

ASPETTI IDROGEOLOGICI DEL CARSISMO DELLE PREALPI LOMBARDE

HYDROGEOLOGICAL ASPECTS OF LOMBARD PREALPS KARSTIFICATION (NORTHERN ITALY)

VINCENZO FRANCANI(*) & PAOLA GATTINONI(*)

(*) Politecnico di Milano, D.I.I.A.R., Piazza Leonardo da Vinci, 32 - 20133 Milano, Italia
E-mail: vincenzo.franconi@polimi.it

RIASSUNTO

Attualmente i dati relativi al comportamento dei principali bacini idrogeologici lombardi non appaiono sufficienti per affrontare in modo dettagliato la loro gestione, soprattutto alla luce dei sempre più attuali problemi di riduzione delle portate o di estinzione di molte sorgenti; è quindi apparso utile presentare un primo inquadramento della dinamica dei sistemi idrogeologici lombardi alla luce di alcuni parametri che permettono di classificarne il comportamento sulla base delle conoscenze esistenti. A tale fine, in assenza di dati sufficienti per una completa modellazione matematica, si propone di definire le relazioni fra le portate delle sorgenti e l'alimentazione tramite un approccio semplificato, basato su un modello analitico elementare in grado di quantificare il flusso in un sistema multiacquifero conoscendo la sua permeabilità; il confronto dei risultati così ottenuti con le conclusioni desunte da più complessi modelli matematici ha fornito per il momento incoraggianti indicazioni, in particolare in relazione alla possibilità di prevedere periodi di crisi idrica, destinati a diventare sempre più frequenti a causa sia del sovrasfruttamento sia, soprattutto, dei cambiamenti climatici.

TERMINI CHIAVE: sistema carsico, coefficiente di esaurimento, modello matematico

PREMESSA

La costruzione di molte opere in sotterraneo e di grandi sbarramenti per la creazione di serbatoi artificiali ha permesso la raccolta di molti dati sulla circolazione idrica in roccia anche sul territorio lombardo, dove si riscontrano diversi tipi di circolazione carsica, in stretta dipendenza con le unità litologiche e con la presenza o meno di livelli scarsamente permeabili. I sistemi idrogeologici interessati da carsismo in Lombardia sono molteplici: sono noti e studiati in particolare quelli delle Prealpi Varesine (Campo dei Fiori), di quelle Comasche (Piano del Tivano), Lecchesi (Grigne), Bergamasche (Sistema della Fonte Nossana) e Bresciane (Altipiano della Maddalena). Sistemi più localizzati ma di grande interesse per la geomorfologia e l'idrogeologia sono anche quelli della Provincia di

ABSTRACT

At the present time the data regarding the behaviour of the main Lombard hydrogeological basins do not seem to be enough in order to deal with their management in a detailed manner, especially as regards to the recent gradual drying up of many springs, low discharge during dry months and perennial springs becoming seasonal that were reported all across the Italian Alps and Prealps; it's thus seemed useful to propose at first an arrangement of the dynamics of the Lombard hydrogeological systems based on the existing knowledge of some parameters which allow to classify their behaviour. To this aim, without enough data for a complete mathematical modelling, the relationships between the springs discharges and the recharge are proposed to be defined through a simplified approach, based on an analytic elementary model able to quantify the groundwater flow in a multi-aquifer system knowing its permeability. The comparison of the results obtained in this way with the conclusions obtained with the use of more complex mathematical models has yielded encouraging hints for the time being, especially with reference to the possibility of forecasting water resources shortages, as they will probably become more and more frequent in the future, both for the overexploitation of the groundwater resources and chiefly for climatic changes.

KEYWORDS: karst system, depletion coefficient, mathematical model

PREFACE

The construction of many underground works and of huge barrages, meant to create artificial reservoirs has provided a large amount data set on water circulation in fractured aquifer also on the Lombard territory, where different types of karstic circulation are found, closely depending on lithological units and on the presence or not of poorly pervious layers. The hydrogeological systems involved by karstification in Lombardy are multiple. In particular the following ones are well known and currently studied: the systems of the Prealps of Varese ("Campo dei Fiori"), of Como ("Piano del Tivano"), of Lecco (Grigne), of Bergamo (system of the Nossana spring) and of Brescia ("Altipiano della Maddalena"). The systems of Sondrio Province, typically alpine, are more localized but still of

Sondrio, tipicamente alpini: in particolare quelli del Bormiese (Fonti dell'Adda) e della Valfurva. I sistemi carsici lombardi hanno la peculiarità di essere costituiti solitamente da più di un acquifero, differenziandosi quindi dai sistemi monostrato ai quali applicare la relazione di MAILLET (1906) e quelle da essa derivate.

L'idrodinamica degli acquiferi lombardi è di conseguenza caratterizzata da un comportamento complesso, nei confronti non solo della produttività, ma anche del tempo di risposta alle precipitazioni e della curva di deflusso annuale; quest'ultima presenta alcune caratteristiche che appare di un certo interesse rilevare.

Attualmente i dati relativi al comportamento dei principali bacini idrogeologici lombardi non appaiono sufficienti per affrontare in modo dettagliato la loro gestione, soprattutto alla luce dei sempre più attuali problemi di riduzione (se non in alcuni casi addirittura estinzione) registrati in molte sorgenti; è quindi apparso utile presentare un primo inquadramento della dinamica dei sistemi idrogeologici lombardi alla luce di alcuni parametri che permettano di classificarne il comportamento sulla base delle conoscenze esistenti. A tale fine, in assenza di dati sufficienti per una completa modellazione matematica, si propone di definire le relazioni fra la portata delle sorgenti e l'alimentazione tramite un approccio semplificato, basato su un modello elementare in grado di quantificare il flusso in un sistema multiacquifero conoscendo la sua permeabilità; il confronto dei risultati così ottenuti con le conclusioni desunte da più complessi modelli matematici ha fornito, per il momento, incoraggianti indicazioni, in particolare in relazione alla possibilità di prevedere periodi di crisi idrica, destinati a diventare sempre più frequenti a causa sia del sovrasfruttamento sia soprattutto dei cambiamenti climatici.

LA PRODUTTIVITÀ DELLE UNITÀ IDROGEOLOGICHE LOMBARDE

Non esiste al momento una valutazione documentata della resa delle diverse unità geologiche che compongono il territorio regionale. Una prima indicazione su tali aspetti, basata sui dati attualmente esistenti sulle diverse unità geologiche che compongono la serie idrogeologica lombarda, le cui unità sono state sinteticamente rappresentate da BERETTA (1986) come riportato nella Figura 1, permette di osservare una ben differenziata produttività in base alla portata media annua delle sorgenti per km² di bacino idrogeologico (portata specifica).

Nonostante l'assenza di una base di dati sufficiente per un'oggettiva classificazione, si può notare che le unità più produttive risultano il Calcere di Esino, la Dolomia Principale, il Calcere di Breno e la Corna Bresciana, che forniscono anche fra 100 e 50 l/s/km².

D'importanza relativa altrettanto elevata risultano le unità giurassiche (in particolare il Calcere di Moltrasio associato con il Calcere di Sedrina e la Corna Bresciana) con portate specifiche fra i 50 e i 20 l/s/km². Le altre unità hanno in generale produttività largamente inferiore. Si osserva infatti che la presenza, anche saltuaria, di livelli poco permeabili determina una rapida decrescita della

great interest for the geomorphology and hydrogeology: in particular the ones of Bormio area (Adda springs) and of Valfurva are noteworthy. The Lombard karstic systems is typically a multiaquifer system, thus being different from the monolayer systems to which the MAILLET formula (1906) and the ones derived from it are applied.

The hydrodynamic of the Lombard aquifers is therefore characterized by a complex behaviour, with respect to not only the productivity, but also to the response time to the precipitations and to the annual run-off curve, which present some characteristics that seem to be worth point out.

At the present time the data regarding the behaviour of the main Lombard hydrogeological basins do not seem to be enough in order to deal with their management in a detailed manner, especially as regards to the recent gradual drying up of many springs, low discharge during dry months and perennial springs becoming seasonal that were reported all across the Italian Alps and Prealps; it's thus seemed useful to propose at first an arrangement of the dynamics of the Lombard hydrogeological systems based on the existing knowledge of some parameters which allow to classify their behaviour. To this aim, without enough data for a complete mathematical modelling, the relationships between the springs discharge and the recharge are proposed to be defined through a simplified approach, based on a elementary model able to quantify the groundwater flow in a multiaquifer system knowing its permeability. The comparison of the results obtained in this way with the conclusions obtained with the use of more complex mathematical models has yielded encouraging hints, especially with reference to the possibility of forecasting water resources shortages, as they will probably become more and more frequent in the future, both for the overdraft of the groundwater resources and chiefly for climatic changes.

PRODUCTIVITY OF THE LOMBARD HYDROGEOLOGICAL UNITS

At present there isn't any detailed evaluation regarding the yield of the different geological units of Lombardy. The first information concerning these aspects, based on data existing at the present time on the different geological units of the Lombard hydrogeological series (the units was synthetically represented by BERETTA as shown in Figure 1), enables to observe a well differentiated productivity in term of the annual average discharge of the springs per km² of the hydrogeological basin (specific discharge).

Notwithstanding the absence of an adequate data base for an objective classification, it can be noted that the most productive units turn out to be the Esino Limestone, the "Dolomia Principale", the Breno Limestone and the "Corna Bresciana", which supply between 100 and 50 l/s/km².

The Jurassic units are of a comparable importance (in particular the Limestone from Moltrasio associated with the Sedrina Limestone and "Corna Bresciana"), with specific discharges between 50 and 20 l/s/km². In general the other units have a much lower productivity. The presence, even sporadic, of nearly impermeable layers is

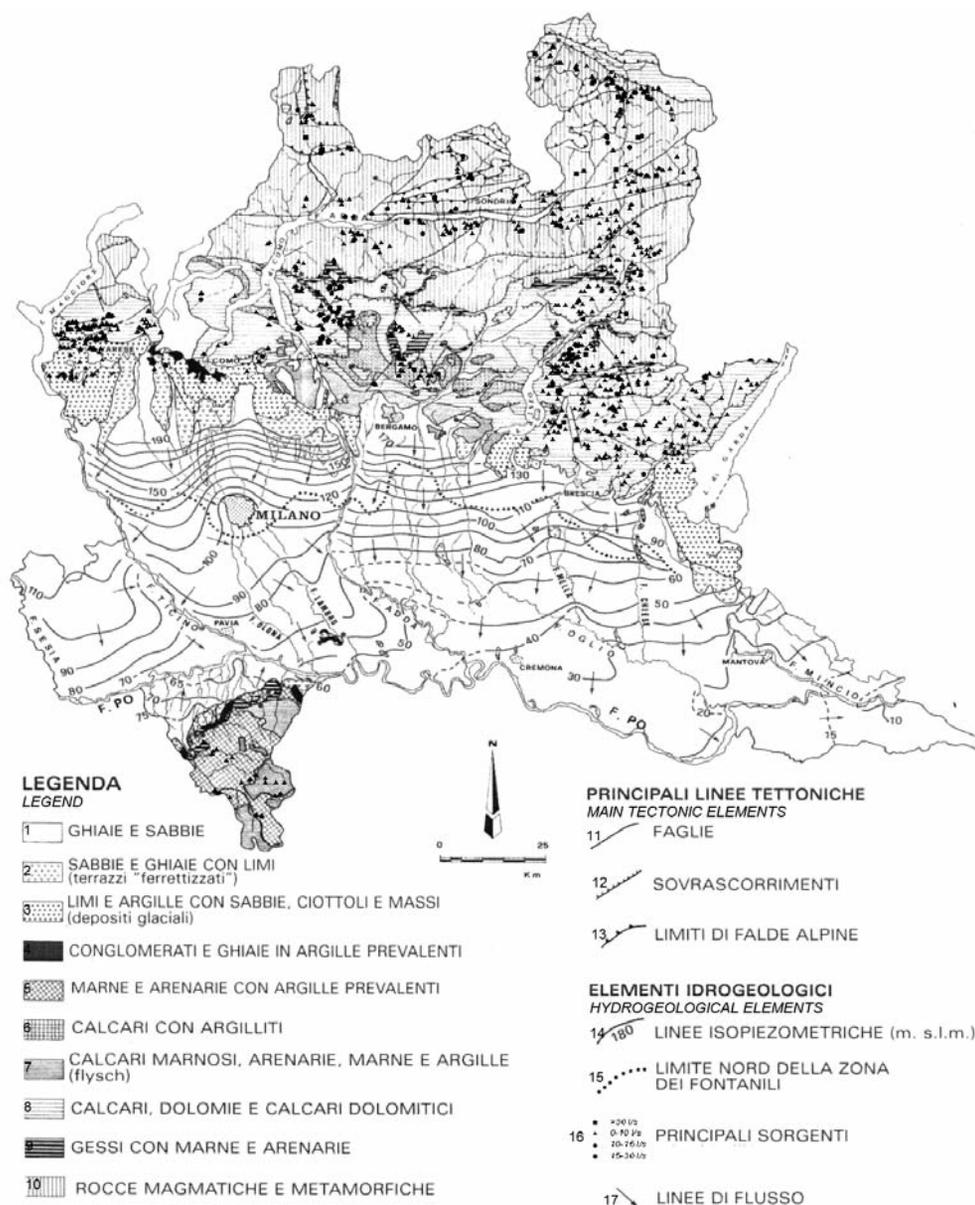


Fig. 1 - Carta idrogeologica schematica della Lombardia, con ubicazione delle sorgenti classificate in funzione della loro portata media (da BERETTA, 1986, mod.)
- Schematic hydrogeological map of Lombardy. The location of the springs, classified in relation to their discharge, is shown (from BERETTA, 1986, mod.)
Legend: 1 = gravel and sand, 2 = sand and gravel with silt, 3 = silt and clay with sand and cobbles, 4 = conglomerate and gravel with clay, 5 = marl and sandstone with clay, 6 = limestone with clay, 7 = marl limestone, sandstone and clay, 8 = limestone and dolomite, 9 = gypsum with marl and sandstone, 10 = magmatic and metamorphic rock, 11 = fault, 12 = overthrust, 13 = alpine nappe boundary, 14 = isopiezometric line, 15 = northern boundary of depression spring zone, 16 = main springs classified in relation to their discharge, 17 = groundwater flow line

portata specifica.

Fra le unità che hanno minore produttività sono sicuramente i flysch, alcuni dei quali forniscono solo eccezionalmente portate superiori a 1 l/s/km², ad esempio: Flysch di Bergamo, Conglomerato di Sirone, Arenarie di Sarnico: 33-45 l/s/km², Flysch di Pontida da 3 a 21 l/s/km², Marne e Peliti 4,5 l/s/km². Sono rare le unità formazionali clastiche caratterizzate da una maggiore resa: fra esse si possono trovare conglomerati calcarei localmente presenti nel Flysch di

observed to determine a fast decrease of the specific discharge.

The flysch is undoubtedly one of the units which has the minor productivity, supplying only extraordinarily discharges higher than 1 l/s/km². For instance: Flysch from Bergamo, Sirone Conglomerate, Sarnico Sandstones: 33-45 l/s/km², Flysch from Pontida from 3 to 21 l/s/km², Marls e Pelites 4,5 l/s/km². The formation units characterized by a higher yield are scarce: the calcareous conglomerate can be found among them, locally occurring in the

Bergamo ("Lecchetto", della parte occidentale della Provincia di Bergamo) con una produttività superiore anche di dieci volte rispetto alla parte restante della formazione.

ANDAMENTO DELLA CURVA DI DEFLUSSO DELLE SORGENTI

Il coefficiente d'esaurimento

Dal punto di vista del comportamento nel tempo delle portate, il coefficiente di esaurimento rappresenta in modo significativo il regime di flusso non perturbato e può quindi essere utilizzato per una classificazione dei sistemi carsici in base al comportamento idrodinamico. Come è noto, nei periodi non piovosi la portata delle sorgenti deriva dal drenaggio dell'acqua immagazzinata all'interno dei condotti carsici e può essere approssimata con una curva esponenziale negativa (MAILLET, 1906), che si estende dal cosiddetto "tempo di esaurimento" all'inizio di una nuova fase di crescita del deflusso:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \tag{1}$$

dove Q_t è la portata al generico tempo t , Q_0 la portata al "tempo di esaurimento" (cioè il tempo necessario, dal raggiungimento della portata al colmo, per lo svuotamento dei canali di conduzione dell'infiltrazione nell'insaturo, il dissiparsi del quick-flow e l'instaurarsi di un regime di deflusso della sorgente controllato solo dal flusso di base); α è il coefficiente di recessione [T^{-1}], cioè un indice della diminuzione del deflusso in un periodo di assenza di fusione nivale e di ricarica:

$$\alpha = Q_{t+1} / Q_t \quad \text{con} \quad 0 < \alpha < 1 \tag{2}$$

essendo Q_{t+1} e Q_t le portate in due istanti di tempo successivi.

Il regime delle sorgenti in fase di esaurimento è noto da oltre un secolo. E' facile infatti osservare una differenza sostanziale nella relazione portata-tempi durante la fase di recessione: una prima parte della curva molto ripida (curva di decremento), legata al rapido svuotamento dei condotti carsici ad alta permeabilità, una seconda parte della curva a più debole pendenza (curva di esaurimento s.s.) legata al lento svuotamento delle fratture a bassa permeabilità. Questa variazione nel rapporto portate-tempi può essere stimata valutando la dualità dell'infiltrazione, dell'immagazzinamento e del flusso sotterraneo (HOBBS & SMART, 1986). Infatti, in presenza di un flusso diffuso la risposta alla precipitazione non è più rapida, ma è caratterizzata da una lenta crescita, dovuta alle varie alternative di percorsi di flusso nel complesso sistema di fratture, legato ai differenti tempi di arrivo dell'acqua alla sorgente; in tal caso, anche la decrescita diventa più lenta.

La curva di recessione è quindi rappresentabile, più correttamente, tramite una sommatoria di funzioni esponenziali (FORKASIEWICZ & PALOC, 1967):

$$Q_t = \sum Q_{0i} e^{-\alpha_i t} \tag{3}$$

dove i è il numero della generica esponenziale e α_i i coefficienti di esaurimento per ogni esponenziale. L'esponenziale con il più alto

Flysch from Bergamo ("Lecchetto", from the western part of Bergamo Province), with a productivity even ten times higher than the remaining part of the formation.

TREND OF SPRING DISCHARGE

The depletion coefficient

As far as the trend of the discharges through time is concerned, the depletion coefficient represents the not perturbed flow regime in the most comprehensive way and thus it can be used for a ranking of the karstic systems according to the hydrodynamics behaviour. It is well known that in the dry periods the springs discharge comes from the drainage of the water stored within the karstic pipes and it can be approximated with a negative exponential curve (MAILLET, 1906), which extends from the so-called "depletion time" to the beginning of a new phase of increasing outflow:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \tag{1}$$

where Q_t is the discharge at the generic time t , Q_0 is the discharge at the "depletion time" (that is the time necessary, starting from the peak discharge, for the emptying out of the recharge pipes in the vadose zone, the dispersing of the quick-flow and the starting of a flow regime controlled only by the base-flow); α is the recession coefficient [T^{-1}], i.e. an index of the decreasing outflow in a period with no active recharge occurring (snow melting and rainfall):

$$\alpha = Q_{t+1} / Q_t \quad \text{con} \quad 0 < \alpha < 1 \tag{2}$$

where Q_{t+1} and Q_t are the discharges in two consecutive times.

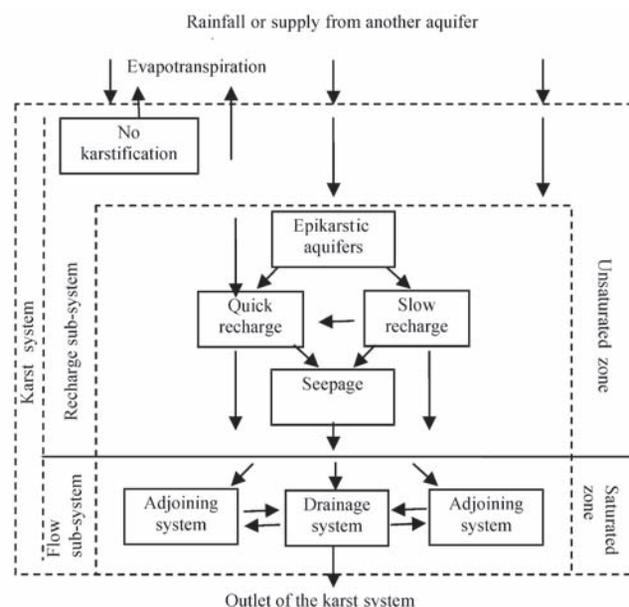
The regime of the springs which are undergoing depletion is well-known since more than one century. It's actually easy to observe a substantial difference in the time-discharge relationship during the recession phase: the first part of the curve is very steep (decreasing curve), due to the swift draining of the high permeability karstic pipes, while the second part of the curve is more slightly sloping (depletion curve) connected to the low permeability slow draining fractures. This variation in the time-discharge relationship can be assessed taking into account the duality of seepage, storage and underground flow (HOBBS & SMART, 1986). As a matter of fact, the response to rainfall with a diffused flow is not swift anymore but it's marked by a slow increase, due to the various flow paths alternatives in the complex fractures system, connected to the different arrival times of water to the springs; in this case, the decrease gets slower as well.

Therefore the recession curve can be represented more properly by means of a summation of exponential functions (FORKASIEWICZ & PALOC, 1967):

$$Q_t = \sum Q_{0i} e^{-\alpha_i t} \tag{3}$$

where i is the number of the generic exponential function and α_i is the depletion coefficient for every exponential function. The exponential

Fig. 2 - Schema dell'idrodinamica carsica secondo Mangin (da MANGIN, 1975, modificato)
 - Karstic hydrodynamics scheme according to Mangin (from MANGIN, 1975, modified)



coefficiente di recessione rappresenta il rapido svuotamento dei condotti carsici, mentre quello con il minore coefficiente di esaurimento indica il flusso di base, dovuto allo svuotamento della rete di fratture a bassa permeabilità e legato alla geometria della rete di condotti.

Il modello di MANGIN (1975) intende rappresentare tutta la curva di svuotamento e non solo l'esaurimento come quello di Maillet; a questo scopo prende in considerazione altri elementi caratterizzanti la curva di esaurimento, quali il coefficiente di velocità di infiltrazione η , reciproco del tempo di esaurimento, e quello di eterogeneità del deflusso $\epsilon [T^{-1}]$, che aiutano a descrivere in modo più completo la tipologia idrodinamica del sistema carsico (Fig. 2).

Particolare significatività ha l'evidenza data da Mangin ai sistemi annessi al condotto principale.

Fattori idrogeologici e climatici che condizionano la forma della curva di esaurimento

L'andamento della curva di esaurimento e quindi la portata minima raggiunta dalla sorgente in periodo di secca dipendono dai seguenti fattori:

- la portata iniziale: se si sono avute precipitazioni molto intense in fase di ricarica, la curva di esaurimento appare più ripida, mentre, se le precipitazioni sono state scarse, la curva di esaurimento appare meno pendente;
- le caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero: in particolare lo spessore dell'acquifero, la porosità efficace e la permeabilità.

Si sottolinea che la valutazione della permeabilità negli ammassi carsici e fratturati è fortemente influenzata dalla scala su cui si effettuano le misure: se si fanno prove su un piccolo campione la permeabilità può risultare bassa, mentre facendo una media sull'intero bacino si possono avere incrementi anche di 5000 volte (KIRALY, 2003) e ciò è dovuto al fatto che la prova potrebbe essere effettuata

function with the highest recession coefficient represents the swift draining of the karstic pipes, while the one with the smaller depletion coefficient concerns the basic flow, due to the draining of the low permeability fractures net and connected to the geometry of the pipes net.

The MANGIN's model (1975) means to represent the whole emptying out curve and not only the depletion curve, like the Maillet's model does; at this aim it takes into account conveniently other elements characterizing the depletion curve, as the seepage coefficient η , that is the reciprocal of the depletion coefficient, and the outflow heterogeneity coefficient $\epsilon [T^{-1}]$, which help in describing the karstic system hydrodynamics typology in a more detailed way (Fig. 2).

The evidence given by Mangin to the importance of the systems adjoining to the main pipeline is noteworthy.

Hydrogeological and climatic factors which affect the shape of the depletion curve

The shape of depletion curve and consequently the minimum discharge reached by the spring during the dry period is affected by the following factors:

- the initial discharge: if the recharge phase has experienced greatly heavy rainfall, the depletion curve seems to be steeper, while, if the rainfall has been meagre, the depletion curve seems to be less steep;
- the hydrogeological characteristics of the aquifer: in particular aquifer thickness, effective porosity and permeability.

One aspect worth being highlighted is that permeability evaluation in the karstic and fractured masses is strongly affected by the scale by which the measurements are made: if the tests are made on a small specimen, the permeability can be low, while, making an average on the whole basin, it's possible to obtain increases of 5000 times (KIRALY, 2003) and this is due to the fact that the test might be

su un campione nel quale non sono presenti discontinuità o condotti carsici. Assume quindi di fondamentale importanza la definizione del "volume rappresentativo elementare" VRE, cioè il volume minimo da prendere in considerazione per studiare le caratteristiche idrogeologiche del mezzo; tale VRE deve contenere ovviamente tutte le famiglie di discontinuità e quindi variare, in funzione dello stato di fratturazione da 1 m³ a 106 m³.

La permeabilità dipende, inoltre, dal grado di interconnessione delle reti di discontinuità e dalle loro dimensioni.

Un ausilio nella comprensione dei parametri che regolano l'efflusso dalle sorgenti in fase di esaurimento è stato trovato con l'implementazione di modelli matematici rappresentativi delle strutture idrogeologiche in esame. Una volta costruiti i modelli dei bacini interessati, sono state eseguite una serie di simulazioni in regime transitorio variando le condizioni di ricarica del periodo primavera-estate (la stagione di ricarica va da aprile a settembre). Per ciascuna simulazione si è analizzata la risposta della sorgente nel periodo di magra (da novembre a marzo), ricostruendo le relative curve di esaurimento.

Tale analisi ha permesso di osservare che la portata iniziale Q_0 cresce proporzionalmente con la ricarica dei mesi precedenti; inoltre,

carried out on a sample where there are no discontinuities and karstic pipes. Consequently, it is very important to consider the "elementary representative volume" ERV, that is the minimal volume to take into consideration to study the hydrogeological features of a rock, such that the medium can be considered sufficiently homogeneous and isotropic; in a rock mass, the ERV must contain all the different discontinuity families and therefore it can change, according to the fracturing degree, from 1 m³ to 106 m³.

Moreover permeability depends on the interconnection degree of the discontinuities network and on their sizes.

The implementation of mathematical models representative of the hydrogeological structures under exam has been helpful in order to understand the parameters which control the outflow from the springs in the depletion phase. Once the concerned basins models are built, a series of simulations has been carried out in transient state varying the recharge conditions in the spring-summer period (the recharge season begins in April and holds out to September). The spring response has been analyzed in the dry period (from October-November to March) for every simulation, thus rebuilding the relating depletion curves.

This analysis showed that the initial discharge Q_0 increases pro-

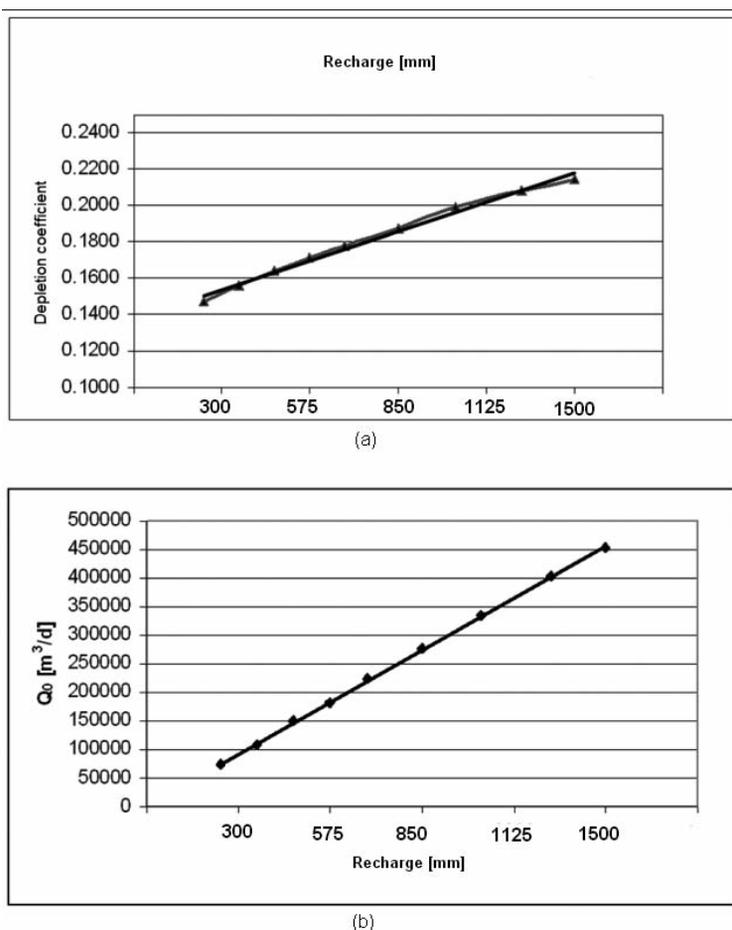


Fig. 3 - Dipendenza dalla ricarica R del periodo antecedente: a) del coefficiente di esaurimento α in regime non perturbato, b) della portata iniziale Q_0
 - Dependency on the previous period recharge R: a) of the depletion coefficient α in not perturbed regime, b) of the initial discharge Q_0

più è elevata la ricarica del periodo precedente maggiore è il tasso di decrescita della portata, il che corrisponde ad un valore del coefficiente di esaurimento più grande. Si è quindi ricostruita la dipendenza del coefficiente di esaurimento dalla ricarica dei mesi precedenti, ottenendo una buona approssimazione lineare (Fig. 3a). Analogamente, anche per la portata iniziale Q_0 è stata ricavata una dipendenza di tipo lineare dalla ricarica dei mesi precedenti (Fig. 3b). La figura è riferita al caso della sorgente Nossana in Provincia di Bergamo.

Si è così ottenuta una relazione tra la portata Q_t in fase di esaurimento della sorgente e la ricarica R avvenuta nei mesi precedenti:

$$Q_t = (181.52R + 2144)e^{(-10^{-6} R - 4.6 \cdot 10^{-3})t} \quad (4)$$

dove Q_t è la portata della sorgente in m^3/s al tempo t (espresso in giorni), mentre R è la ricarica cumulata (mm) nei mesi precedenti.

MODELLO ANALITICO SEMPLIFICATO DELLA RISPOSTA IDRODINAMICA DI SISTEMI COMPLESSI

Peculiarità dei sistemi carsici in Lombardia

La combinazione di livelli impermeabili e di sistemi di discontinuità (stratificazione, diaclasi e zone di frattura) determina un assetto idrogeologico molto differenziato, capace di dare luogo a infinite combinazioni di portate in funzione delle precipitazioni.

La ricerca di un metodo che consenta di definire la portata e il regime delle sorgenti, in base alle conoscenze sui parametri idrogeologici degli ammassi rocciosi, sugli afflussi meteorici e sulla piezometria delle fonti di alimentazione, è stata condotta da molti Autori.

La relazione di Maillet è stata quindi oggetto di attento esame ed è stata migliorata nel tempo da diversi Autori, alcuni dei quali sono stati citati in precedenza (in particolare FORKASIEWICZ & PALOC, 1967 e MANGIN, 1975) e ha portato al generale convincimento della necessità di affrontare il problema tramite la modellazione matematica (es. KIRALY, 2003). Tutti questi studiosi hanno avuto occasione di osservare che la relazione di Maillet è fondata sul presupposto che il corpo idrico alimentante la sorgente sia unico, mentre risulta evidente che in generale ogni sorgente viene alimentata da un ramificato complesso di acquiferi non sempre strettamente collegati fra loro. La complessità del carsismo lombardo in alcuni casi è tale che non appare possibile utilizzare nessuna delle relazioni citate per descrivere la curva di esaurimento e ricavarne indicazioni circa l'idrodinamica del sistema. Peraltro le relazioni che descrivono il flusso in un sistema multiacquifero, come indica KINZELBACH (1986), possono facilmente essere applicate alla costruzione di un modello elementare nel quale, inserendo i valori delle permeabilità dell'acquifero, le incognite risultano costituite dai valori della piezometria. Applicando questo approccio semplificato, è possibile ricavare alcune indicazioni utili all'interpretazione dell'idrodinamica anche in casi complessi come quello di alcuni sistemi lombardi, senza dover ricorrere a una completa modellazione matematica.

portionalmente con la ricarica dei mesi precedenti; inoltre, il rapporto di esaurimento è inversamente proporzionale alla ricarica del periodo precedente: quanto maggiore è la ricarica del periodo precedente, tanto minore è il rapporto di esaurimento. La dipendenza del coefficiente di esaurimento dalla ricarica dei mesi precedenti ha così potuto essere ricostruita, ottenendo una buona approssimazione lineare (Fig. 3a). Analogamente, anche per la portata iniziale Q_0 è stata ricavata una dipendenza di tipo lineare dalla ricarica dei mesi precedenti (Fig. 3b). La figura è riferita al caso della sorgente Nossana in Provincia di Bergamo.

Una relazione tra la portata Q_t in fase di esaurimento della sorgente e la ricarica R avvenuta nei mesi precedenti ha così potuto essere ottenuta:

$$Q_t = (181.52R + 2144)e^{(-10^{-6} R - 4.6 \cdot 10^{-3})t} \quad (4)$$

dove Q_t è la portata della sorgente in m^3/s al tempo t (espresso in giorni), mentre R è la ricarica cumulata (mm) nei mesi precedenti.

SIMPLIFIED ANALYTICAL MODEL OF THE HYDRODYNAMIC RESPONSE OF COMPLEX SYSTEMS

Characteristic aspects of karst systems in Lombardy

L'arrangiamento di livelli impermeabili e di discontinuità (stratificazione, diaclasi e zone di frattura) determina un assetto idrogeologico molto differenziato, capace di dare luogo a infinite combinazioni di portate in funzione delle precipitazioni.

La ricerca di un metodo che consenta di definire la portata e il regime delle sorgenti, in base alle conoscenze sui parametri idrogeologici degli ammassi rocciosi, sugli afflussi meteorici e sulla piezometria delle fonti di alimentazione, è stata condotta da molti Autori.

La relazione di Maillet è stata quindi oggetto di attento esame ed è stata migliorata nel tempo da diversi Autori, alcuni dei quali sono stati citati in precedenza (in particolare FORKASIEWICZ & PALOC, 1967 e MANGIN, 1975) e ha portato al generale convincimento della necessità di affrontare il problema tramite la modellazione matematica (es. KIRALY, 2003). Tutti questi studiosi hanno avuto occasione di osservare che la relazione di Maillet è fondata sul presupposto che il corpo idrico alimentante la sorgente sia unico, mentre risulta evidente che in generale ogni sorgente viene alimentata da un ramificato complesso di acquiferi non sempre strettamente collegati fra loro. La complessità del carsismo lombardo in alcuni casi è tale che non appare possibile utilizzare nessuna delle relazioni citate per descrivere la curva di esaurimento e ricavarne indicazioni circa l'idrodinamica del sistema. Peraltro le relazioni che descrivono il flusso in un sistema multiacquifero, come indica KINZELBACH (1986), possono facilmente essere applicate alla costruzione di un modello elementare nel quale, inserendo i valori delle permeabilità dell'acquifero, le incognite risultano costituite dai valori della piezometria. Applicando questo approccio semplificato, è possibile ricavare alcune indicazioni utili all'interpretazione dell'idrodinamica anche in casi complessi come quello di alcuni sistemi lombardi, senza dover ricorrere a una completa modellazione matematica.

Questo metodo non consente una soddisfacente determinazione delle portate delle sorgenti, ma solo una loro approssimativa ricostruzione.

Questo metodo non permette una soddisfacente determinazione delle portate delle sorgenti, ma solo di avere un quadro approssimato dell'idrodinamica del sistema carsico, il che rappresenta comunque un passo fondamentale d'indubbia utilità.

Il sistema carsico tipico delle aree lombarde risulta infatti generalmente formato da un acquifero superficiale, che scorre entro i livelli più alterati prossimi al piano-campagna e che comunica, tramite le discontinuità primarie e secondarie della roccia, con le emergenze puntuali e lineari, e spesso anche con acquiferi più profondi. A differenza dei sistemi classici costituiti da un monostrato, il carsismo lombardo interessa spesso più formazioni, ciascuna delle quali costituisce un acquifero con comportamento distinto dagli altri, dai quali è spesso separato da unità poco permeabili.

Generalmente l'alimentazione al sistema perviene dall'infiltrazione efficace di precipitazioni, fusione di nevi e da perdite di corsi d'acqua, distribuite a diverse altezze. In generale prevalgono le infiltrazioni dirette da doline o campi carsici nella parte alta dei bacini, in specie dove siano presenti antiche conche glaciali o superfici di erosione. Sono tuttavia presenti anche casi di infiltrazioni da bacini lacustri (alto bacino del F. Adda presso Bormio), mentre quelle provenienti dalle perdite dagli alvei torrentizi, anche se difficilmente quantizzabili, appaiono concentrate nella parte alta dei bacini e in quella mediana.

Il recapito di questi sistemi è generalmente costituito da sorgenti puntuali o da gruppi di sorgenti poste a mezza costa o alla base dei versanti, da corsi d'acqua e da corpi idrici superficiali come conche lacustri. Dalle Prealpi Bresciane proviene inoltre un evidente contributo alle acque di falda che scorrono in pianura.

L'approccio semplificato proposto

Per descrivere questo approccio, si può ipotizzare che il sistema sia costituito, oltre che dall'epicarso, che recapita a una sorgente, da un solo acquifero profondo, a sua volta recapitante a una emergenza. Il sistema idrogeologico prevede una rete di nodi che, sulla verticale, è riprodotto schematicamente nella Figura 4. I valori piezometrici della fonte di alimentazione H e quelli dell'infiltrazione R (misurata in m/s) variano nel tempo e di conseguenza variano i valori delle portate ai recapiti superficiale D_s e profondo D_p (generalmente a livello piezometrico costante) e i valori piezometrici del campo di flusso esaminato (h_0, h_1, h_2, h_3).

Il sistema descritto risulta fundamentalmente costituito (come nei casi del bacino del Fiumelatte e della Fonte Nossana) da un acquifero superficiale e da un acquifero profondo che si connettono fra loro. I due recapiti hanno una portata che risulta funzione della cadente piezometrica e della permeabilità nelle diverse parti degli acquiferi e risentono dell'alimentazione per infiltrazione e dei livelli piezometrici delle fonti di alimentazione.

Applicando l'approccio di Kinzelbach alle relazioni fondamentali della circolazione idrica sotterranea, è possibile analizzare un sistema a permeabilità variabile identificando i valori della permeabilità media delle diverse porzioni di acquifero e la lunghezza dei tratti di acquifero ai quali questi valori competono, per arrivare a

of the karstic system hydrodynamics, which anyway represents a basic step of undoubted usefulness.

In general the typical karstic system of the Lombard areas turns out to be actually constituted by a surface aquifer, which flows between the most weathered layers close to the ground surface and which communicates through the rock primary and secondary discontinuities with the punctual and linear emergences and often also with the deeper aquifers. Unlike the classical systems constituted by a monolayer, the Lombard karstification often involves more than one formation, each of whose makes up an aquifer with a different behaviour from the others, from which it's often separated by poorly permeable units.

Generally the system is fed by rainfall recharge, by snow melt and by rivers leakages, distributed at different heights. The direct infiltrations from sinkholes or from karstic fields in the high part of the basins generally prevail, especially where ancient glacial basins or erosion surfaces are located. However there are as well cases of seepages from lacustrine basins (high basin of Adda river near Bormio), while the ones coming from the leakages of the torrential riverbeds, even though hardly quantifiable, seem to be concentrated in the high and medium parts of the basins.

The outlet of these systems is generally either given by punctual springs or by groups of springs located at half hillside or at the foothills, by rivers and by surface water bodies as lacustrine basins. Moreover a conspicuous contribution to the aquifer waters which flow in the unconsolidated sediments of alluvial plain comes from the Prealps of Brescia.

The proposed simplified approach

In order to describe this approach, we can assume that the system is made up, beyond the epikarst, which lets out water to a spring, by only one deep aquifer, at its turn letting out water to a surface resource. The hydrogeological system involves a knots net which, on the vertical axis, is depicted in outline in Fig. 4. The piezometric values of the feeding spring H and the ones of seepage R (measured in m/s) change with time and, as a consequence, the values of the discharges to the outlets surface D_s and deep D_p (generally at a constant piezometric level) and the piezometric values of the flow field studied (h_0, h_1, h_2, h_3) change as well.

Applying the Kinzelbach approach to underground water circulation basic relationships, it's possible to analyze a variable permeability system identifying:

- the values of average permeability of the aquifer in different zones;
- the extension of the aquifer zones to which these values are related;
- an approximate assessment of the outlets discharges through the solution of linear equations systems.

As for the peculiarities of the Lombard hydrogeological system, the approach proposed by Kinzelbach is observed to be suitable to these situations. The permeability of the heterogeneous aquifer, divided in stretches of length L_i is easily computable from the ratio

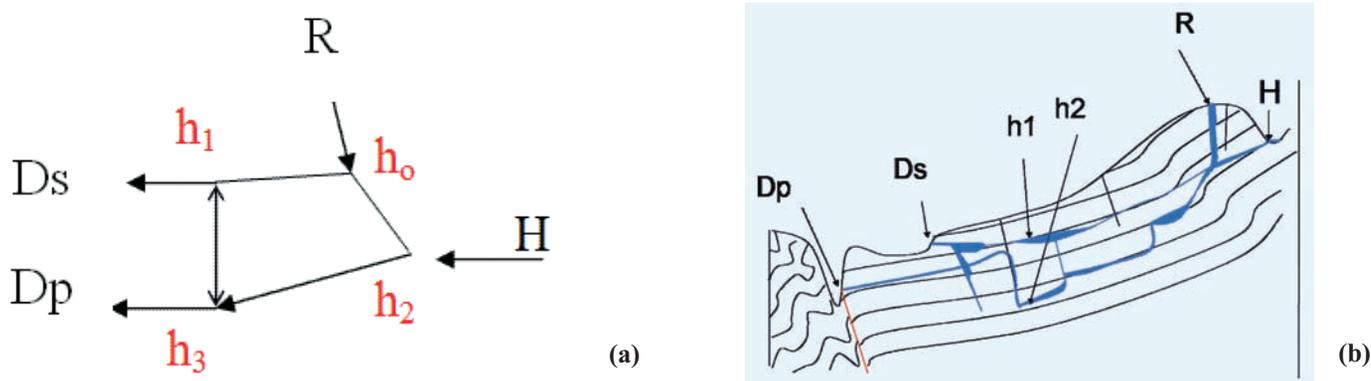


Fig. 4 - Rappresentazione sintetica (a) e relativo modello concettuale (b) di un sistema carsico dotato di due fonti di alimentazione: l'infiltrazione R e un corpo idrico superficiale H. Ds e Dp sono il recapito rispettivamente superficiale e profondo, mentre h₀, h₁, h₂ e h₃ sono i livelli piezometrici
 - Synthetic representation (a) and relevant conceptual model (b) of a karstic system having two feeding springs: the seepage R and one superficial water body H. Ds and Dp are the outlets respectively surface and deep, whereas h₀, h₁, h₂ and h₃ are piezometric levels

un'approssimata valutazione delle portate dei recapiti tramite la soluzione di sistemi di equazioni lineari.

Per quanto riguarda le peculiarità del sistema idrogeologico lombardo, si osserva che l'approccio suggerito da Kinzelbach può essere adattato a queste realtà. La permeabilità dell'acquifero eterogeneo, suddiviso in tratti di lunghezza L_i, è facilmente calcolabile dal rapporto fra la lunghezza totale L dell'acquifero considerato, diviso per la sommatoria dei rapporti fra le lunghezze L_i dei diversi tratti e i rispettivi valori di permeabilità media K_i, il cui prodotto per lo spessore dell'acquifero b_i dà la sua trasmissività equivalente T_i.

I valori delle permeabilità sono derivabili dalla geometria delle discontinuità, utilizzando una delle note relazioni (ad esempio la nota "cubic law" di WITHERSPOON & GALE, 1980), a integrazione delle prove in sito.

Risulta di un certo interesse notare che da questa analisi possono essere derivati i valori delle portate in fase di esaurimento dei recapiti, in funzione delle permeabilità e dei coefficienti di immagazzinamento S delle varie parti dell'acquifero.

Dal testo di KINZELBACH (1986) si hanno le indicazioni per la soluzione di tali problemi applicando modelli che prevedono una suddivisione dell'acquifero in prismi retti della medesima superficie A e diversi valori di permeabilità K e trasmissività T.

Procedendo con opportune sostituzioni nelle relazioni descritte da Kinzelbach, si può infatti verificare che il livello piezometrico in una porzione del sistema acquifero, al tempo t in secondi dall'inizio dell'infiltrazione R, è dato dalla relazione:

$$h'_0 = [\sum T_{i0} h_i / A + R / A + S / \Delta t] / (S / \Delta t + \sum T_{i0} / A) \quad (5)$$

in cui h'₀ rappresenta il valore del livello piezometrico acquisito dal punto centrale della porzione in esame dell'acquifero dopo un intervallo di tempo t, all'inizio del quale il livello piezometrico è h_i, R il valore della ricarica, S quello del coefficiente di immagazzinamento T_{0i} la trasmissività della porzione di acquifero considerata e A la sua superficie di base. Fra i valori di h_i vanno compresi anche quelli

between the total length L of the studied aquifer divided by the summation of the ratios between the lengths L_i of the different stretches and the relative average permeability values K_i, whose product times the aquifer thickness b_i gives the equivalent transmissivity T_i.

The system described is basically constituted (as in the cases of the Fiumelatte basin and Nossana Spring) by a surface aquifer and by a deep one which are connected between each others. The two outlets have a discharge which turns out to be a function of pressure head and of permeability in the different parts of the aquifers and they are affected by the feeding via seepage and by the piezometric levels of the feeding surface water body.

The permeability values can be derived from the discontinuities geometry, using one of the well-known relationships (for instance, the well-known "cubic law" by WITHERSPOON & GALE, 1980), in order to integrate the on site tests.

It's interesting to underline that the discharge values in the outlets depletion phase can be derived from this analysis, in function of the permeability and of the storativity S of the different parts of the aquifer.

The KINZELBACH manuscript (1986) is a good guide for the solution of this kind of problems, that is applying models which entail the aquifer subdivision in square prisms of the same surface A and of different values of permeability K and transmissivity T.

Making the proper substitutions in the relationships described by Kinzelbach, it's possible to verify that the piezometric level in a portion of the aquifer system, at time t [s] since the seepage F beginning, is given by the following formula:

$$h'_0 = [\sum T_{i0} h_i / A + R / A + S / \Delta t] / (S / \Delta t + \sum T_{i0} / A) \quad (5)$$

where h'₀ is the piezometric level in a central point of the aquifer domain under exam after a time interval equal to t, at the beginning of which the piezometric level is h_i, R is the recharge, S the storativity, T_{0i} the transmissivity of the considered aquifer domain and A its base area. The values h_i include the ones of the intake area and outlets, too.

delle fonti di alimentazione e di recapito.

La relazione (5), quando viene applicata alla fase di esaurimento, permette di ricavare il livello piezometrico di un settore dell'acquifero quando sia nota la funzione che lega l'abbassamento del livello nella zona di alimentazione H al tempo t dall'inizio dell'esaurimento. Ipotizzando che questa relazione, ricavabile con il monitoraggio della zona di alimentazione che consente di determinarne il coefficiente di esaurimento, sia quella generale di Maillet:

$$h_t = h_0 e^{-\alpha t} \quad (6)$$

si può procedere sostituendo questo valore nella relazione (5) e ponendo pari a zero l'infiltrazione efficace R; si ottiene così il valore di h'₀ al tempo t dall'inizio dell'esaurimento.

Dalle piezometrie dei diversi nodi del sistema, si possono ricavare facilmente le portate circolanti in esso. Sulla base delle osservazioni svolte, si è ritenuto utile verificare l'adattabilità delle relazioni descritte allo studio delle maggiori sorgenti lombarde, ricavando una buona corrispondenza dei valori delle portate dei recapiti previste con il modello, come riportato nella Figura 5, dove sono rappresentati i valori delle portate di esaurimento della sorgente Nossana in condizioni di diversa piovosità, che dimostrano una buona corrispondenza con i valori realmente osservati.

Altrettanto utile appare questa metodologia per la verifica degli scambi fra le porzioni superficiali dell'acquifero e quelle più profonde, che sono di particolare interesse per tutte le attività di gestione dei corpi idrici, fino a diventare essenziali nel caso in cui i progetti di opere in sotterraneo devono essere analizzati al fine di verificarne la compatibilità con le condizioni idrogeologiche. Le gallerie ad esempio, possono produrre un aumento di permeabilità dell'ammasso roccioso che può ridurre anche in maniera importante le sue disponibilità idriche.

Prima verifica dell'approccio semplificato

Al fine di realizzare una corretta valutazione dell'idoneità dell'approccio semplificato proposto, sono stati esaminati i risultati conseguiti con la modellazione matematica dei più importanti sistemi carsici lombardi (Fiumelatte e Fonte Nossana) e delle unità del

Relationship (5), when applied to the depletion phase, allows to get the piezometric level of an aquifer sector when the function which links the level drawdown of the intake source H to the time t since the depletion beginning is known. Assuming that this relationship, obtainable with the intake zone monitoring which enables to determine the depletion coefficient, is the general one by Maillet:

$$h_t = h_0 e^{-\alpha t} \quad (6)$$

this value can then be substituted in relationship (5) and, assuming equal to zero the effective seepage R, the value h'₀ can be obtained at time t from the depletion beginning.

The recharges circulating in the system can be easily obtained from the piezometry of the various knots belonging to the system. On the basis of the performed observations, the described relationships adaptability to the study of the major Lombard springs has been believed useful to be verified, gaining a good correspondence of the outlets discharges values calculated with the model, as shown in Figure 5, where the depletion discharges values of Nossana spring are represented in condition of different rainfall, which show a good match with the actually observed values.

This method seems as much to be useful for the check of the exchanges between the aquifer superficial portions and the deeper ones: the exchanges are of particular interest for all the water bodies management activities, to the extent of becoming essential in the case the projects of underground works must be analyzed in order to verify the compatibility with the hydrogeological conditions. The tunnels, for instance, can induce an increase in the rock mass permeability which can reduce as well the water supplies in a significant way.

A first validation of the approach

In order to carry out an accurate evaluation of the suitability of the proposed simplifying approach, the results obtained with the mathematical modelling of the most important Lombard karstic systems (Fiumelatte and Nossana Spring) and of the Flysch units of the

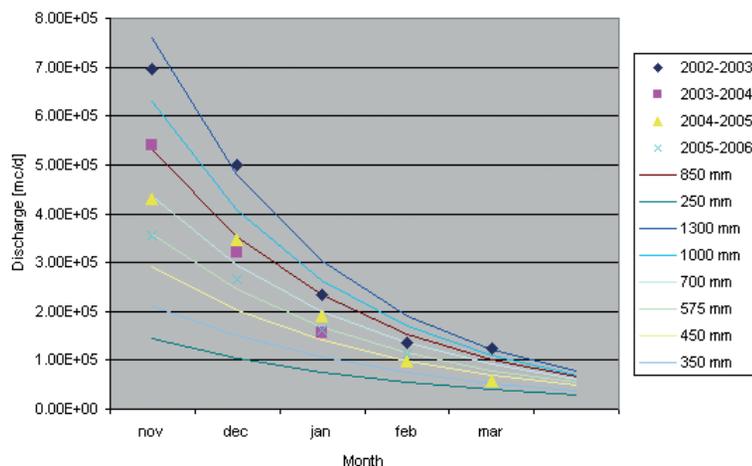


Fig. 5 - Confronto tra le curve di esaurimento simulate al variare della ricarica dei mesi precedenti (le linee continue) e quelle osservate (i punti) per la sorgente Nossana
 - Comparison between the simulated depletion curves (the continuous lines) with different recharges in the previous months and the observed ones (the points)

Flysch delle Prealpi Bergamasche (rispettivamente da CROCI *et alii*, 2003; GATTINONI *et alii*, 2005). Dalla comparazione dei risultati ottenuti tramite la modellazione matematica completa e da quelli ricavati dall'approccio semplificativo qui descritto, risulta con ogni evidenza che il metodo semplificativo può essere impiegato solo per un'approssimazione delle portate medie stagionali delle sorgenti e risulta poco efficace per valutazioni dettagliate. Alcune indicazioni utili possono comunque essere ricavate da questo metodo per avere un'orientamento circa il comportamento del sistema carsico, in quanto permette di tener conto di alcuni elementi fondamentali della struttura idrogeologica.

CASI NEI QUALI SI PUÒ REALIZZARE LO SCAMBIO DALL'ACQUIFERO PROFONDO VERSO QUELLO SUPERFICIALE

Un flusso verso l'alto, determinato dal fatto che il livello piezometrico dell'acquifero profondo supera quello dell'acquifero superficiale (sistema prossimo a quello di tipo vauclosiano), si verifica soprattutto quando le fonti di alimentazione dei due acquiferi si collocano a diverse altitudini.

In questo caso, possiamo constatare che, detto H_{20} il livello di alimentazione del secondo acquifero, si ha flusso dall'acquifero più profondo verso quello superficiale se si verifica la condizione:

$$H_{20} > (h_2 T_{02} + RT_{2R}) / (T_{2R} + T_{02}) \quad (7)$$

Il livello piezometrico dell'acquifero inferiore sorpassa facilmente quello dell'acquifero superiore in modo tanto più evidente quanto minori sono la permeabilità verticale del sistema e la sezione di flusso attraverso la quale avviene lo scambio fra i due acquiferi.

Nel caso in cui siano presenti riserve idriche profonde (Fig. 6), il cui livello piezometrico è tale da consentire al flusso che ne proviene di entrare nel condotto che alimenta le sorgenti, queste formano un sistema annesso che è in grado di drenare gli acquiferi durante le fasi di ricarica quando il livello piezometrico delle riserve è minore e conferire volumi d'acqua anche consistenti agli acquiferi durante le fasi di svuotamento del sistema, quando il livello piezometrico delle riserve può essere superiore a quello degli acquiferi.

Semplificando la rappresentazione del sistema idrogeologico, e

Prealps from Bergamo (respectively by CROCI *et alii*, 2003; GATTINONI *et alii*, 2005) have been examined. From the comparison between the results obtained through the complete mathematical modelling and the ones got from the simplifying approach described here, it clearly turns out that the simplifying method can be applied only for an approximation of the seasonal average discharges of the springs and it's not much effective for detailed evaluations. However some useful hints can be obtained from this method in order to find the own way in regard of the karstic system behaviour, as the method allows to take into account of some basic elements of the hydrogeological structures.

CASES OF EXCHANGES FROM THE DEEP AQUIFER TOWARDS THE SWALLOW ONE

An upward-turned flow, induced by the fact that the deep aquifer water table exceeds the superficial aquifer one (this system is close to the vauclosian one), takes place above all when the intake areas of the two aquifers are located at different altitudes.

In this case, we can notice that, naming H_{20} the intake level of the second aquifer, the flow takes place from the deeper aquifer towards the superficial one if the following condition occurs:

$$H_{20} > (h_2 T_{02} + RT_{2R}) / (T_{2R} + T_{02}) \quad (7)$$

The lower aquifer piezometric level easily oversteps the upper aquifer one in a more evident way the less the system vertical permeability and the flow section are, through which the exchange between the two aquifers takes place.

In the case there are deep water reserves (Fig. 6), whose piezometric level is such that it allows to the flow which comes from it to get into the pipe which feeds the springs, these supplies make up an adjoining system which is able to drain the aquifers during the recharge phases when the supplies piezometric level is lower and to bring water volumes, even considerable, to the aquifers during the system emptying phases, when the supplies piezometric level can be higher than the aquifers one.

Making the representation of the hydrogeological system more simple and, reducing it to Figure 7, where the deep supplies Z piezometric levels are represented, the one of the two intake areas (H_1 and

Fig. 6 - Sistema carsico dotato di un sistema annesso profondo, privo di sorgenti in quanto sbarrato dal riempimento alluvionale poco permeabile della valle
 - Karstic system having an annexed deep system, without springs as blocked by the valley poorly permeable alluvial filling

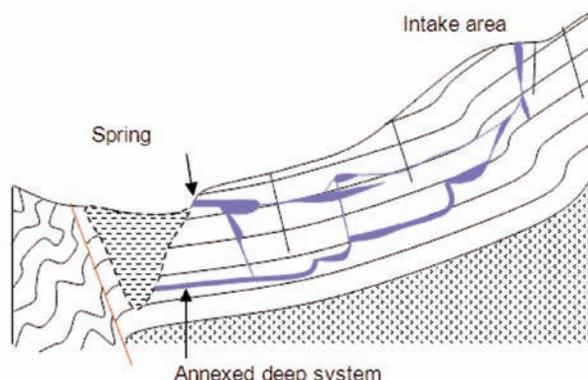
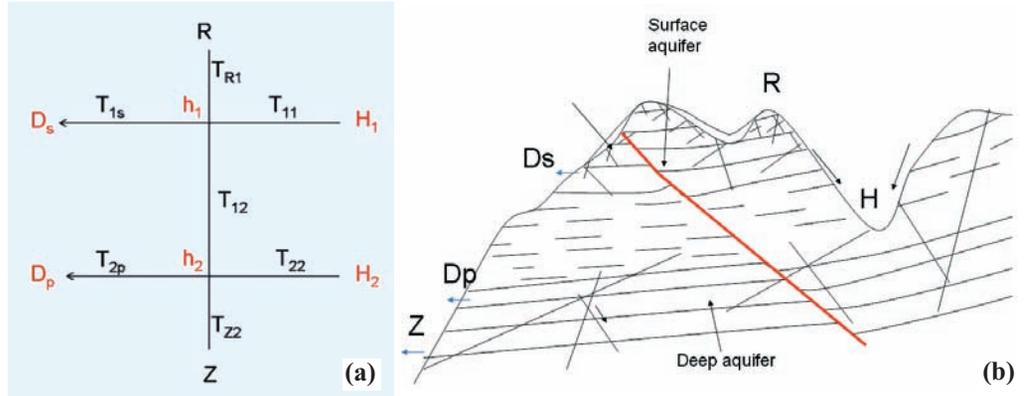


Fig. 7 - Schema (a) e relativo modello concettuale (b) di un sistema carico dotato di T equivalenti diverse, due fonti di alimentazione (H), d'infiltrazione dalla superficie (R) e di un sistema annesso profondo (Z)

- Scheme (a) and relevant conceptual models (b) of a karstic system having different equivalent T, two feeding springs (H), a spring of seepage from surface (R) and one of an annexed deep system (Z)



riducendolo come nella Figura 7, dove sono rappresentati il livello piezometrico Z delle riserve profonde, quello delle due aree alimentanti (H_1 e H_2) e dei recapiti (D_s e D_p), si ricava immediatamente che abbiamo deflusso dalla superficie verso h_2 quando $h_2 < h_1$ e deflusso verso le riserve profonde quando h_2 supera il livello piezometrico Z. Il sistema in questo caso fornisce acqua alle riserve. Avviene il contrario quando Z supera h_2 e questo è maggiore o uguale a h_1 . Si nota come il punto di equilibrio sia dato dall'uguaglianza fra h_2 e h_1 . Infatti, il sistema idrico è esposto alla crisi quando il livello piezometrico dell'acquifero profondo diviene inferiore a quello dell'acquifero superficiale.

In tal caso, se la sezione attraverso la quale avviene lo scambio di acque fra i due corpi idrici è molto ampia, si verifica un elevato drenaggio dell'acquifero superficiale, tale da diminuire facilmente o azzerare le portate di D_s .

L'esposizione al rischio si riduce proporzionalmente al diminuire della permeabilità equivalente verticale e della sezione di scambio fra i due acquiferi: in questi casi, sono necessarie forti riduzioni del livello piezometrico del secondo acquifero per produrre sensibili diminuzioni della resa dei recapiti.

Questo si verifica se in condizioni stazionarie:

$$RT_{R1} + D_s T_{1s} + H_1 T_{11} = ZT_{Z2} + H_2 T_{22} + D_p T_{2p} \quad (8)$$

Si può notare che in condizioni di equilibrio non c'è comunicazione fra i due acquiferi, essendo lo scambio limitato a quello che avviene fra le riserve e l'acquifero profondo.

L'importanza di questo interscambio è rilevante e dipende in modo molto marcato dal grado di interconnessione fra questi corpi idrici: quanto maggiore è la sezione di flusso, e più elevata la permeabilità equivalente verticale, tanto maggiore sarà lo scambio fra i due, assicurando un consistente equilibrio al sistema tramite il mantenimento del livello h_2 se la riserva idrica profonda è molto consistente.

E' quindi di particolare interesse conoscere o avere indizi sulla consistenza della riserva; tali indizi sono in parte ricavabili dalle curve di esaurimento dei recapiti dell'acquifero profondo, nelle quali le riserve possono essere coinvolte. L'evidenza di un contributo della riserva all'esaurimento, si ricava dal manifestarsi di variazioni nella

H_2) and of the outlets (D_s and D_p), we can immediately observe the presence of flow from the surface towards h_2 when $h_2 < h_1$ and flow towards the deep supplies when h_2 exceeds the piezometric level D. In this case the system provides water to the deep reservoirs. The contrary occurs when Z exceeds h_2 and this one is higher or equal to h_1 . It can be noted how the equilibrium point is given by the equality between h_2 and h_1 . The water system is actually subjected to a crisis when the aquifer piezometric level becomes clearly lower than the superficial aquifer one.

In this case, if the section through which the waters exchange between the two water bodies takes place is very wide, a drainage of the superficial aquifer occurs so heavy that it can easily decrease or set to zero the D_s discharges.

The risk exposure reduces proportionally with the decreasing of the vertical equivalent permeability and the exchange section between the two aquifers: in these cases, strong reductions of the second aquifer water table are necessary in order to produce appreciable decreases of the outlets yield.

This event occurs if we are in steady state:

$$RT_{R1} + D_s T_{1s} + H_1 T_{11} = ZT_{Z2} + H_2 T_{22} + D_p T_{2p} \quad (8)$$

One aspect that can be noted is that there's no communication between the two aquifers in equilibrium conditions, being the exchange limited to what happens between the supplies and the deep aquifer.

The importance of this exchange is relevant and depends in a very marked way on the interconnection degree between these water bodies: the wider is the flow section and the higher is the vertical equivalent permeability, the higher will be the exchange between the two, assuring to the system a solid equilibrium through keeping level h_2 if the deep water recharge is really considerable.

Therefore it's of particular interest knowing or having some clues on the reservoir size, which we can partly find out from the depletion curves of the deep aquifer outlets, in which the reserves can be involved. The evidence of a supply contribution to depletion can be detected from the appearing of changes in waters composition, for instance, the progressive reduction of the ratio Ca/Mg (SCHOELLER,

composizione delle acque, ad esempio, dalla riduzione progressiva del rapporto Ca/Mg (SCHOELLER, 1962). Meno facile risulta dedurre tale fenomeno da variazioni della pendenza della funzione portate-tempi con il metodo di FORKASIEWICZ & PALOC (1967).

E' inoltre di fondamentale interesse venire a possedere elementi per valutare le capacità di interscambio fra riserve e acquifero profondo date dalla permeabilità equivalente verticale.

Su questi aspetti, non si hanno dati sui sistemi idrogeologici lombardi. Al momento, si può solamente procedere a una serie di osservazioni ancora molto generali, non ricavate da studi specifici sul problema.

In particolare, si nota che alcuni grandi bacini carsici (Nossana, Fiumelatte) non sono sicuramente dotati di un riserva profonda, in quanto viene drenata dalle maggiori sorgenti l'intera porzione di acquifero disponibile alla circolazione idrica. L'esame delle curve di esaurimento della Nossana dianzi riprodotte, è stato fatto analizzando sia le variazioni di pendenza della curva, sia il chimismo.

Si è notato, come risulta dalla Figura 5, che il coefficiente di esaurimento si mantiene costante lungo tutta la curva di recessione delle portate.

Non si manifestano d'altra parte variazioni di chimismo apprezzabile. Nel caso della Nossana, infatti, l'acquifero profondo e la riserva vengono coincidere, per la presenza del substrato impermeabile poco al disotto del livello della Fonte.

Non molto diverso è il caso dell'altro grande bacino carsico (quello del Fiumelatte) che sgorga dalle unità inferiori della successione carbonatica.

Migliori possibilità di esistenza di riserve profonde si hanno nel Bresciano, in quanto il sistema dal quale sgorgano le sorgenti del secondo acquifero presenta un substrato poco permeabile a un livello decisamente inferiore a quello delle sorgenti.

Possiamo quindi concludere che i sistemi carsici lombardi solo in parte possono ritenersi protetti contro gli eventi climatici avversi, in particolare la siccità; infatti solo di quelli delle Prealpi Bresciane si ha la certezza della presenza di riserve idriche che siano in grado di compensare almeno parzialmente la riduzione di livello dell'acquifero che alimenta le sorgenti principali.

Una prima classificazione della dinamica degli scambi idrici all'interno dei sistemi idrogeologici lombardi

Appare evidente che un approccio preliminare alla comprensione della dinamica dei sistemi carsici, che possa fornire, sulla base dello studio geologico, indizi utili a definire la relazione precipitazioni-portate senza ricorrere alla modellazione matematica, risulta possibile in base alle considerazioni esposte. Si è ritenuto quindi opportuno configurare una prima classificazione del comportamento degli acquiferi carbonatici operando sui valori noti delle permeabilità equivalenti e delle sezioni di flusso attraverso le quali avvengono gli interscambi fra gli acquiferi e fra acquiferi e riserve con una normalizzazione a valori di riferimento.

Questa semplificazione permette di valutare l'entità degli scambi

1962). It's less easier to infer this phenomenon from the variations of the function discharge-time slope through the FORKASIEWICZ & PALOC method (1967).

Furthermore it's of basic interest to get elements which can help in assessing the exchange capability between the supplies and the deep aquifer given by the vertical equivalent permeability.

In regard to these aspects, there are no data on the Lombard hydrogeological systems. For the time being it's only possible to carry out a series of observations still very general, not obtained from specific studies on the problem.

In particular, some huge karstic basins (Nossana and Fiumelatte) are noted not to be surely provided with a deep supply, since the whole portion of the aquifer available to the water circulation is drained by the major springs. The exam of the depletion curves of Nossana spring, a short while ago represented, has been carried out analyzing both the curve slope changes both the hydrochemical facies.

As Figure 5 shows, the depletion coefficient has been noted to keep constant along all the discharges recession curve.

Nevertheless any appreciable hydrochemical change occurs. In the case of Nossana spring, the deep aquifer and the supply actually coincide, because of the presence of the impervious substratum slightly below the spring level.

The case of the other huge karstic basin (the Fiumelatte one) is not very different, as the basin flows out from the lower units of the carbonatic series.

Better probabilities of existence of deep reservoirs are found in the Brescia area, since the system from which the second aquifer springs flow presents a poorly permeable substratum at a level definitely lower than the springs one.

We can therefore conclude that the Lombard karstic systems can be only partly considered protected against the adverse climate events, especially drought; we are actually sure of the presence of water supplies able to counterbalance, at least partially, the level reduction of the aquifer which feeds the main springs only in the systems of the Brescia area Prealps.

A first classification of the water exchange dynamics within the lombard hydrogeological system

It clearly appears that, on the basis of the stated remarks, there's the possibility of a preliminary approach in order to understand the karstic systems dynamics, which can yield, on the strength of the geological study, useful clues for defining the relationship rainfall-discharge without resorting to mathematical modelling. A first classification of the carbonic aquifers behaviour has been considered to be framed, carrying out on the known values of equivalent permeability and flow sections, through which the exchanges between the aquifers and the supplies take place with a normalization to reference values.

This simplification allows to assess the entity of the exchanges within a system of any size and to compare it with what happens in

all'interno di un sistema di qualunque dimensione, e di confrontarlo con quanto avviene in analoghi sistemi di diversa volumetria ed estensione indipendentemente dal rapporto fra le dimensioni dei sistemi considerati.

L'utilizzo di un termine di riferimento rende inoltre possibile raggruppare i sistemi idrogeologici in base alle modalità con le quali avvengono gli scambi idrici e non in base alle loro dimensioni, semplificando notevolmente il problema di definire le migliori modalità di gestione delle risorse idriche. Nonostante l'interesse più generale ed esteso di un'analisi in condizioni di regime transitorio, attualmente in fase di approntamento, si ritiene utile presentare i risultati ottenuti considerando i sistemi, per i quali si siano già espletate le calibrazioni sufficienti per la stesura delle prime conclusioni, in regime stazionario.

Una prima classificazione della dinamica dei sistemi idrogeologici lombardi può quindi essere stilata sulla base degli elementi che maggiormente influiscono sul comportamento delle sorgenti e dei corpi idrici che ne sono alimentati.

- a) sistemi dotati di una sola fonte di alimentazione e di un solo recapito, privi di serbatoi idrici profondi (sorgenti di frattura, acquiferi contenuti nella roccia fratturata prossima alla superficie);
- b) sistemi multiaquiferi:
 1. dotati di una sola fonte di alimentazione e privi di consistenti riserve profonde (esempio, bacini del Torrente Esino di Lecco e della fonte Nossana di Bergamo);
 2. sistemi costituiti da acquiferi dotati di fonti di alimentazione indipendenti (es. sorgenti del Flysch bergamasco).
- c) sistemi dei tipi precedenti comprendenti serbatoi idrici profondi direttamente connessi con l'acquifero principale (es. sistemi idrogeologici bresciani dell'Altipiano di Serle e della Maddalena).

Per un confronto con i dati reali si sono utilizzate alcune sorgenti delle Prealpi Bergamasche, sulle quali le rilevazioni dirette sono state estese a un anno idrologico.

Scelta dei valori di riferimento

Si è ritenuto utile individuare come unità di base il prodotto della K equivalente delle discontinuità che connettono l'acquifero superiore con quello inferiore e della sezione di flusso tramite la quale avvengono gli scambi fra i due acquiferi. Il valore di questo prodotto appare infatti come la grandezza capace di influenzare in modo decisivo l'entità degli scambi e le differenze piezometriche fra i due acquiferi. Sono stati mantenuti identici al reale i valori dei livelli piezometrici delle fonti di alimentazione, dei recapiti e delle riserve geologiche sottostanti all'acquifero profondo.

Esempi di comportamento dei sistemi idrogeologici

Una serie di esempi di analisi del comportamento dei sistemi carsici lombardi e di riferimenti a quelli esaminati in questo studio è stata prodotta da SCESI & GATTINONI (2007). Si rinvia a questa pubblicazione per una più esauriente informativa sia sulle tecniche di modellazione dei sistemi idrogeologici, sia sulle soluzioni mediante

similar systems of different volumetry and extension, independently on the ratio between the dimensions of the considered systems.

In addition the use of reference term makes possible to group the hydrogeological systems on the basis of the manners through which the water exchanges occur and not on the basis of their dimensions, simplifying significantly the problem of defining the best ways of manage the water resources. Notwithstanding the more general and extended interest of an analysis in transient state, under preparation at the moment, we consider useful to present the obtained results, assuming the systems steady state, for which enough calibrations have been already carried out for the writing up of the first conclusions.

A first classification of the dynamics of the Lombard hydrogeological systems can thus be drawn up on the basis of the elements which mainly influence the behaviour of the springs and of water bodies fed by them.

- a) Systems provided with only one feeding spring and only one outlet, lacking in deep water supplies (fracture springs, aquifers in jointed rock next to surface);
- b) multiaquifer systems:
 1. provided with only one inlet and lacking in considerable deep reservoirs (for instance, basins of Esino stream in Lecco and Nossana spring in Bergamo);
 2. systems consisting of aquifers provided with independent intake areas (for example, the springs of Bergamo Flysch).
- c) systems of the previous kinds including also deep water reservoirs directly connected with the main aquifer (for instance, the hydrogeological systems of the Serle and Maddalena Plateau in the Brescia area).

For a comparison with the real data some springs of the Bergamo Prealps have been used, on which the direct records have been extended to one hydrologic year.

Choice of the reference values

It has been considered useful to characterize as base units the product of equivalent permeability K of the discontinuities which connect the upper aquifer with the lower one and of the flow section through which the exchanges between the two aquifers take place. The value of this product actually seems as the quantity able to affect in a significant way the exchanges entity and the piezometric differences between the two aquifers. The values of the piezometric levels of the feeding sources, of the outlets and of the geological supplies underlying the deep aquifer have been kept identical to the real values.

Examples of hydrogeological systems behaviour

A series of examples of analysis of the Lombard karstic systems behaviour and of references to the ones examined in this study has been produced by SCESI & GATTINONI (2007). This publication contains more thorough information both on the modelling techniques of the hydrogeological systems and on the solutions through analytical

relazioni analitiche e modelli semplificati. Di seguito si riportano alcuni elementi utili per una classificazione idrodinamica degli acquiferi carsici.

Sistema di due acquiferi con unica fonte di alimentazione

Si è innanzi tutto valutato il comportamento di un sistema nel quale sono coinvolte come fonti di alimentazione l'infiltrazione dalla superficie (ricavata tramite il metodo Thornthwaite dalle piogge mensili), un corso d'acqua situato a quota tale da determinare afflussi sia al primo che al secondo acquifero e due recapiti (rispettivamente dell'acquifero superficiale e dell'acquifero profondo). La schematizzazione è stata effettuata in modo da avere come uniche incognite le portate di scambio fra i due acquiferi, in base a un valore piezometrico rappresentativo di ciascuno di essi.

La calibrazione è stata svolta avendo come dati noti le portate delle sorgenti ai due recapiti, ipotizzando l'assenza di una riserva geologica.

E' stato assunto come valore unitario quello del prodotto dalla permeabilità equivalente verticale per l'estensione del bacino.

1. Permeabilità equivalenti uguali a quella di riferimento:

i valori delle k equivalenti sono stati posti nel primo esempio tutti pari a un valore unitario (1 m/s) per facilitare la comprensione dei risultati ottenuti, quindi molto elevati. Le quote dell'alimentazione sono 200 m s.l.m., l'infiltrazione è posta uguale a zero, la quota del recapito dell'acquifero superiore 190 m s.l.m. e quella del recapito dell'acquifero inferiore 180 m s.l.m.

In questo tipo di bacino, si osserva che si realizza una consistente differenza del livello piezometrico fra i due acquiferi (2,5 m) dei quali quello più profondo produce una rilevante portata verso il recapito, oltre il doppio di quella dell'acquifero superiore.

2. Permeabilità equivalenti doppie di quella di riferimento:

quando invece le permeabilità equivalenti sono doppie rispetto a quella di riferimento, la differenza piezometrica sale a oltre 3 m e si ha ai recapiti una portata sensibilmente superiore.

3. Permeabilità equivalenti inferiori a quella di riferimento:

al contrario, riducendo le permeabilità equivalenti (caso degli acquiferi meno permeabili) rispetto al valore di riferimento, si verifica una livellazione dei valori piezometrici fra primo e secondo acquifero e una sostanziale riduzione delle portate defluenti dalle sorgenti.

Riducendo solamente la permeabilità equivalente dell'acquifero superiore, esiste la possibilità che, per suoi valori particolarmente inferiori al valore di riferimento, la piezometria del primo acquifero sia inferiore a quella del secondo. In questo caso (che si verifica facilmente per infiltrazione nulla o prossima allo zero), il recapito del primo acquifero ha portata nulla e tutto il sistema ha come unico recapito quello del secondo acquifero.

In conclusione, otteniamo l'indicazione che, in un sistema totalmente omogeneo, l'acquifero più profondo risulta quello più produttivo, soprattutto per la maggiore cadente piezometrica media.

relationships and simplified models.

In the following part some useful elements for the hydrodynamical classification of the karstic aquifers are described.

Two aquifers system with a unique feeding source

The first step has been to assess the behaviour of a system in which the seepage from the surface (found out thanks to the Thornthwaite method on the basis of the monthly rainfalls), a river located at such height able to determine inflows both to the first and the second aquifer and two outlets (respectively of the superficial aquifer and the deep one) are involved as feeding sources. The schematization has been carried out in order to have the exchange discharges between the two aquifers as unique unknowns values, basing on a piezometric value representative of each of the aquifers.

The calibration has been carried out having as known values the discharges of the springs towards the two outlets, assuming the absence of a geological supply.

The product of the vertical equivalent permeability times the basin extension has been assumed equal to the unity.

1. Equivalent permeabilities equal to the reference one:

in the first example the values of equivalent k have been set equal to 1 m/s (a very high value) for helping the results comparison. The feeding heights are 200 m a.s.l., the seepage is set equal to zero, the upper aquifer outlet height is 190 m a.s.l. and the one of the lower aquifer outlet is 180 m a.s.l.

One interesting observation is that, in this kind of basin, a piezometric level significant difference between the two aquifers (2.5 m) occurs, where the deeper aquifer produces a significant discharge towards the outlet, more than twice as the lower aquifer one.

2. Equivalent permeabilities twice as the reference one:

when instead the equivalent permeabilities are twice than the reference one, the piezometric difference rises beyond 3 m and a sensibly higher discharge arrives at the outlets.

3. Equivalent permeabilities lower than the reference one:

on the contrary, reducing the equivalent permeabilities (case of less permeable aquifers) to a value lower than the reference one, a balancing of the piezometric values between the first and the second aquifer occurs and a substantial reduction of the discharges flowing out from the springs, as well.

Reducing only the equivalent permeability of the upper aquifer, there's the possibility that for its values sensibly below the reference value, the piezometry of the first aquifer is lower than the one of the second aquifer. In this case (which happens easily for zero or next to zero seepage), the outlet of the first aquifer has no discharge and all the system has as unique outlet the one of the second aquifer.

In conclusion, we deduce that in a totally homogeneous system, the deep aquifer turns out to be the more productive one, especially thanks to the higher average pressure head.

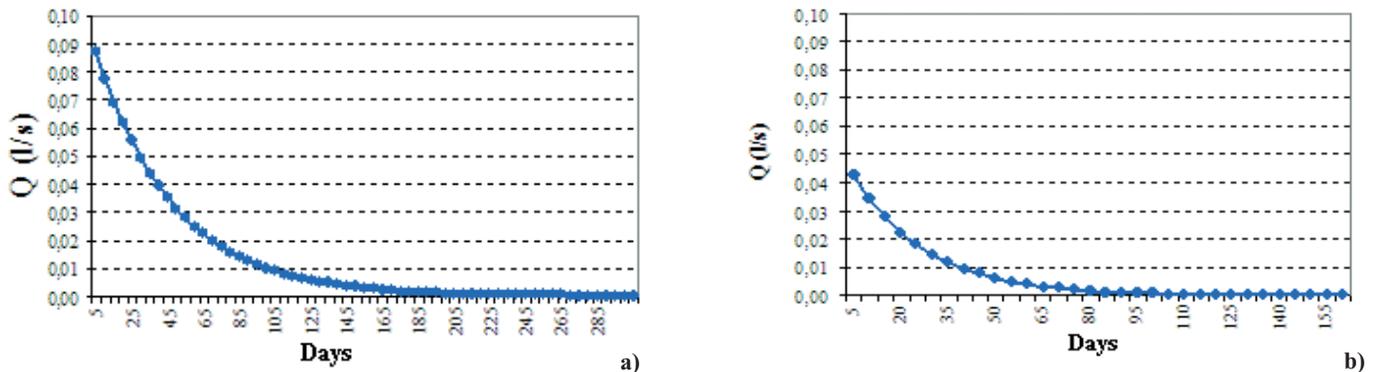


Fig. 8 - Fasi di esaurimento di due sorgenti nel Flysch di Bergamo. La prima (a) ha una fase che dura 297 giorni, la seconda (b) 144 giorni
 - Depletion phases of two springs in the Flysch from Bergamo. The first one (a) has a phase which lasts 297 days, the second one (b) 144 days

Nei sistemi con bassi valori della permeabilità equivalente nell'epicarso rispetto ai valori di riferimento, si possono verificare situazioni di rapidissimo esaurimento delle sorgenti, per drenanza verso gli acquiferi inferiori nel caso di assenza prolungata di precipitazioni (Fig. 8).

Nella Figura 8 sono rappresentate le curve di esaurimento di due sorgenti poste nel Flysch di Bergamo, dotate di diverso coefficiente di esaurimento, e le conseguenze sulla durata della fase di esaurimento. La durata del periodo di riduzione progressiva delle portate, fino a pervenire a meno di un decimo di litro/s, è, rispettivamente, di circa 300 giorni e di circa 150 giorni. Nella medesima area si sono osservate sorgenti la cui fase di esaurimento risulta di poche settimane, in corrispondenza di settori in cui il drenaggio verso sistemi profondi è particolarmente attivo.

Sistema di più acquiferi con diverse fonti di alimentazione

Comportamento differente hanno i sistemi in cui ogni acquifero è dotato sia di un proprio recapito sia di una propria fonte di alimentazione. Questi bacini si differenziano da quello precedente per il fatto che, quando la permeabilità equivalente del primo acquifero è largamente inferiore sia a quella del valore di riferimento sia a quella del secondo acquifero e quando l'infiltrazione è molto ridotta, l'intera portata del sistema è fornita dal secondo acquifero. Si è osservato, dagli esempi studiati nel Flysch di Bergamo che, perché questo avvenga, il carico piezometrico della fonte di alimentazione del secondo acquifero deve essere molto vicino a quella del primo.

Sistemi di più acquiferi con sistemi profondi annessi

La presenza di un serbatoio profondo, che può compensare nelle fasi di esaurimento la riduzione del flusso nel secondo acquifero, rappresenta un caso di notevole interesse e, come descritto in precedenza, si traduce in un rilevante vantaggio in quanto rafforza l'equilibrio del sistema e ostacola l'estinzione delle portate dei recapiti.

Sulla base del metodo di studio proposto, la curva di esaurimento di una sorgente carsica viene a dipendere dal livello piezometrico delle sue fonti di alimentazione e dalle trasmissività equivalenti dei settori nei quali viene suddiviso il sistema acquifero.

In the systems with low equivalent permeabilities values in the epikarst with regard to the reference values, situations of very fast depletion of the springs can occur, because of the draining towards the lower aquifers in the case of extended absence of rainfall (Fig. 8).

Figure 8 shows the depletion curves of two springs located in the Flysch from Bergamo, having a different depletion coefficient and the consequences on the duration of the depletion phase. The length of the period of progressive reduction of discharges, up to reaching less than a tenth of litre per second, is respectively of about 300 days and of about 150 days. In the same area we have observed springs whose depletion phase lasts few weeks, in correspondence with sectors in which the draining towards deep systems is particularly active.

System made up by more than one aquifer with different springs

The systems in which every aquifer has both an own outlet and an own intake source have a different behaviour. These basins are different from the previous one as, when the equivalent permeability of the first aquifer is largely lower both than the one of the reference value both than the second aquifer one and when seepage is highly reduced, the whole discharge of the system comes from the second aquifer. We have observed, on the strength of the studied examples in the Flysch from Bergamo, that, in order to make this happen, the hydraulic head of the intake area of the second aquifer must be very near to the one of the first aquifer.

System made up by more than one aquifer with annexed deep systems

The presence of a deep reservoir, which can counterbalance the flow reduction in the second aquifer during the depletion phases, represents a case of notably interest and, as described before, turns out to be a relevant advantage as it strengthens the system equilibrium and hinders the extinction of the outlets discharges. On the basis of proposed study method, the depletion curve of a karstic spring turns out to be dependent on the piezometric level of its intake springs and on equivalent transmissivities of the sectors the aquifer system is divided in.

Tenuto conto della difficoltà di costruire un modello matematico verosimile di un sistema carsico, questa soluzione ha il vantaggio, rispetto a quelle tradizionali, di consentire una ricostruzione approssimata dell'idrodinamica carsica anche in strutture multiacquifere, come quelle di molti sistemi lombardi.

L'analisi della curva di esaurimento può essere compiuta sulla base della relazione (5) da cui si rileva che l'esistenza di un sistema annesso a quello principale, che si riflette in una aumento dell'immagazzinamento dell'acquifero principale, può avere una rilevante importanza.

Esaminando la relazione:

$$h'_0 = [\sum T_{i0} h_{i/A} + R/A + S/\Delta t] / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (5)$$

si può osservare come il valore della parte del secondo membro che è influenzata da S abbia il valore di:

$$(S/\Delta t) / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (9)$$

Mentre quella interessata da R sia data da:

$$(R/A) / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (10)$$

Controllando quali di questi valori possono avere la maggiore incidenza su h'_0 , constatiamo che, in caso di forti precipitazioni (es. 100 mm di pioggia in pochi giorni), il valore dell'infiltrazione efficace risulta preponderante su quello di S nel corso dei periodi piovosi. Considerando il fatto che i valori delle trasmissività equivalenti sono solitamente ridotti, si può ritenere che generalmente abbiano ancora minore incidenza nel determinare h'_0 .

Al contrario, nei periodi di assenza di precipitazioni, con F quindi pari a zero, possiamo riscontrare due casi:

- a) risultano preponderanti i valori di S nel determinare il livello piezometrico di h'_0 , in quanto hanno un effetto dominante su quello dovuto alla T equivalente, nel caso in cui S sia elevato;
- b) quando S scende al disotto di 0,01, l'effetto dell'immagazzinamento prevale solo raramente sugli effetti della trasmissività.

In conclusione, è risultato possibile verificare che la presenza di serbatoi profondi direttamente connessi con l'acquifero principale, dotati di buon volume e porosità, consente, in fase di esaurimento, un deciso controllo della piezometria e quindi un mantenimento di buone portate alle sorgenti, mentre l'assenza di sistemi annessi rende possibile il rapido esaurimento delle fonti.

CONCLUSIONI

L'idrodinamica degli acquiferi lombardi è caratterizzata da un comportamento complesso, nei confronti non solo della produttività, ma anche del tempo di risposta alle precipitazioni e della curva di deflusso annuale. L'utilizzo della modellazione matematica potrebbe risolvere in modo completo il problema di collegare i valori dell'alimentazione a quelli del deflusso e quindi di prevedere con una certa approssimazione il regime delle sorgenti; la carenza di dati impone di ricorrere a tecniche meno impegnative. In effetti si è constatato che le relazioni che descrivono il flusso in un sistema multiacquifero pos-

Considering the difficulty of building a plausible mathematical model of a karstic system, this solution has the advantage, with regard to the traditional ones, of allowing an approximate reconstruction of the karstic hydrodynamics also in multiaquifer structure, as the ones of many Lombard systems.

The analysis of the depletion curve can be carried out on the basis of relationship (5), from which we can notice that the existence of a system annexed to the main one, which is reflected in a storage increase of the main aquifer, can have a relevant importance.

Examining the relationship:

$$h'_0 = [\sum T_{i0} h_{i/A} + R/A + S/\Delta t] / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (5)$$

we can observe how the value of the part of the second member which is influenced by S has the value of:

$$(S/\Delta t) / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (9)$$

While the one interested by R is given by:

$$(R/A) / (S/\Delta t + ST_{i0}/A) \quad (10)$$

While checking which among these values can have the main influence on h'_0 , we notice that, in case of heavy precipitations (for instance 100 mm of rain in few days), the value of effective seepage turns out to be predominant on the one of S during the rainy periods. Considering the fact that the equivalent transmissivities values are usually small, we can consider that they generally have even less influence in determining h'_0 .

On the contrary, in the periods of absence of precipitations, thus with F equal to zero, we can observe two cases:

- a) the values of S turn out to predominant in determining the piezometric level of h'_0 , as their effects are prevailing with respect to the effect of the equivalent transmissivities, in the case S is high;
- b) when S falls below 0.01, the effect of the storage prevails only rarely on the effects of transmissivity.

In conclusion, it has been possible to verify that the presence of deep reservoirs directly connected with the main aquifer, having a good volume and porosity, allows in the depletion phase a strong control of piezometry and thus the maintaining of good discharges at the springs, while the absence of annexed systems makes possible the fast depletion of the springs.

CONCLUSIONS

The hydrodynamics of the Lombard aquifers is characterized by a complex behaviour, with regard to both the productivity and the response time to precipitations and to the annual discharge curve. The use of mathematical modelling might solve in a complete way the problem of linking the recharge values to the discharge ones and thus to predict with a certain approximation the springs regime; the lacking of data enjoins to use less demanding techniques. We actually noted that the relationships which describe the flow in a multiaquifer system can easily be applied to the building of the model in

sono facilmente essere applicate alla costruzione di un modello nel quale, inserendo i valori delle permeabilità dell'acquifero risultanti dalle prove in sito e dalle rilevazioni della geometria delle discontinuità, le incognite risultano costituite dai valori della piezometria. Applicando questo approccio, è possibile ricavare alcune indicazioni utili all'interpretazione dell'idrodinamica anche in casi complessi come quello di alcuni sistemi lombardi, senza dover ricorrere a una completa modellazione matematica.

Questo metodo, i cui risultati sono stati confrontati con quelli di una modellazione matematica più dettagliata eseguita sui principali bacini carsici lombardi e sulle sorgenti del Flysch bergamasco, non ha permesso una ricostruzione del regime delle sorgenti con precisione, ma ha fornito comunque la ricostruzione di un quadro approssimato dell'idrodinamica dei bacini esaminati, coerente con la struttura idrogeologica rilevata e ha consentito di pervenire a una prima classificazione dei sistemi carsici lombardi, finalizzata alla previsione e gestione delle risorse idriche in relazione ai diversi scenari climatici.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'ing. Maddalena Vitali per la collaborazione nell'elaborazione dei dati e la Prof. Laura Scesi per i consigli nella stesura del manoscritto.

OPERE CITATE/REFERENCES

- AVANZINI M., DENTI E., FRANCANI V., SALA P. & TURRI E. (1993) - *Studio idrogeologico della parte meridionale delle Prealpi bresciane*. Atti del Convegno Ricerca e protezione delle risorse idriche sotterranee delle aree montuose, Quaderni di Sintesi, 43, ASM, Brescia, Italy.
- AZIENDA MUNICIPALE ACQUEDOTTI CIVICI, (1971) - *La Nossana*. Bergamo, Italy.
- BAJO F., BINI A., PAGANONI A., FERRARI I. & PERETTI G. (1983) - *Il carsismo di Alta Montagna*. Lombardia, Riv. Museo Sc. Nat. Bergamo, 6: 27-73, Bergamo, Italy.
- BERETTA G.P. (1986) - *Contributo per la stesura di una carta idrogeologica della Lombardia*, Acque sotterranee, 4, dicembre, Milano.
- BERSEZIO R. & FORNACIARI M. (1988) - *Tectonic framework of the Lombardy foothills (Southern Alps), between Brianza and lake Iseo*. Rend. Soc. Geol. It., 11:75-78, Roma
- BERTULETTI C. (1992) - *Carta delle sorgenti captate in Provincia di Bergamo* - tavola esterna allegata al volume "I caratteri originali della Bergamasca. Storia economica e sociale di Bergamo, Fondazione per la storia economica e sociale di Bergamo, Istituto di studi e ricerche, Bergamo
- CHARDON M. (1975) - *Les Prealpes Lombardes et leurs bordures*. These Univo Aix-Marseille, 655, figures 140, table 10, photo. charts 3.
- BINI A., FORCELLA F., JADOUF F. & OROMBELLI G. (1996) - *Carta Geologica della Provincia di Bergamo alla scala di 1:50000*.
- CROCI A., FRANCANI V. & GATTINONI P. (2003) - *Studio idrogeologico del bacino del Torrente Esino*. Quaderni di tecniche di protezione ambientale, Quaderni di geologia applicata, 10, Pitagora Editrice, Bologna, Italy.
- DUBLAYANSKY V. & DUBLAYANSKY Y. V. (1998) - *The problem of condensation in karst studies*. Journal of Cave and Karst Studies, 60 (1):3-17.
- ESI (1999) - *Guide to Using Groundwater Vistas version 4*.
- ESI) - *Guide to Using Stochastic MODFLOW for Monte Carlo Simulation*.
- FORKASIEWICZ J. & PALOC H. (1967) - *Le régime de tarissement de la Foux de la Vis*. Chronique d'hydrogéologie, 10: 59-73.
- GATTINONI P., SCESI L. & FRANCANI V. (2005) - *Previsione del rischio geologico della costruzione di gallerie in rocce di media copertura*. Giornale di geologia applicata 2. Congresso nazionale AIGA di Bari.
- HARBAUGH A.W., BANTA E.R., HILL M.C. & McDONALD M.G. (2000), *Modflow-2000, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Open-File Report 00-92, 121, (<http://water.usgs.gov/nrp/gwsoftware/modflow2000/ofr00-92.pdf>).
- HOBBS S.L. & SMART P.L. (1986) - *Characterisation of carbonate aquifers: a conceptual base*. Proc. 9th Int. Congr. of Speleology, Barcelona, Spain.
- JADOUF F., POZZI R. & PESTRIN S. (1985) - *La sorgente Nossana: inquadramento geologico e idrologico*. Riv. Mus. Sc. Nat. BG, 9: 129-140.
- KINZELBACH W. (1986) - *Groundwater modelling*, 333, Elsevier, Amsterdam, Holland.
- KIRALY L. (2003) - *Karstification and Groundwater Flow*. Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1 (3): the Virtual Scientific Journal

which, starting from the values of the aquifer permeability obtained from the on site tests and from the gathering of the discontinuities geometry, the unknown values turn out to be the water table ones. Applying this approach, it's possible to get some useful hints for understanding the hydrodynamics as well in complex cases as the one of some Lombard systems, without having to resort to a complete mathematical modelling.

This method, whose results have been compared with those of the more detailed mathematical modelling carried out on the main Lombard karstic basins and on the springs of the Flysch in Bergamo, has not let a precise reconstruction of the springs regime, but it has given anyway an approximate reconstruction of the hydrodynamics of the studied basins, consistent with the surveyed hydrogeological structure and it has let to come to a first classification of the Lombard karstic systems, oriented to the forecasting and management of groundwater resources as regards to different climate scenarios.

ACKNOWLEDGEMENTS

The Authors acknowledge Eng. Maddalena Vitali for collaboration in data analysis and Prof. Laura Scesi for the suggestion for the manuscript.

HYDROGEOLOGICAL ASPECTS OF LOMBARD PREALPS KARSTIFICATION

(www.speleogenesis.info), 3-26.

MAILLET E. (1906) - *La vidange des systèmes de réservoirs*. Ann Ponts et Chaussées Mém Doc, 218.

MANGIN A. (1975) - *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques*. Doctorat è sciences naturelles, 260 pp., Université de Dijon, France.

MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. (1988) - *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. USGS Techniques of Water Resources Investigations, 6, Chapter A1, Modeling Techniques.

SCESI L. & GATTINONI P. (2007) - *La circolazione idrica negli ammassi rocciosi*. 1-156, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, Italy.

SCHOELLER H.(1965) - *Les eaux souterraines*. Masson Edit, Paris.

WITHERSPOON P.A. & GALE J.E. (1980) - *Validity of the cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture*. Water Resources Research, **16** (6): 1016-1024.

Received September 2008 - Accepted December 2008

