto maggiore è la profondità di captazione, potranno variare le entità degli abbassamenti nel tempo potrebbero variare a parità di prelievo. Circa l'entità dell'innalzamento che la falda può subire in un intervallo di medio-lungo periodo di 50 anni, è stato ipotizzato che le portate prelevate possano subire, in tutta l'area del modello, una riduzione fino al 35% rispetto al valore di prelievo attuale. Appare tuttavia evidente che le conoscenze odierne sui prelievi e sulla loro ripartizione possono essere ritenute accettabili per un periodo di circa un decennio. Sull'area infatti vengono a concorrere, talora sovrapponendosi, gli effetti delle variazioni dei prelievi da falda di grandi industrie idroesigenti, dei cambiamenti demografici e delle conseguenti oscillazioni degli utilizzi di acque potabili, oltre che delle variazioni climatiche. Ciascuna di queste componenti può, anche se presa singolarmente, produrre effetti piezometrici sensibili.

3. Sulla base dei dati raccolti sulla piezometria, per le aree circostanti i corsi d'acqua è stato necessario effettuare una valutazione, corrispondente a piene con tempo di ritorno di 50 anni, degli effetti dell'idrometria sui livelli freatici. Non sono stati ritenuti rilevanti gli incrementi piezometrici dovuti alle precipitazioni, dal momento che i primi 3-4 metri di terreno sono limoso sabbiosi, quindi mediocrementemente permeabili, quanto appare sufficiente per proteggere la falda dai possibili sollevamenti per infiltrazione.



Tempo in ore

Figura 10 Il grafico riproduce la variazione piezometrica indotta dalla piena del corso d'acqua, utilizzando la relazione di Pinder, Braedhoeft e Cooper corretta in modo da adattarla al caso delle falde libere e da tener conto del ritardo legato alla distanza del piezometro dal fiume e della diffusività dell'acquifero

E' stata così valutata la piezometria indotta dalle piene con un programma di calcolo che modifica la relazione di Pinder e al. per adattarla caso della falda libera , e per tenere conto del ritardo con il quale si manifestano nell'acquifero i cambiamenti dei livelli idrometrici. Nell'esempio riportato l'acquifero ha trasmissività media $0,0002 \text{ m}^2/\text{s}$, mentre S è $0,02$, e la distanza in m dal fiume del piezometro è 15 m .

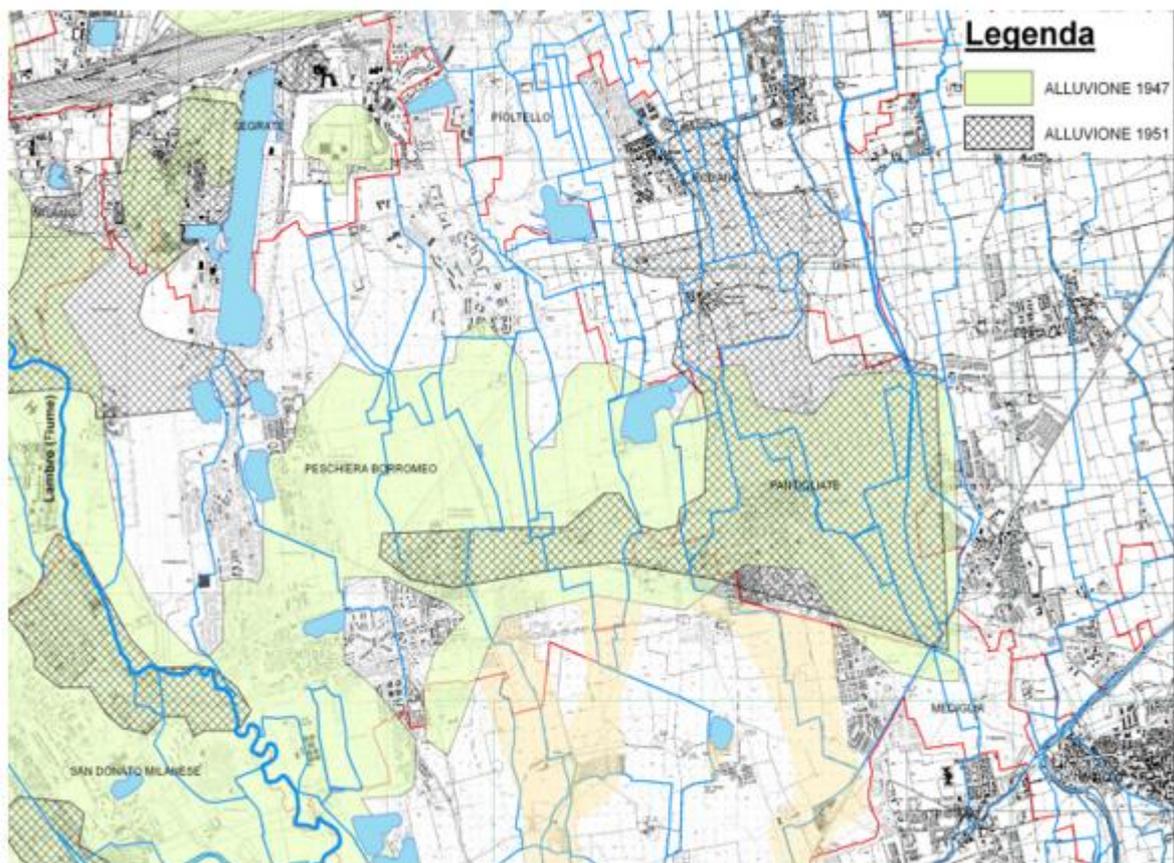


Figura11 : cartografia delle aree esposte all'esondazione da falda risultante dallo studio . In verde e in quadrettato le aree già interessate da esondazioni miste falda-corsi d'acqua. In giallo quelle esposte a esondazioni da falda (depressioni con soggiacenza ridotta)

In base ai dati sui parametri idrogeologici, è stata effettuata la valutazione delle aree interessate da fluttuazioni di falda capaci di produrre allagamenti a scantinati e a infrastrutture, che viene rappresentata nella figura 10 in verde.

Conclusioni

In molte nazioni europee, fra le quali Francia, Germania e Inghilterra, si è constatata l'opportunità di disporre di carte del rischio di esondazione da falda, a seguito della constatazione che il rischio di questo tipo di allagamenti è molto concreto soprattutto dove la soggiacenza della falda è ridotta a meno di 3 m. La possibilità di allagamenti determinati dalla falda si rafforza quando alla ridotta soggiacenza si sommano la vicinanza di corsi d'acqua o di serbatoi carsici dai quali provenga una consistente alimentazione, una elevata permeabilità dei terreni superficiali, che favorisce l'infiltrazione di acqua piovana.

Si deve aggiungere che un peso elevato ha la struttura idrogeologica locale, in particolare quando favorisce l'afflusso da fonti il cui livello piezometrico o idrometrico subisce notevoli escursioni. In Lombardia molte aree di ridotta soggiacenza sono esposte a questi eventi; quindi nell'articolo sono contenute le indicazioni di come la realizzazione di una adeguata cartografia del rischio collegato a questi eventi possa essere utile anche per questa regione. Un esempio è stato proposto per l'area di Segrate-Peschiera Borromeo, poco a Est del Comune di Milano.

Come per le nazioni europee dianzi elencate, si suggerisce quindi di procedere alla redazione di carte del rischio di esondazione della falda basate sull'adozione della seguente procedura:

- 1- Identificazione delle aree di ridotta soggiacenza della falda
- 2- Raccolta dei dati delle precipitazioni, delle portate e dei livelli idrometrici dei corsi d'acqua principali e loro informatizzazione
- 3- Modellazione delle risposte della falda in vari scenari climatologici cautelativi, tenendo conto dell'esposizione ai fattori che incrementano localmente il rischio di esondazione della falda
- 4- Verifica tramite i dati disponibili sulle piezometrie delle variazioni della soggiacenza in seguito alle piene

Bibliografia

F.G. Pinder, J.D. Braedhoeft, H.H. Cooper (1969) - Determination of aquifer diffusivity by the aquifer response to fluctuations in river stage. *Water Resource Research*, Princeton.

Arca S., Beretta G. P. (1985) Prima sintesi geodetico-geologica sui movimenti verticali del suolo nell'Italia Settentrionale (1897-1957) – *Boll. di Geodesia e Scienze Affini XLIV* (2)

IreR (1998). Risanamento dell'area ad alto rischio di crisi ambientale Lambro Seveso Olona. Verifica di fattibilità del progetto strategico sull'area e individuazione di criteri, indirizzi e metodi per l'attuazione di progetti prioritari, Vol. II, Milano, p.9-113,.

Città metropolitana di Milano (2004). Piano di Emergenza Intercomunale, Linee operative generali – Rischio idraulico

Cherubini C., Romanazzi E. (2005). Il problema del sovralzamento della falda freatica in Corato. *Giornale di Geologia Applicata* 2. 383–386, doi: 10.1474/GGA.2005–02.0–56.0082

L. Alberti, V. Francani, I. Innocenti (2008) - La gestione integrata delle risorse idriche lombarde: valutazione del contributo alla ricarica da parte della rete irrigua “The integrated management of groundwater resources in Lombardy region: evaluation of the irrigation network contribution to the recharge”, in: Edizioni Universitarie di Lettere Economia e Diritto (Ed.), *Una Nuova Geologia per La Lombardia*. pp. 379–400

T. Staiano , M. Rinaldi ,E. Paris (2011) – Seepage and stability analysis of embankments during floods. *Dep.of Civil Engin. University Firenze*.

Città metropolitana di Milano, area tutela e valorizzazione ambientale (2013). *Carta delle isopieze e della soggiacenza della provincia di Milano nel settembre 2013*.

Comune di Peschiera Borromeo (2012). *Studio geologico, idrogeologico e sismico di supporto al piano regolatore del territorio – relazione geologica*

Provincia di Milano (2009). *Lo stato quantitativo delle acque sotterranee nella provincia di Milano dal 1997 al 2007*.

Provincia di Milano (1989). *Progetto Lambro, piano di bacino : proposte per la sistemazione idraulica del Lambro e per il riassetto paesaggistico della sua valle*. 201 p.: ill. + 4 tav. sciolte in cartella Provincia di Milano.

L. Colombo, D. Cremonesi, V. Francani(2011) *Strutture idrogeologiche critiche per la stabilità delle sponde del torrente Pioverna (Valsassina, Lecco , Italia) . IJEGE , n.2, pag.65-84, Roma*

F. Fiorillo (2011) _ Tank – reservoir drainage as a simulation of recession limb in Karst *Hydrograph. Hydrogeology Journal*.

Università Degli Studi Di Milano Facoltà Di Agraria, U.R.B.I.M Lombardia (2012). *Tutela e valorizzazione dei fontanili del territorio lombardo - FonTe. Quaderni della Ricerca n. 144 - marzo 2012*

Settore Protezione Civile e GEV (2013). *Revisione e aggiornamento del programma provinciale di previsione e prevenzione dei rischi e del piano provinciale d'emergenza di Protezione Civile. Programma provinciale di previsione e prevenzione rischio idraulico e idrogeologico*.

A. Barozzi, C. Rampolla, V. Francani (2015) -Cause dei periodici allagamenti nella provincia di Milano fra Lambro e Adda , [www. Engeology.eu](http://www.engeology.eu)

Legge Regionale 15 marzo 2016, n. 4 *Revisione della normativa regionale in materia di difesa del suolo, di prevenzione e mitigazione del rischio idrogeologico e di gestione dei corsi d'acqua (BURL n. 11, suppl. del 18 Marzo 2016) urn:nir:regione.lombardia:legge:2016-03-15;4 TITOLO I Oggetto, definizioni, finalità e competenze della Regione*.

T. Bonomi (2009) - Database development and 3D modeling of textural variations in heterogeneous, unconsolidated aquifer media: Application to the Milan plain. *Comput. Geosci.* doi:10.1016/j.cageo.2007.09.006

L. Alberti, M. Cantone, L. Colombo, I. La Licata (2018) - 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 DOI 10.7343/as-2018-336

T.Julínek, D. Duchan, J. Říha (2020) - Mapping of uplift hazard due to rising groundwater level during floods. Wiley Online Library <https://doi.org/10.1111/jfr3.12601>

AA.VV.(2020) – Les inondations par remontée de nappe, @Géorisques, BRGM pagina web

L.Pollicino , M.Masetti, S.Stevenazzi , A.Cristaldi, C. Righetti, M. Gorla (2021)- Multiaquifer susceptibility analyses for supporting groundwater management in urban areas.,J Contam Hydrol. ;238:103774. doi: 10.1016/j.jconhyd.2021.103774. Epub 2021 Jan 22