



AREE DI SALVAGUARDIA DELLE CAPTAZIONI
DI ACQUE DESTINATE AL CONSUMO UMANO
0 – VULNERABILITA' ACQUIFERI

Giovanni Pietro Beretta

Trento, 28 settembre 2026

DEFINIZIONE

La *vulnerabilità intrinseca o naturale* degli acquiferi si definisce come la suscettibilità specifica dei sistemi acquiferi, nelle loro diverse parti componenti e nelle diverse situazioni geometriche ed idrodinamiche, ad ingerire e diffondere, anche mitigandone gli effetti, un inquinante fluido od idroveicolato tale da produrre impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea, nello spazio e nel tempo (Civita, 1987).

La vulnerabilità intrinseca dipende da almeno tre principali processi che si producono all'interno del sistema - sottosuolo esistente al di sotto del punto o/e della zona d'impatto:

- lo *spostamento dell'acqua* (o di un *inquinante fluido o idroportato*) attraverso l'insaturo, sino a raggiungere la superficie piezometrica dell'acquifero soggiacente;
- la *dinamica del flusso* sotterraneo e di un *inquinante fluido o idroportato* nella zona di saturazione dell'acquifero soggiacente;
- la *concentrazione residua di un inquinante fluido o idroportato* al suo arrivo nella zona di saturazione rispetto a quella iniziale, che marca la capacità di attenuazione dell'impatto dell'inquinante del sistema acquifero.

METODI DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' DEGLI ACQUIFERI ALL'INQUINAMENTO

1 – Zonazione per aree omogenee (valutazione per *complessi e situazioni idrogeologiche*);

2 – Valutazione per *sistemi parametrici*:

Sistemi a matrice (Matrix Systems);

Sistemi a punteggio semplice (Rating Systems);

Sistemi a punteggi e pesi (Point Count System Models);

3 – Valutazione per *modelli numerici* (Espressioni Analogiche)).

METODI DI ZONAZIONE PER AREE OMOGENEE

I metodi di *zonazione per aree omogenee* valutano la vulnerabilità per *complessi e situazioni idrogeologiche*, usando la tecnica di sovrapposizione cartografica, inizialmente per *overlay* fisico (per es. sovrapposizione di tematismi diversi in forma cartacea), oppure per *overlay* informatico di supporti georeferenziati, via GIS.

Si tratta in genere di sistemi di valutazione del tipo universale, adatti ad essere usati su territori vasti ed articolati dal punto di vista idrogeologico, idrostrutturale e morfologico.

Sono particolarmente adatti per generare cartografie tematiche a denominatore di scala medio - grande e ad essere utilizzati per la copertura di interi territori nazionali.

SISTEMI PARAMETRICI

Il principio che informa i diversi tipi di **sistemi parametrici** è simile: vengono, innanzi tutto, selezionati i parametri sui quali si ritiene di basare la valutazione della vulnerabilità; a ciascun parametro, suddiviso per intervalli di valori o/e per tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio arbitrario crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva.

I **sistemi a matrice** hanno un utilizzo quasi sempre locale e si basano su pochi parametri opportunamente mirati.

I **sistemi a punteggio semplice** traggono più o meno tutto spunto dal sistema Legrand (1964, 1983). A ciascuno dei parametri prescelti come necessari e sufficienti per la valutazione della vulnerabilità intrinseca è attribuito un intervallo di punteggio, quasi sempre fisso. Questo è opportunamente suddiviso in funzione dell'intervallo di variazione del singolo parametro. Viene, quindi, ottenuta la valutazione desiderata per ciascun punto o area presa in considerazione dalla sommatoria dei punteggi. La gamma completa dei punteggi (tra minimo e massimo) è, sovente, suddivisa in segmenti, a ciascuno dei quali è attribuito un grado di vulnerabilità espresso in termini palesi. I dati di base che sono utilizzati in questi sistemi sono parecchi: alcuni AA. danno un'importanza prevalente alle caratteristiche fisiche e chimiche dei suoli, mentre altri focalizzano il metodo sui dati idrogeologici e idrologici principali.

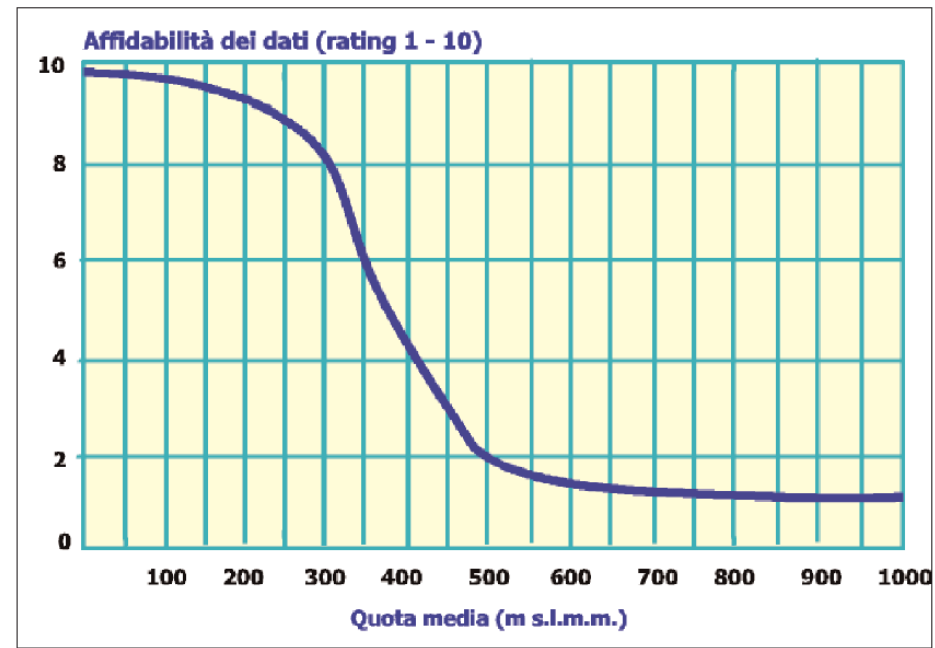
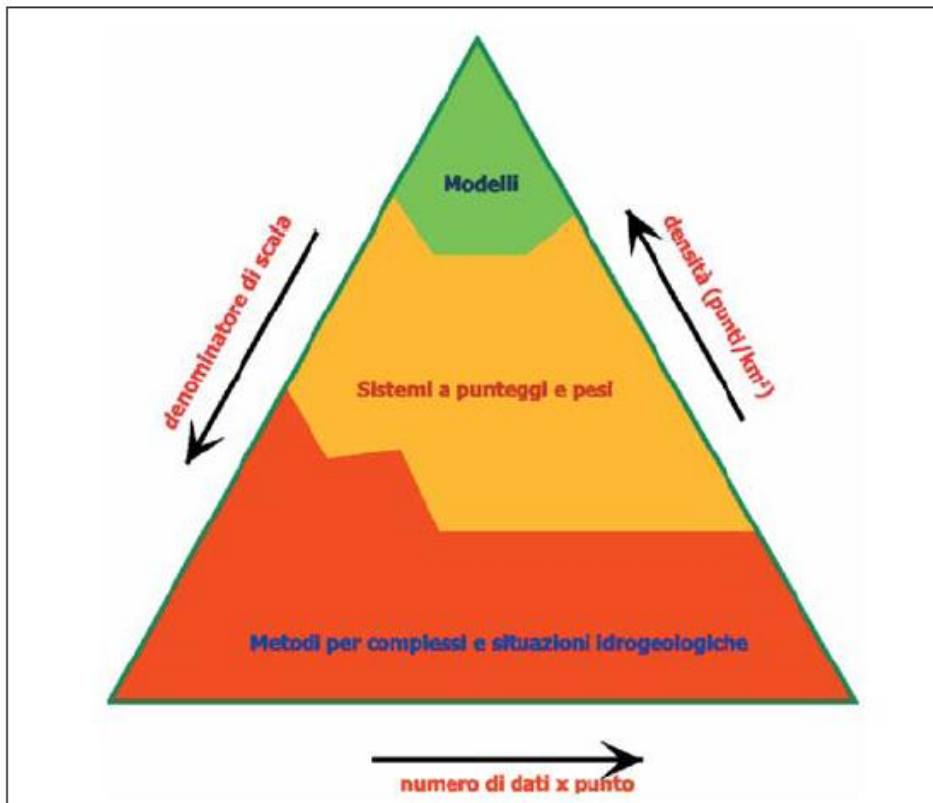
Un'ulteriore evoluzione nei sistemi di valutazione parametrica si è registrata con l'avvento delle metodologie basate sul **punteggio e sul peso**. Rispetto ai RS, i PCSM introducono una o più linee di pesi (*weights*), cioè un moltiplicatore a gamma fissa per ciascun parametro di base considerato, che amplifica il punteggio attribuito al parametro stesso in misura preordinata. Ciò, allo scopo di evidenziare l'importanza di uno o più parametri nel definire la vulnerabilità in particolari situazioni idrogeologiche o/e d'impatto antropico.

METODI CON MODELLI NUMERICI

Le espressioni analitiche sono metodologie di valutazione di un indice di vulnerabilità intrinseca basate su espressioni analogico - matematiche semplici o complesse.

Si tratta, dunque, di costruire ed applicare modelli matematici che richiedono una gran varietà di dati specialistici ottenibili per aree di piccole o piccolissime dimensioni. Il più delle volte, tali modelli non sono esportabili in realtà territoriali diverse da quelle nelle quali sono stati concepiti e, per altro, risultano inutili per la cartografia tematica.

POSSIBILE SELEZIONE DEI METODI



Linee Guida per la redazione l'uso delle carte della Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento



Settori disciplinari, tipologie, fonti e metodi di acquisizione dei dati necessari per la reazione di cartografie della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (da Civita M., 1994)

Settore disciplinare	Tipologia delle informazioni	Fonti e metodologie di acquisizione
1. Topografia	Quote assolute, acclività della superficie topografica, coefficiente e densità di drenaggio.	Carte topografiche moderne (CTR), aerofotointerpretazione, Remote Sensing
2. Copertura vegetale	Uso del suolo, zone di flusso preferenziale, lineazioni, carico inquinante teorico (fitofarmaci, concimi, ...)	Cartografie specialistiche (p.e. Progetto Corine, areofotointerpretazione, Remote Sensing.
3. Climatologia	Serie storiche delle precipitazioni e delle temperature medie; Direzione e intensità del vento; Evapotraspirazione; Evaporazione; Precipitazioni efficaci (ricarica attiva + ruscellamento).	Annali idrologici, elaborazioni e modelli di calcolo numerico, dati da stazioni di misura, serie storiche.
4. Pedologia	Tipo, spessore, tessitura, composizione mineralogica, porosità, permeabilità, ritenzione specifica, caratteri chimico-fisici dei suoli.	Rilevamenti, analisi e test specifici, aero-fotointerpretazione, Remote Sensing, cartografie specialistiche.
5. Idrologia	Ruscellamento superficiale; idrogrammi e fasi di verse; tempi di corrivazione; flusso di base, aree esondabili.	Annali idrologici, misure di portata, (corsi d'acqua, sorgenti), individuazione di perdite e di travasi in alveo e in mare (Remote Sensing).
6. Idrogeologia		
a) Insaturo	Soggiacenza; Litologia, struttura, porosità utile, permeabilità verticale, velocità di filtrazione; Indici di fratturazione, di carsismo, d'infiltrazione; ricarica attiva; quote piezometriche; gradiente idraulico, soggiacenza.	Rilevamento idrogeologico, geognostica, geofisica, piezometria, test con infiltrometri e di assorbimento, da dati lisimetrici, test con traccianti, aerofotointerpretazione, Remote Sensing, rilievi speleologici.
b) Saturo	Litologia, struttura, permeabilità (tipo, grado) orizzontale e verticale, porosità utile, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento, dispersione; tipologia dell'acquifero (libero, in pressione, semiconfinato,...); interconnessioni con altri acquiferi o con corpi idrici superficiali; direzione di flusso; posizione degli spartiacque sotterranei; velocità effettiva di flusso, portate unitarie e complessive	Rilevamento idrogeologico, geognostica, geofisica, test di assorbimento e di emungimento, test con traccianti, carte piezometriche, aerofotointerpretazione, Remote Sensing, esplorazione speleologica, modelli di calcolo numerico.
7. Uso delle acque	Ubicazione delle captazioni, aliquote derivate, aliquote distribuite, depressioni indotte da impianti di pompaggio (compresi quelli di dewatering), ubicazione e potenziale degli impianti di ravvenamento.	Piano generale degli acquedotti, piani di bacino e di risanamento, censimenti, rilevamenti, inchieste dirette presso Enti pubblici, Consorzi, privati.
8. Chimica		
a) Idrogeochimica	Caratteristiche fisiche e chimismo delle acque, identificazione dei traccianti ambientali, facies chimica, rapporti caratteristici, scambi con la matrice, età, tempi di residenza, qualità delle acque sotterranee	Analisi chimico - fisiche e batteriologiche, analisi isotopiche, ... (Enti pubblici, ASSL, laboratori universitari e privati, ARPA).
b) Inquinologia	Identificazione degli inquinanti, concentrazioni, densità, solubilità, viscosità, peso specifico, vita media, capacità di scambio cationico, biodegradabilità, mobilità, ...	Reti di monitoraggio, analisi specialistiche, determinazioni ed esperienze di laboratorio, dati tabulati (ARPA, ASSL, ...)
9. Antropizzazione	Posizione e natura degli insediamenti urbani e industriali, dei produttori reali e potenziali, degli ingestori, dei riduttori, dei preventori e dei soggetti d'inquinamento.	Censimenti, tabulati e cartografie di Enti pubblici, Camere di Commercio, ASSL, ARPA, ISTAT, Forestale, rilevamenti diretti e aerofotografici. Anagrafe siti L. 07/04/00 n.42.

METODI PARAMETRICI (pesi e punteggi)

METODO DRASTIC (Aller L. et al., 1985 e 1987)

L'acronimo deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione:

parametri

D(istanza tra la superficie del suolo e quella della falda)

R(ricarica dell'acquifero)

A(acquifero presente nel sottosuolo)

S(uolo che costituisce la copertura superficiale)

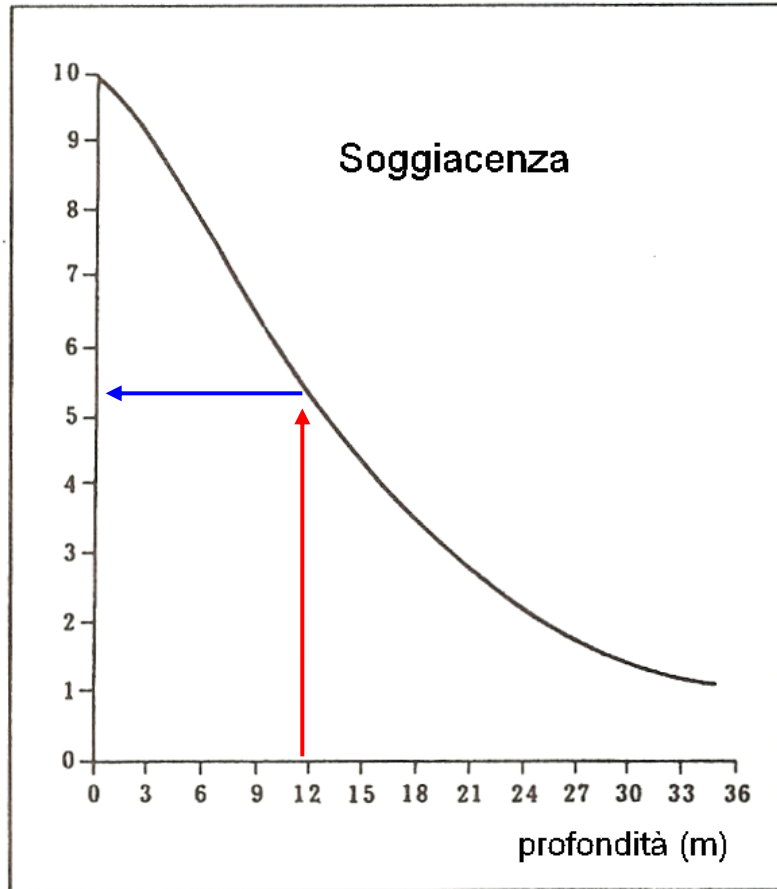
T(opografia dell'area)

I(mpatto della zona non satura)

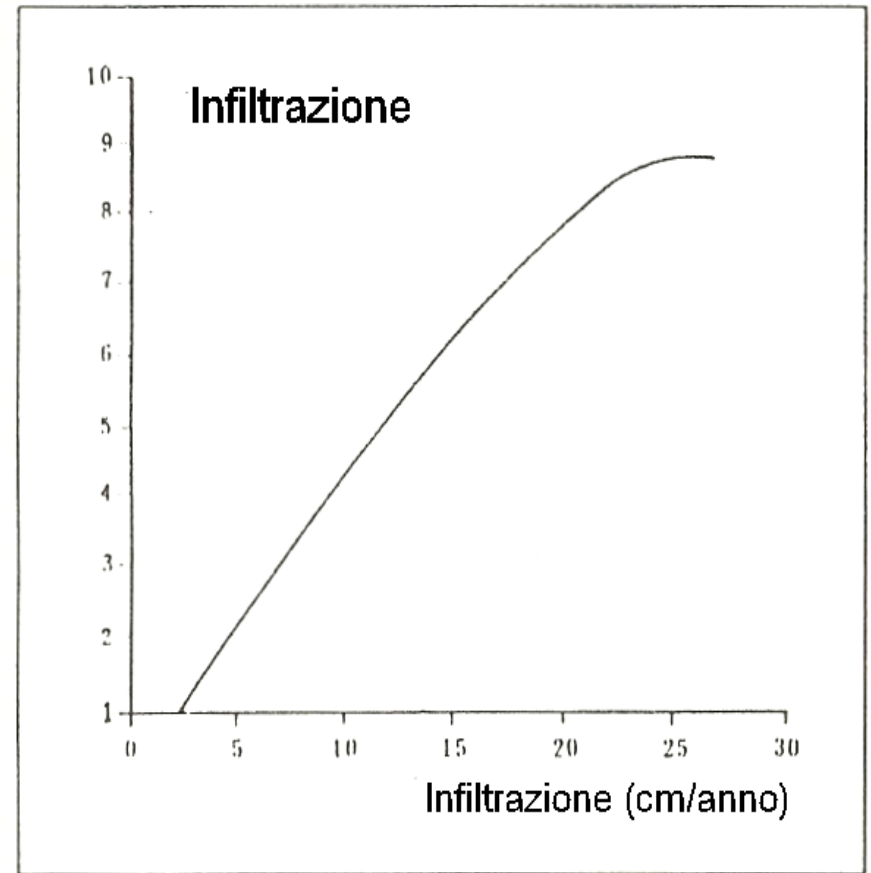
C(onducibilità idraulica dell'acquifero)

PUNTEGGI

Distanza tra la superficie del suolo
e quella della falda
(soggiacenza) - D

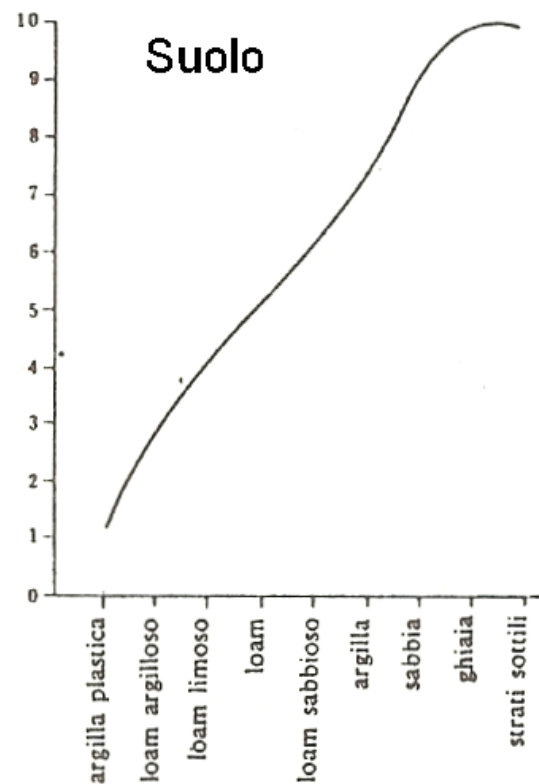
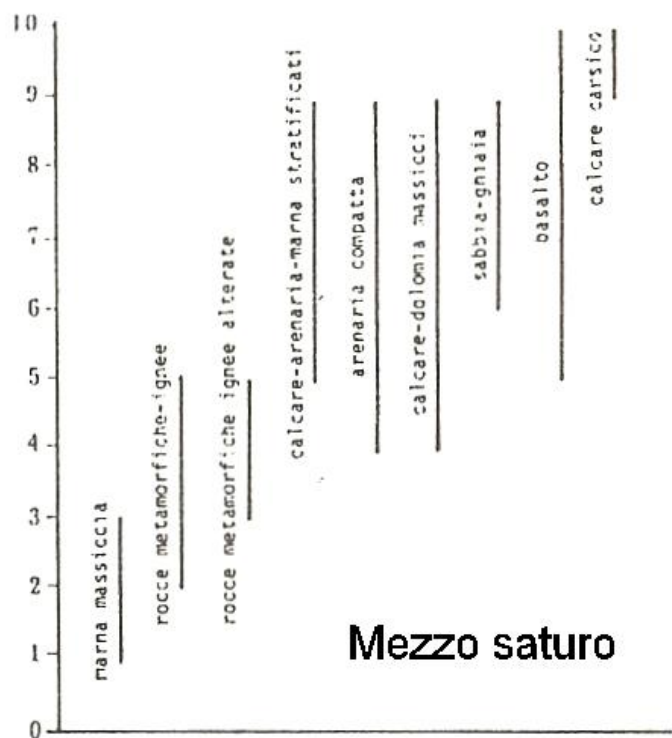


Ricarica dell'acquifero - R

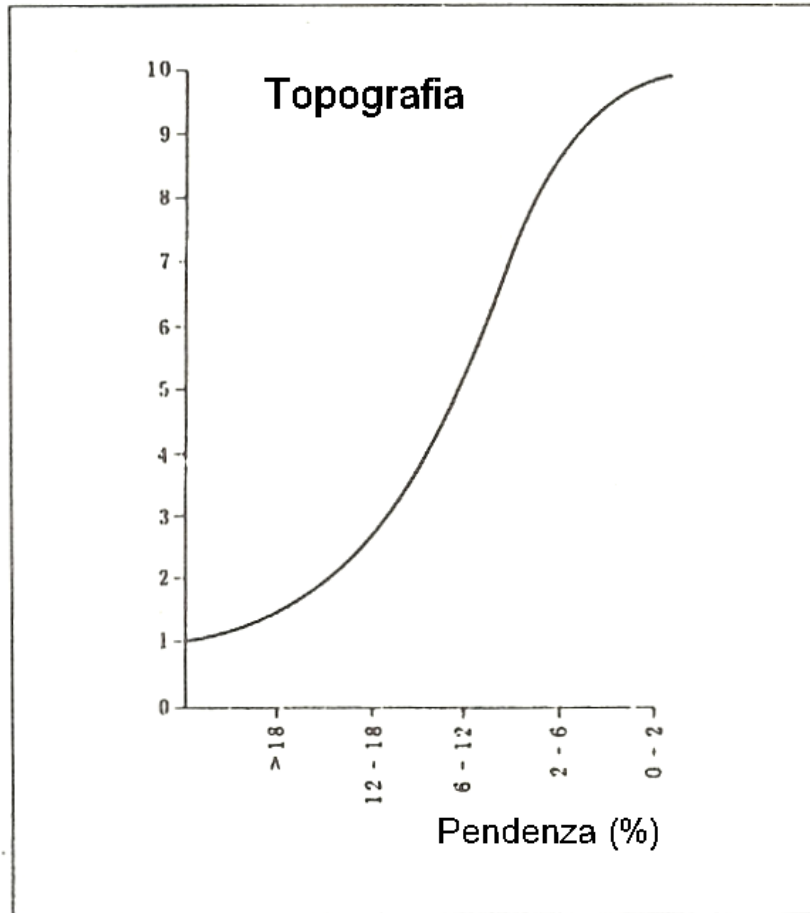


Acquifero presente nel sottosuolo - A

Suolo che costituisce la copertura superficiale - S



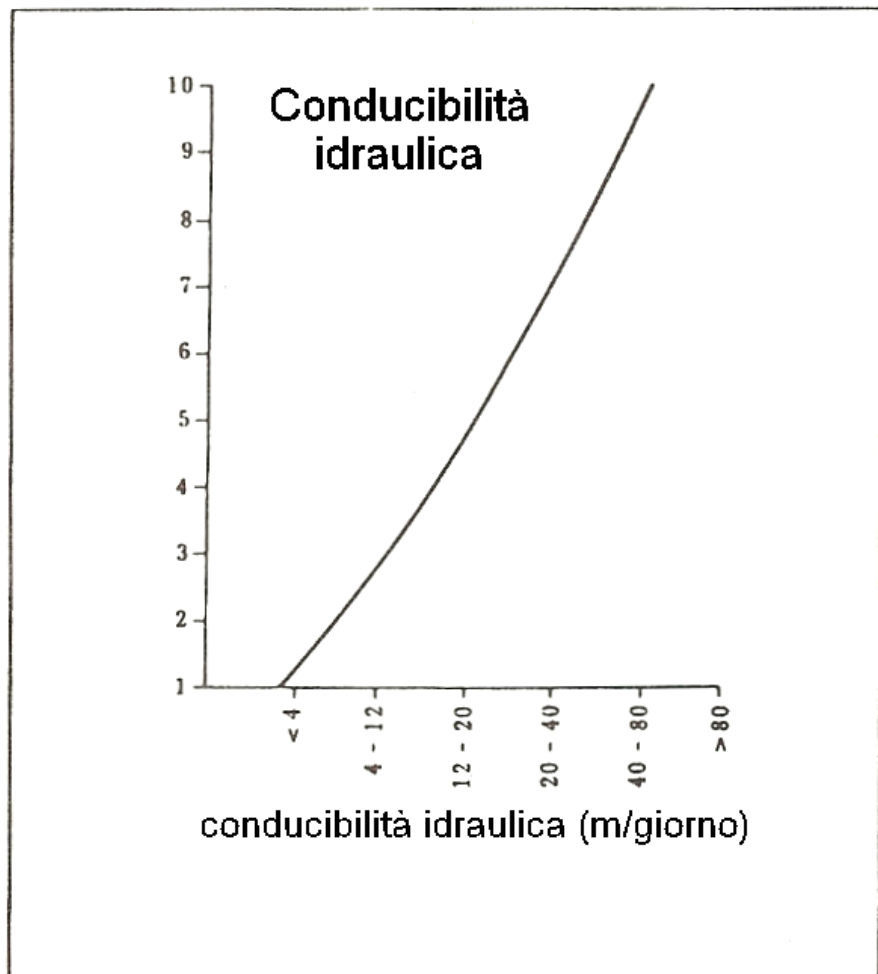
Topografia dell'area - T



Impatto della zona non satura - I



Conducibilità idraulica dell'acquifero - C



PESI

Parametro	Area senza attività agricole	Area con attività agricole
D_i	5	5
R_r	4	4
A_a	3	3
S_s	2	5
T_t	1	3
I_i	5	4
C_c	3	2

Indice DRASTIC I_D

$$I_D = DD_d + RR_r + AA_a + SS_s + TT_t + II_i + CC$$

METODO SINTACS (Civita M., 1994)

L'acronimo deriva dalle denominazioni dei parametri che vengono presi in considerazione:

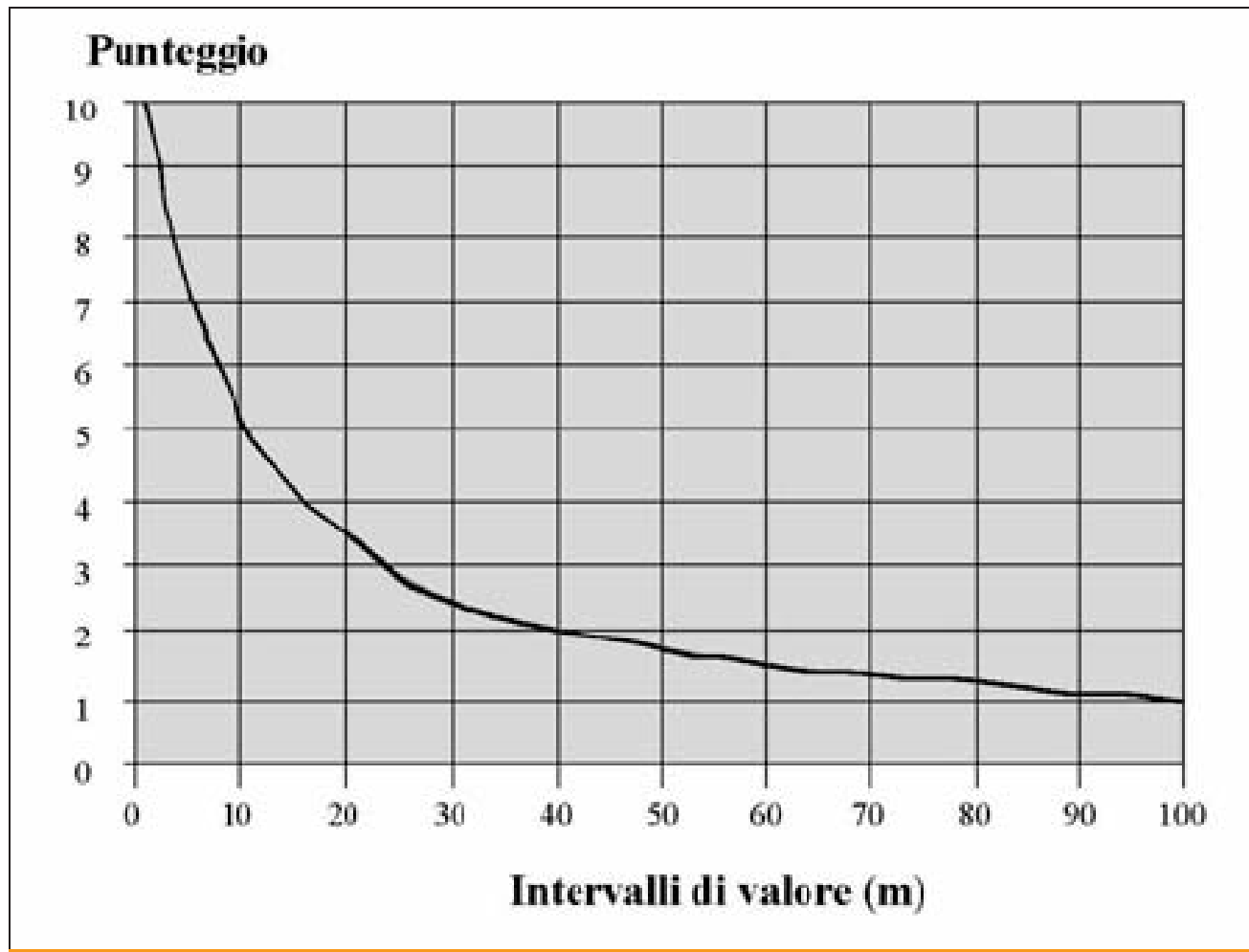
parametri

- Soggiacenza;
- Infiltrazione efficace;
- Non saturo (effetto di autodepurazione del);
- Tipologia della copertura;
- Acquifero (caratteristiche idrogeologiche del);
- Conducibilità idraulica dell'acquifero;
- Superficie topografica (acclività della);

PUNTEGGI - P

SOGGIACENZA - S

valore minimo di soggiacenza registrato nell'anno idrologico corrispondente alla massima escursione del livello piezometrico dell'acquifero d'interesse

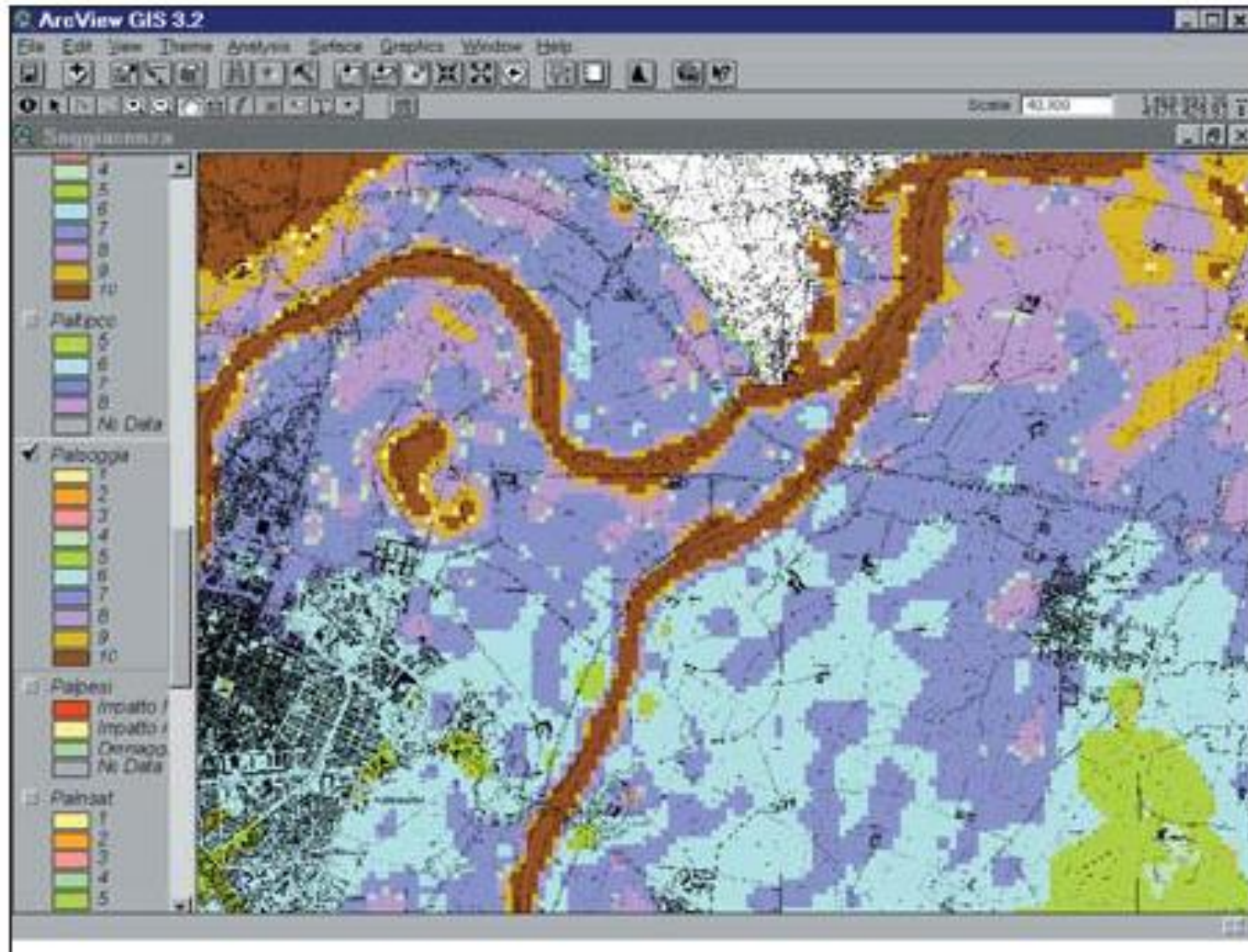


La soggiacenza per un acquifero confinato corrisponde sempre alla profondità del letto del confinante superiore, misurata dal piano - campagna.

In presenza di un acquifero semiconfinato è necessario stabilire, in base ai dati disponibili, se sussistono travasi attivi tra la superficie (o/e l'eventuale acquifero libero) ed il semiconfinato o si è in presenza di fenomeni di leakage. Ove sussista il primo caso, il mezzo semiconfinante è considerato parte dell'insaturo e la sua presenza influirà sul punteggio da attribuire a tale parametro; nel secondo caso, la pressione dell'acquifero si oppone alla penetrazione degli inquinanti e pertanto il punteggio da assegnarsi alla soggiacenza deve tenerne conto.

Per gli acquiferi non confinati la soggiacenza corrisponde alla profondità a cui si trova la zona satura.

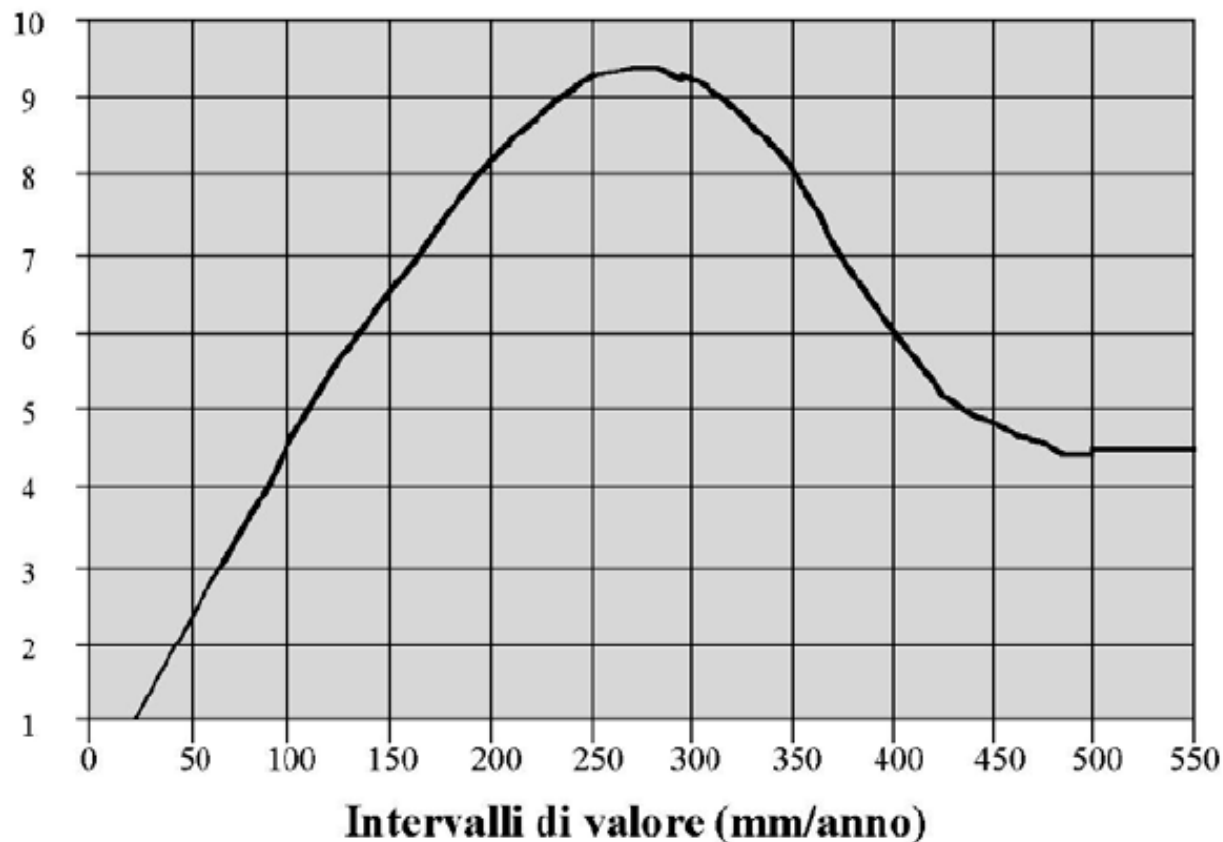
Esempio di cartografia della soggiacenza – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)



INFILTRAZIONE - I

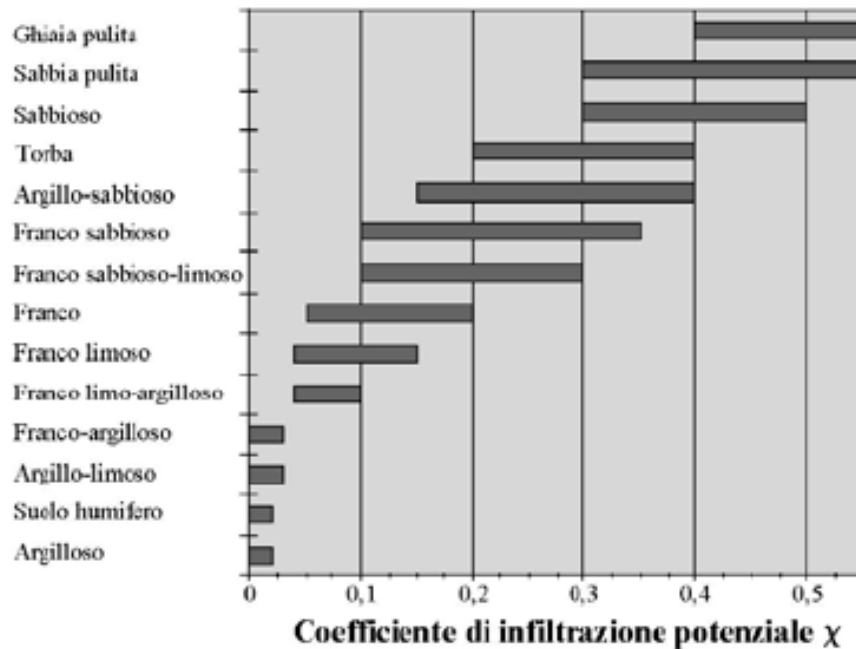
L'infiltrazione efficace assume notevole importanza nella valutazione della vulnerabilità poiché essa provoca il trascinamento in profondità degli inquinanti, ma anche la loro diluizione, dapprima nell'insaturo e quindi nella zona di saturazione.

Punteggio



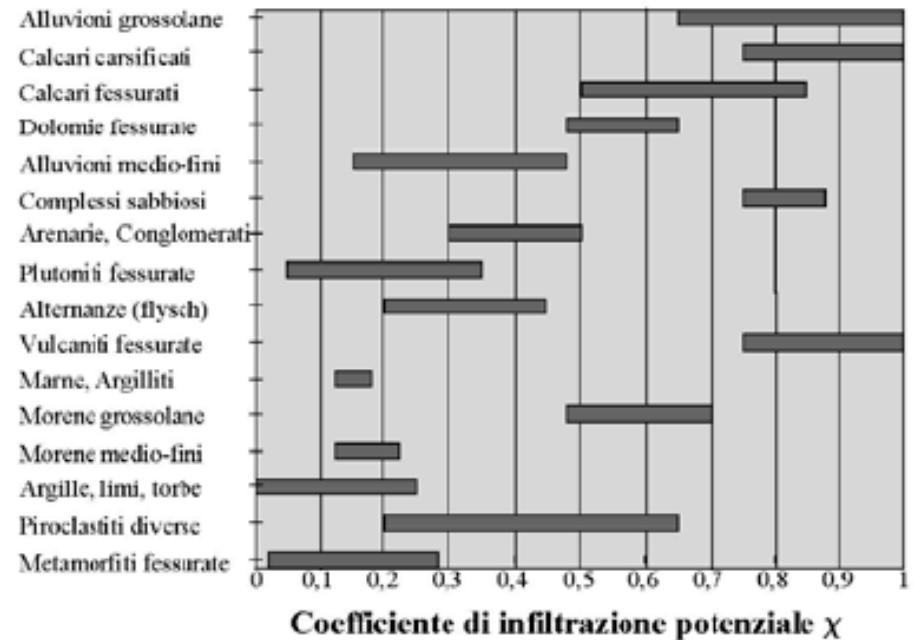
Coefficiente di infiltrazione potenziale

Tessitura dei suoli



Copertura con suoli spessi (> 1 m)

Complessi idrogeologici



Rocce affioranti o con scarsa copertura

Copertura con suoli spessi

$$I = P \cdot \chi \quad (\text{mm/anno})$$

P = precipitazione media annua (mm/anno)

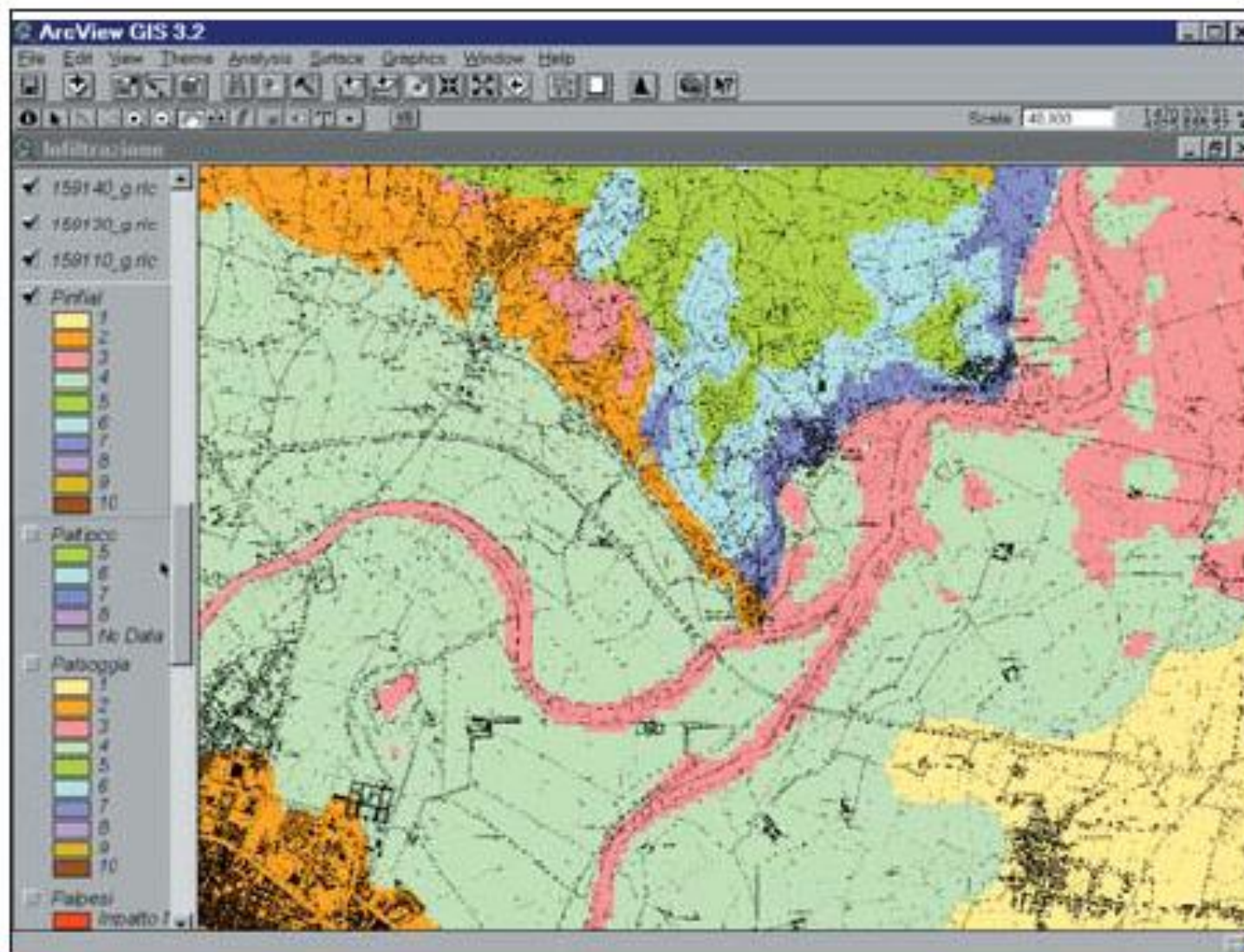
Rocce affioranti o con scarsa copertura

$$I = Q \cdot \chi \quad (\text{mm/anno})$$

$$Q = P - E_r$$

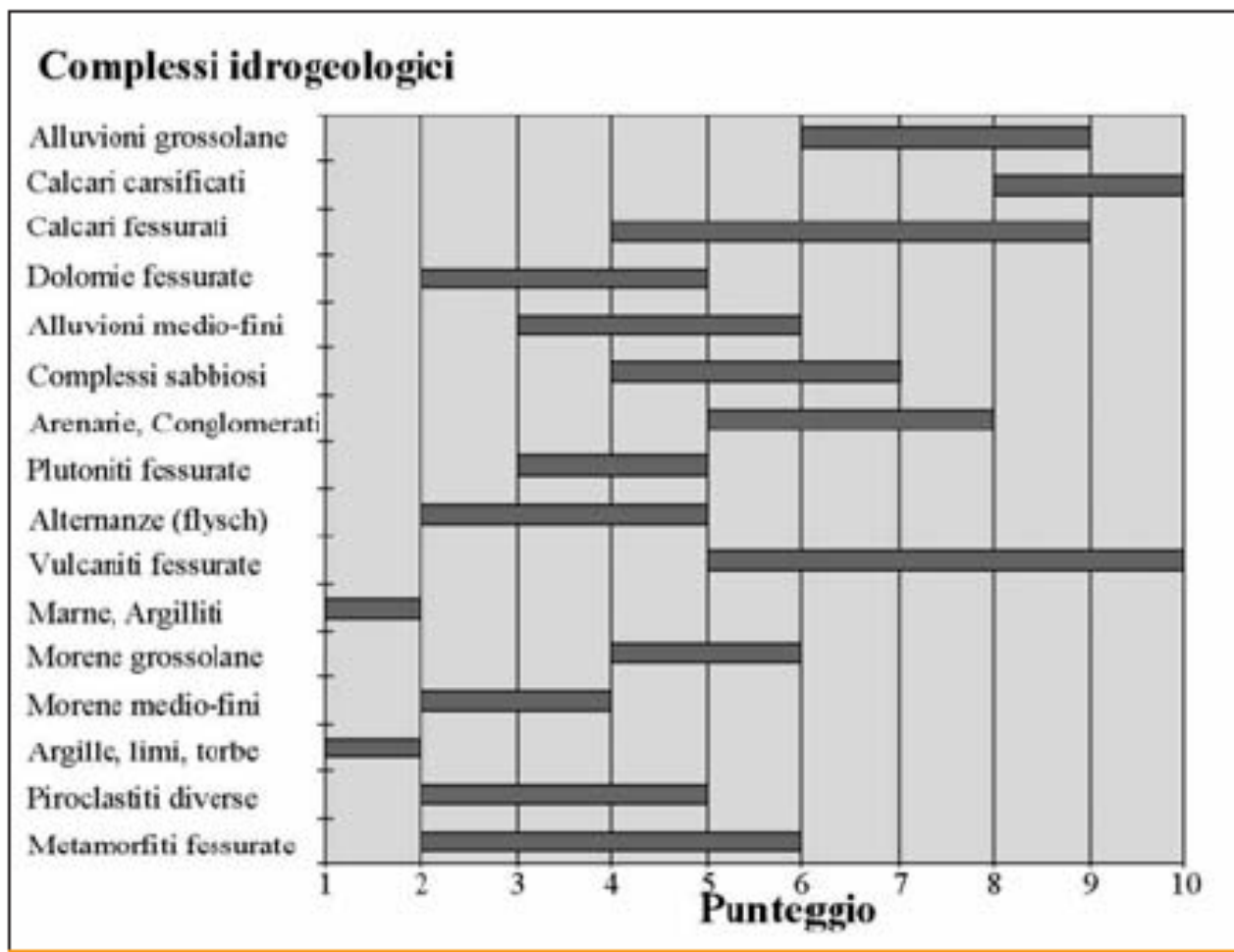
E_r = evapotraspirazione (mm/anno)

Esempio di cartografia dell'infiltrazione – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)



AUTODEPURAZIONE DEL NON SATURO - N

All'interno dello spessore insaturo fattori fisici, chimici e biologici operano in sinergia favorendo i processi di attenuazione nel tempo

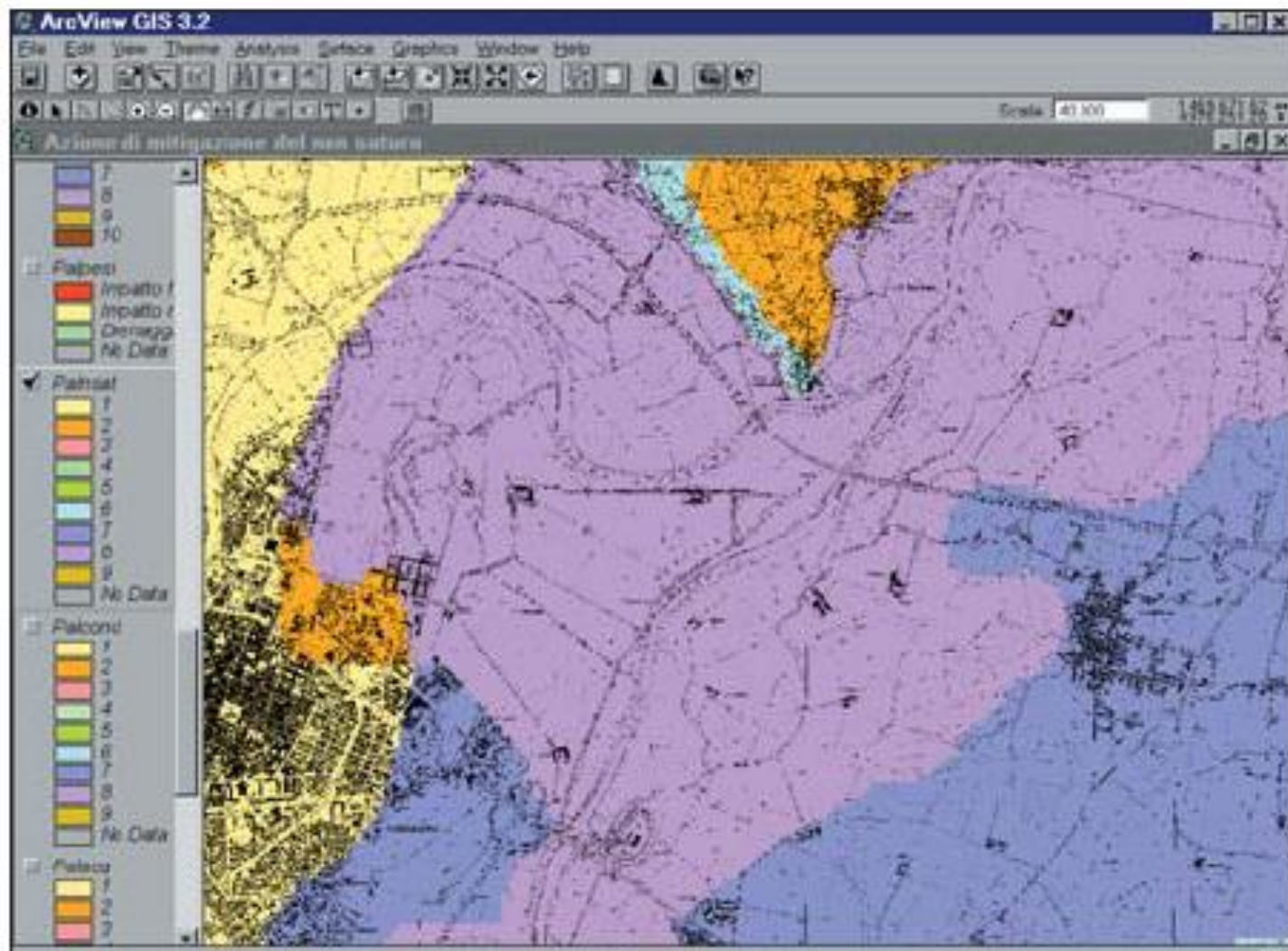


Nel caso di un mezzo insaturo sia costituito da più litotipi si opera una valutazione ponderata del peso mediante la relazione

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n N_i h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

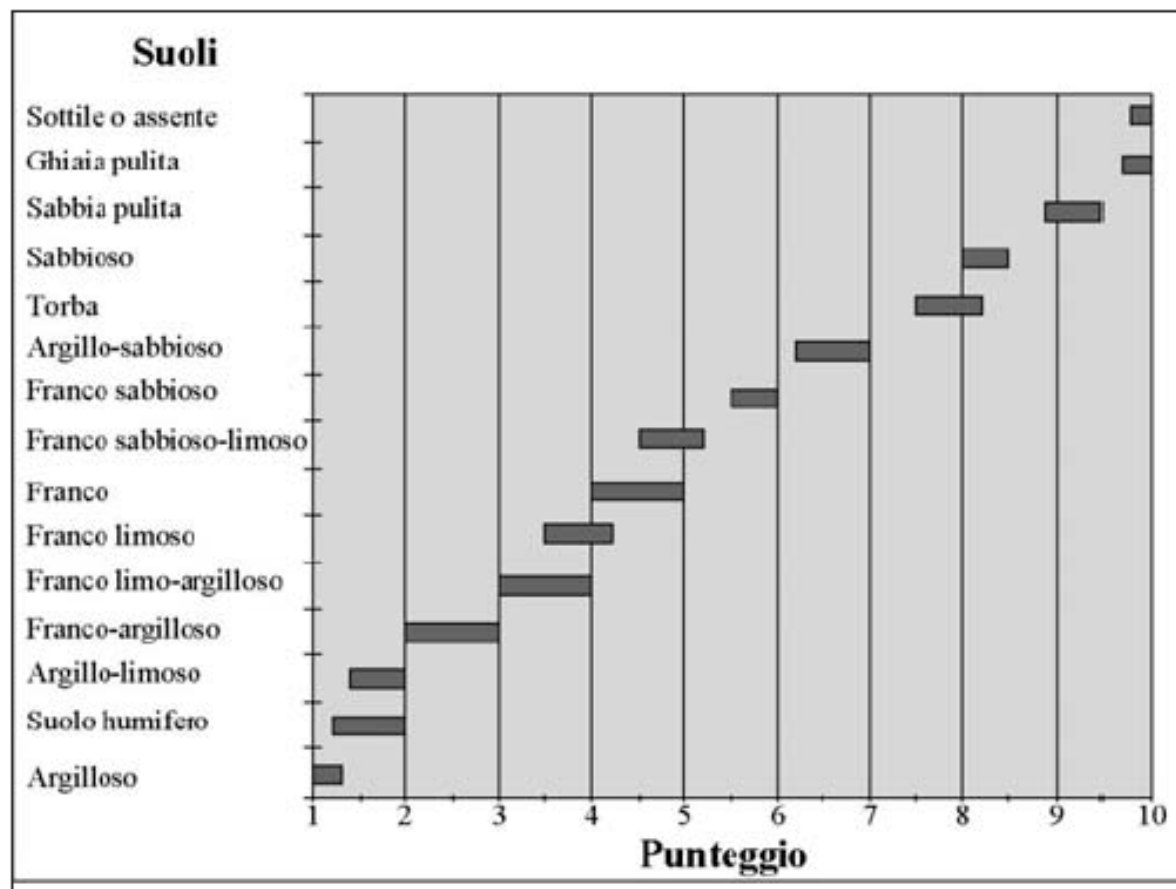
essendo N_i ed h_i i punteggi e gli spessori dei singoli litotipi

Esempio di cartografia dell'autodepurazione nel non saturo – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)

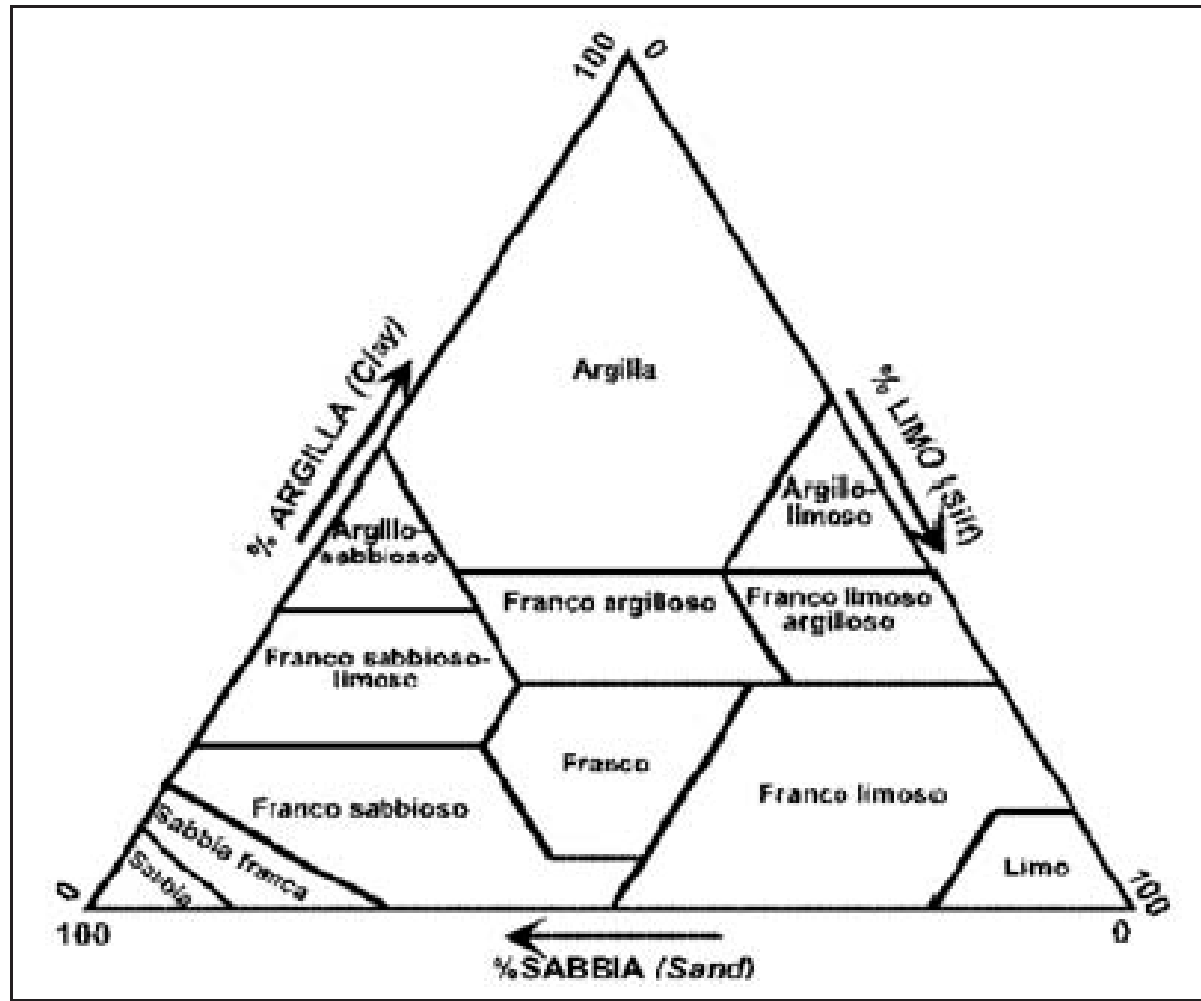


TIPOLOGIA DELLA COPERTURA - T

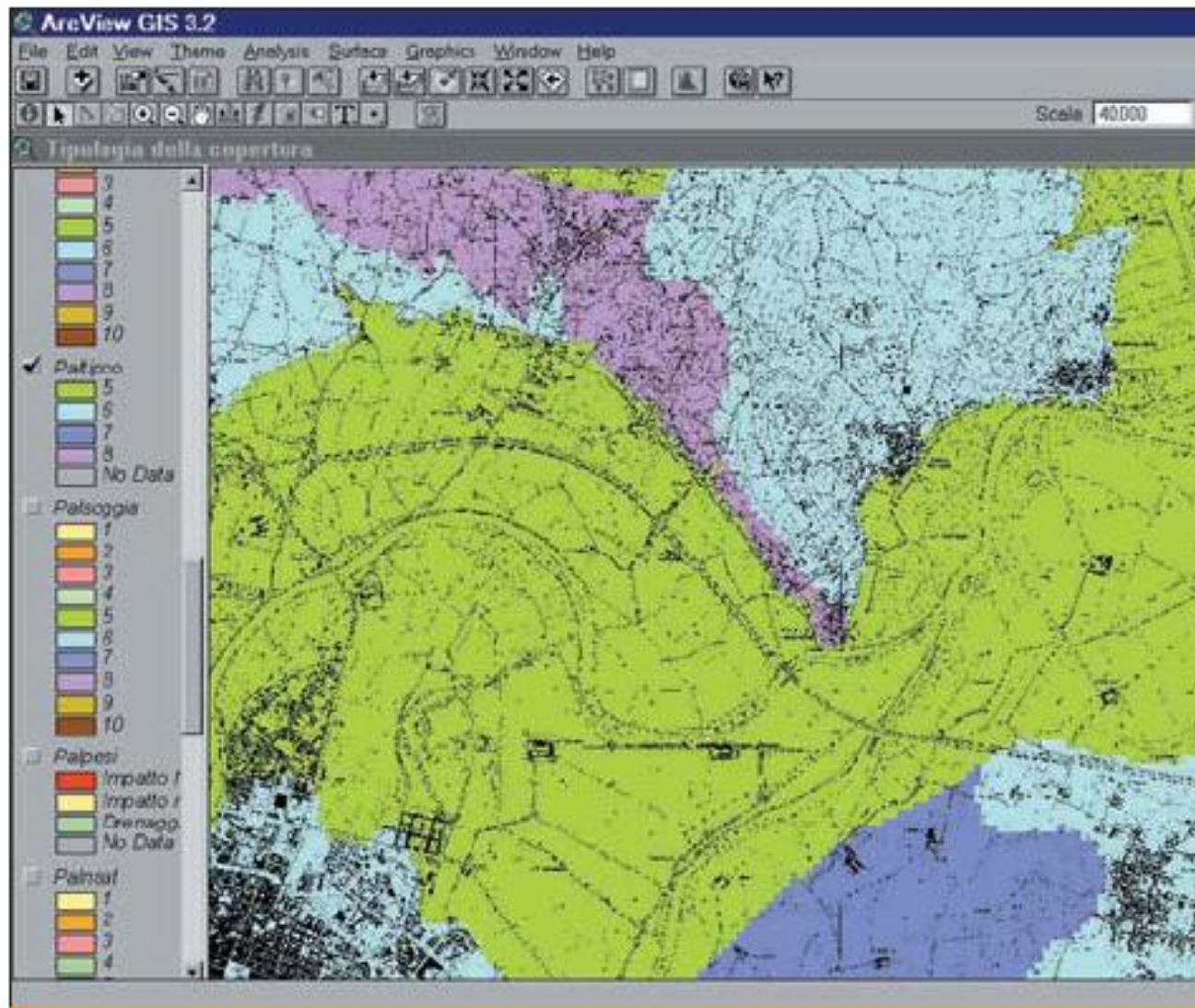
La tipologia dei terreni di copertura, in genere, e dei suoli, in particolare, riveste un ruolo della massima importanza nella mitigazione dell'impatto degli inquinanti e nella valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi



Triangolo tessiturale USDA (Soil Conservation Service, 1951)

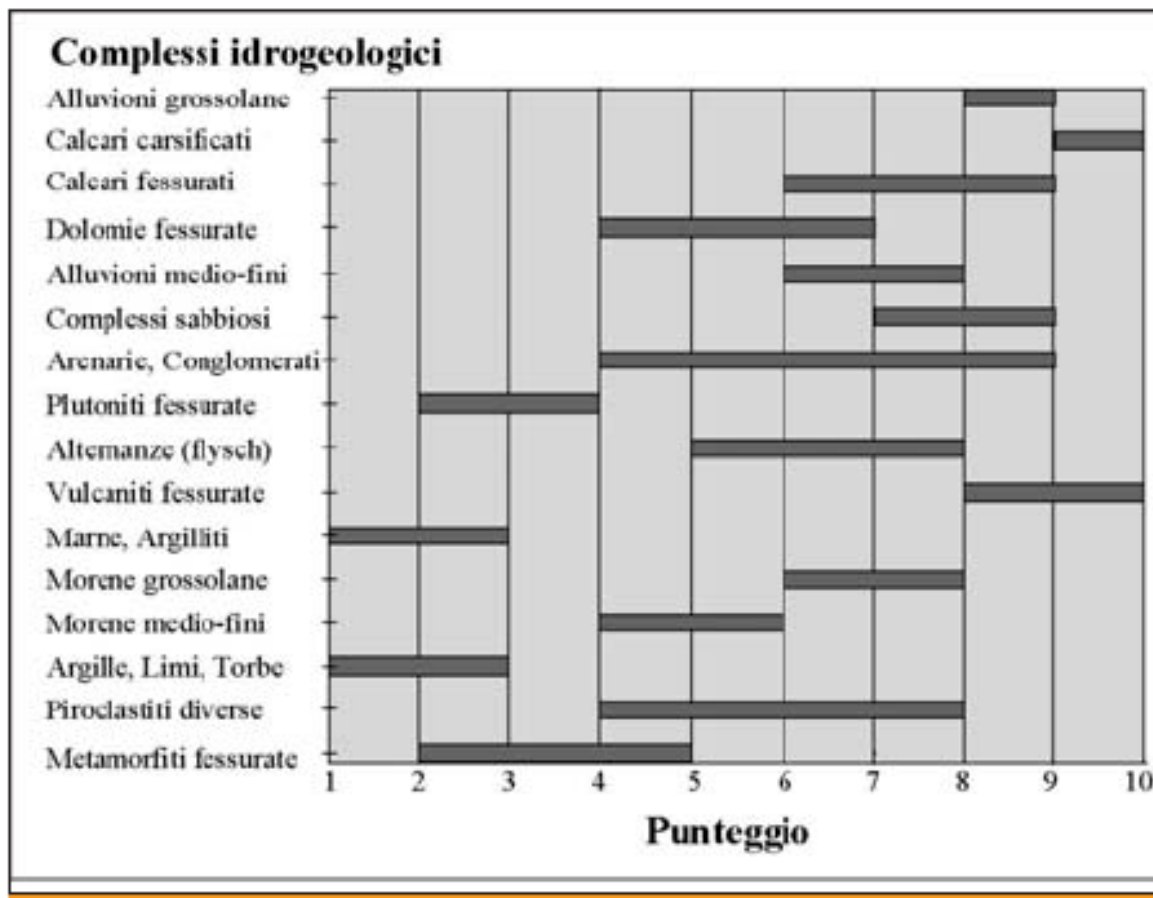


Esempio di cartografia della tipologia della copertura – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)

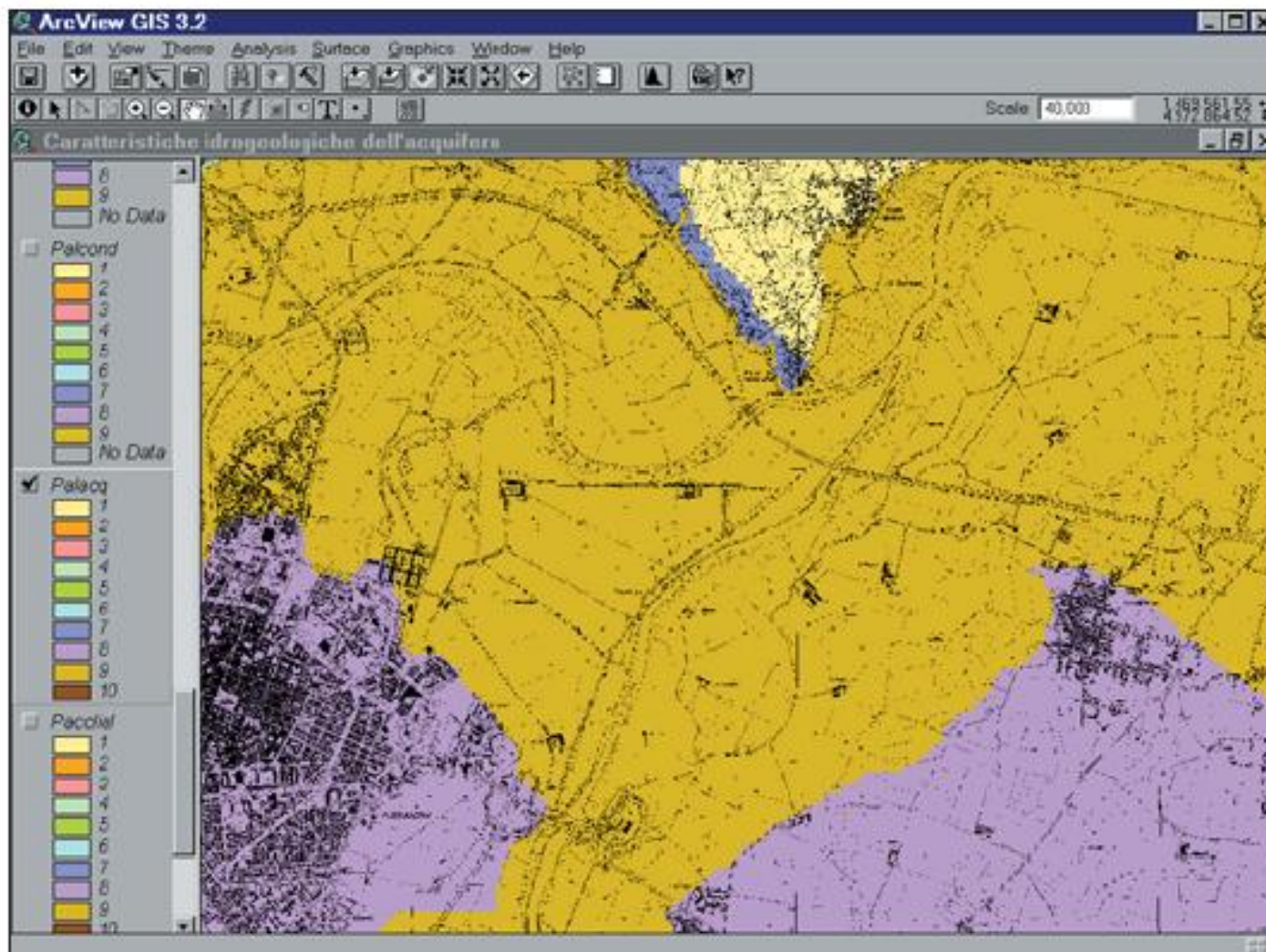


TIPOLOGIA DELL'ACQUIFERO - A

La tipologia dell'acquifero descrive i processi che avvengono al di sotto della superficie piezometrica, quando un inquinante idroveicolato giunge a mescolarsi con l'acqua sotterranea dopo aver superato la copertura e l'insaturo

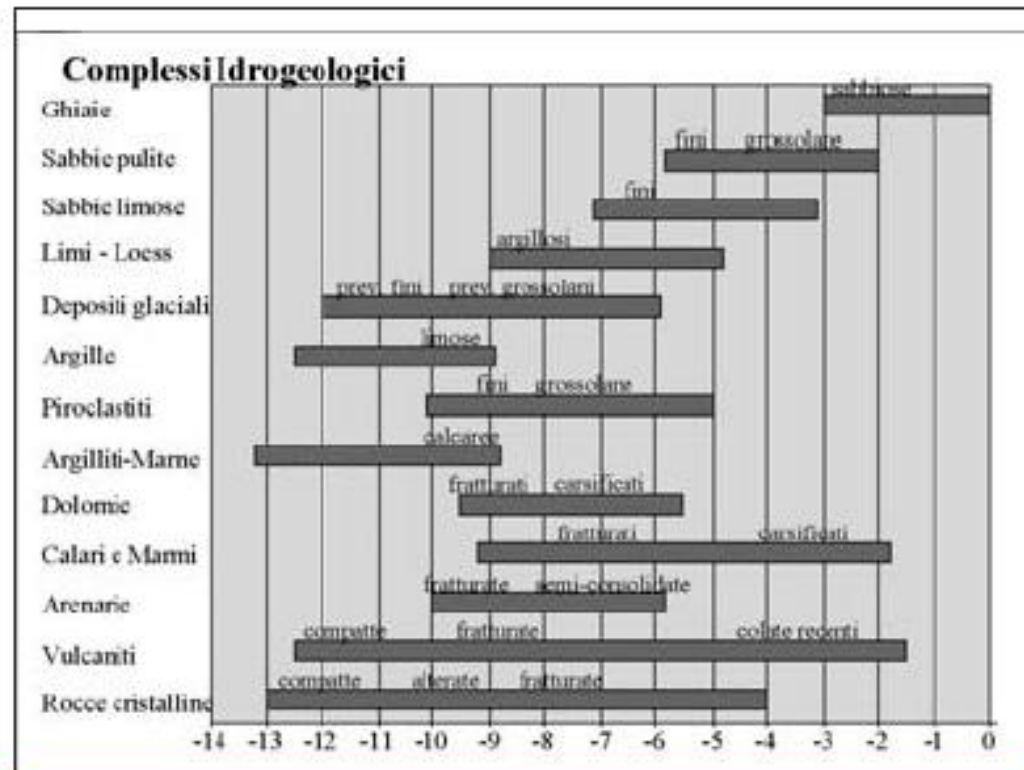
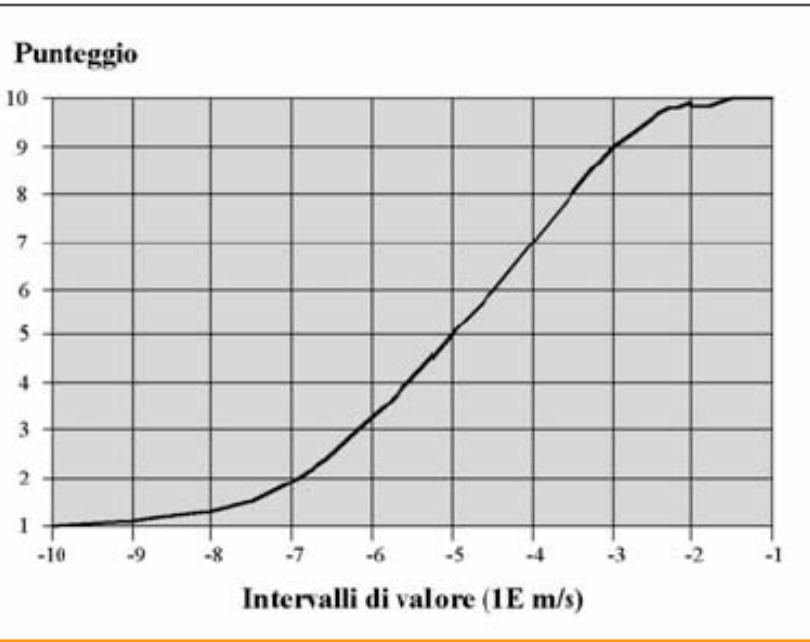


Esempio di cartografia della tipologia dell'acquifero – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)

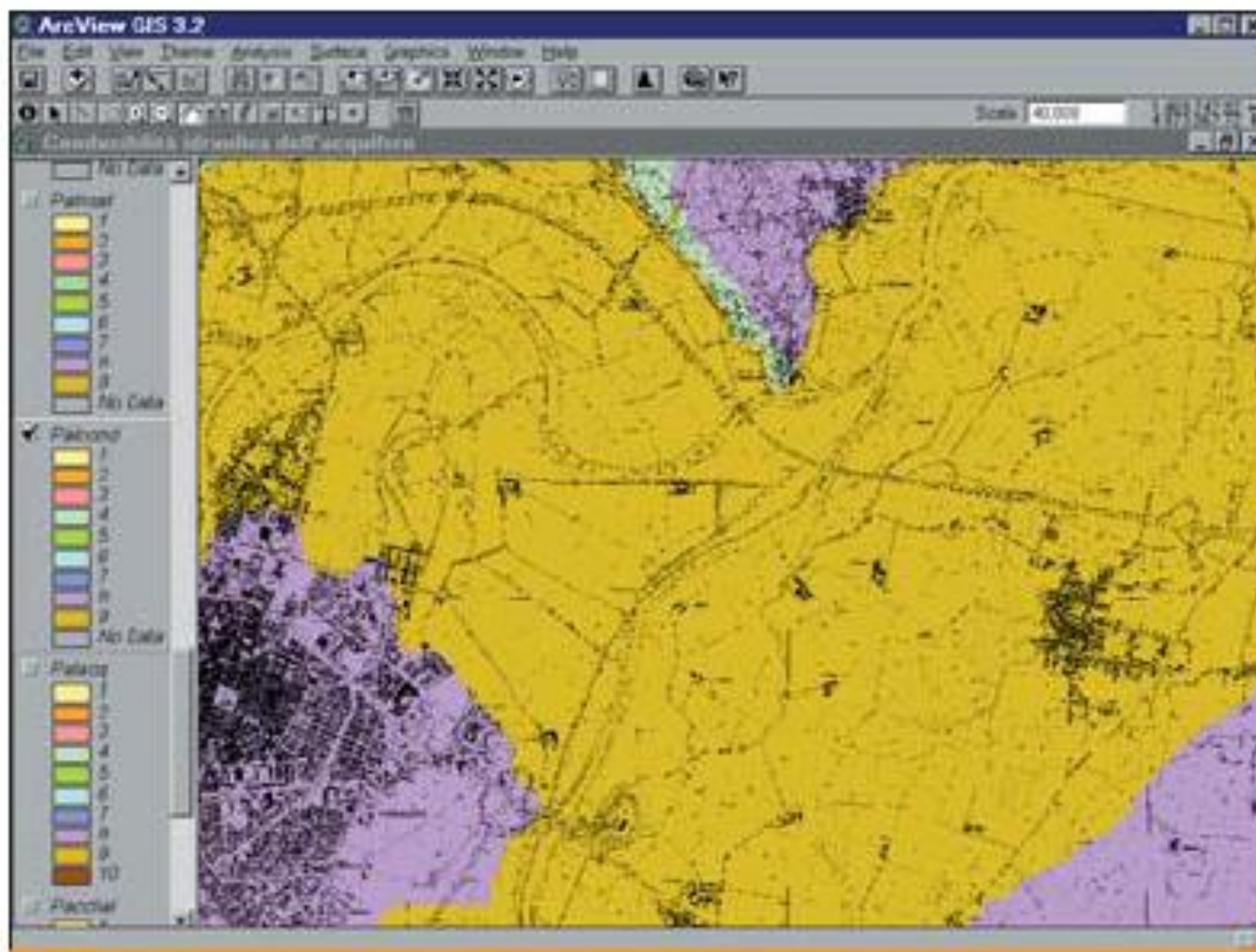


CONDUCIBILITA' IDRAULICA - C

La conducibilità idraulica è la capacità di spostamento dell'acqua sotterranea nel mezzo saturo e dunque di un inquinante in soluzione.

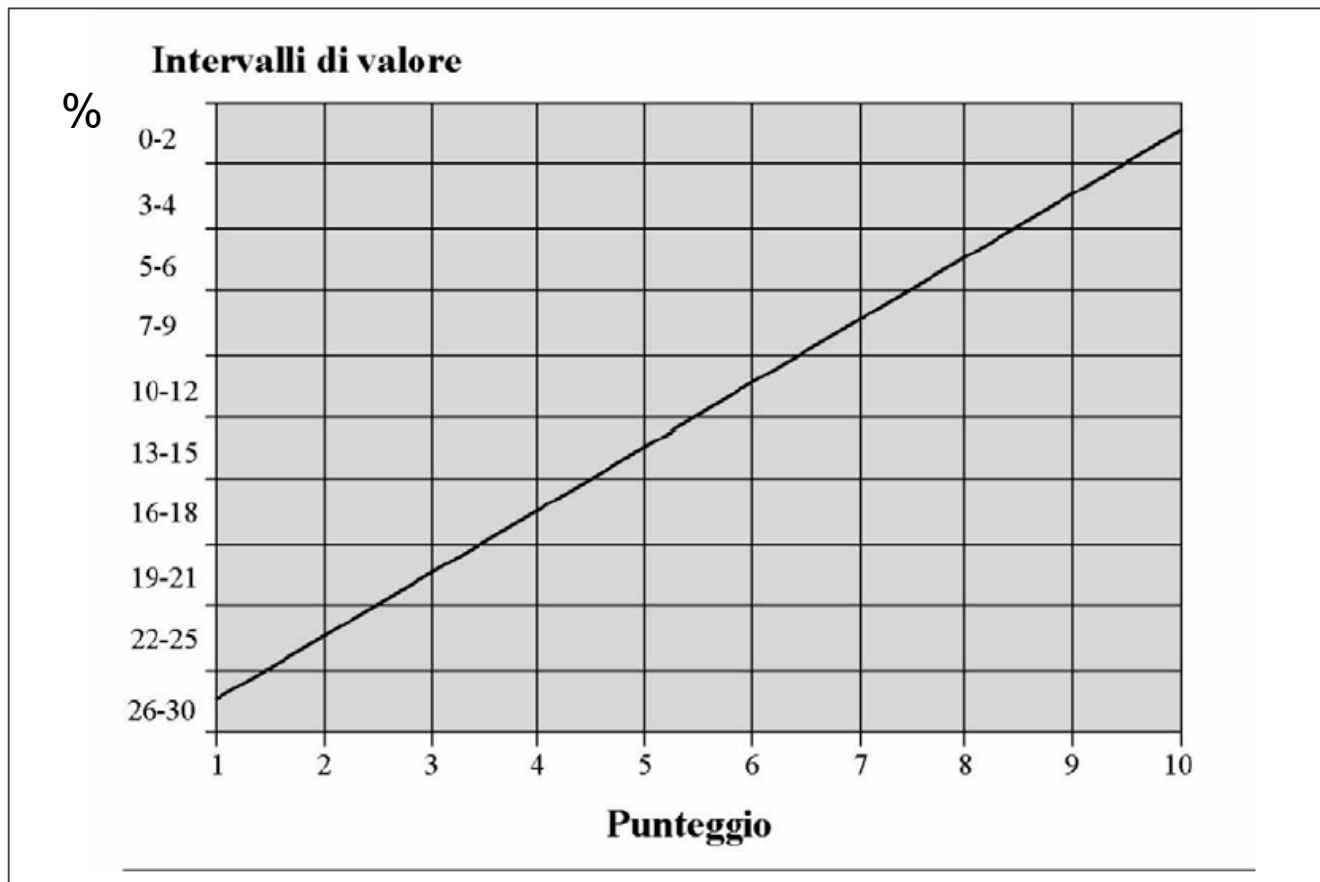


Esempio di cartografia della conducibilità idraulica dell'acquifero – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)

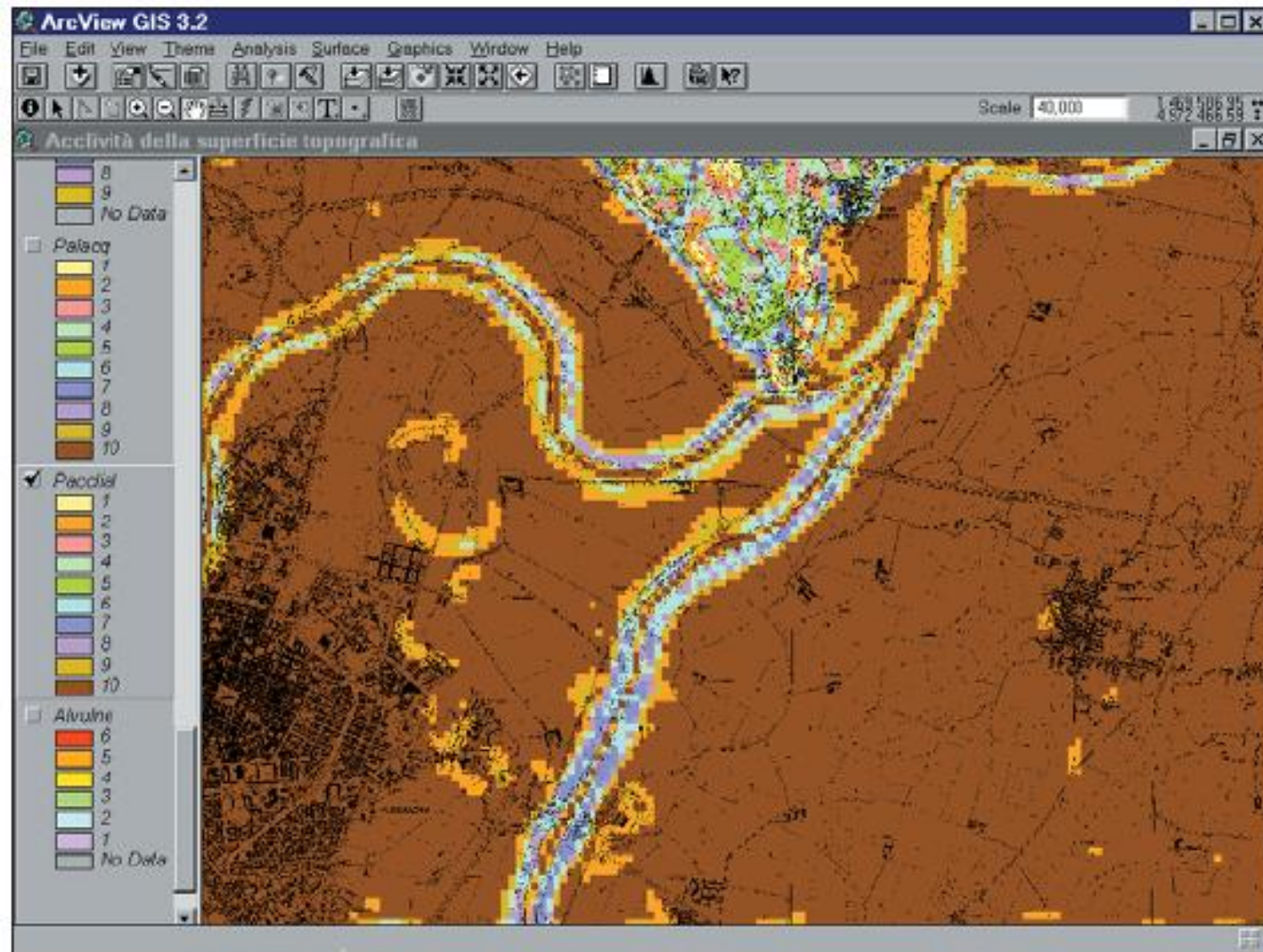


ACCLIVITÀ DELLA SUPERFICIE TOPOGRAFICA - S

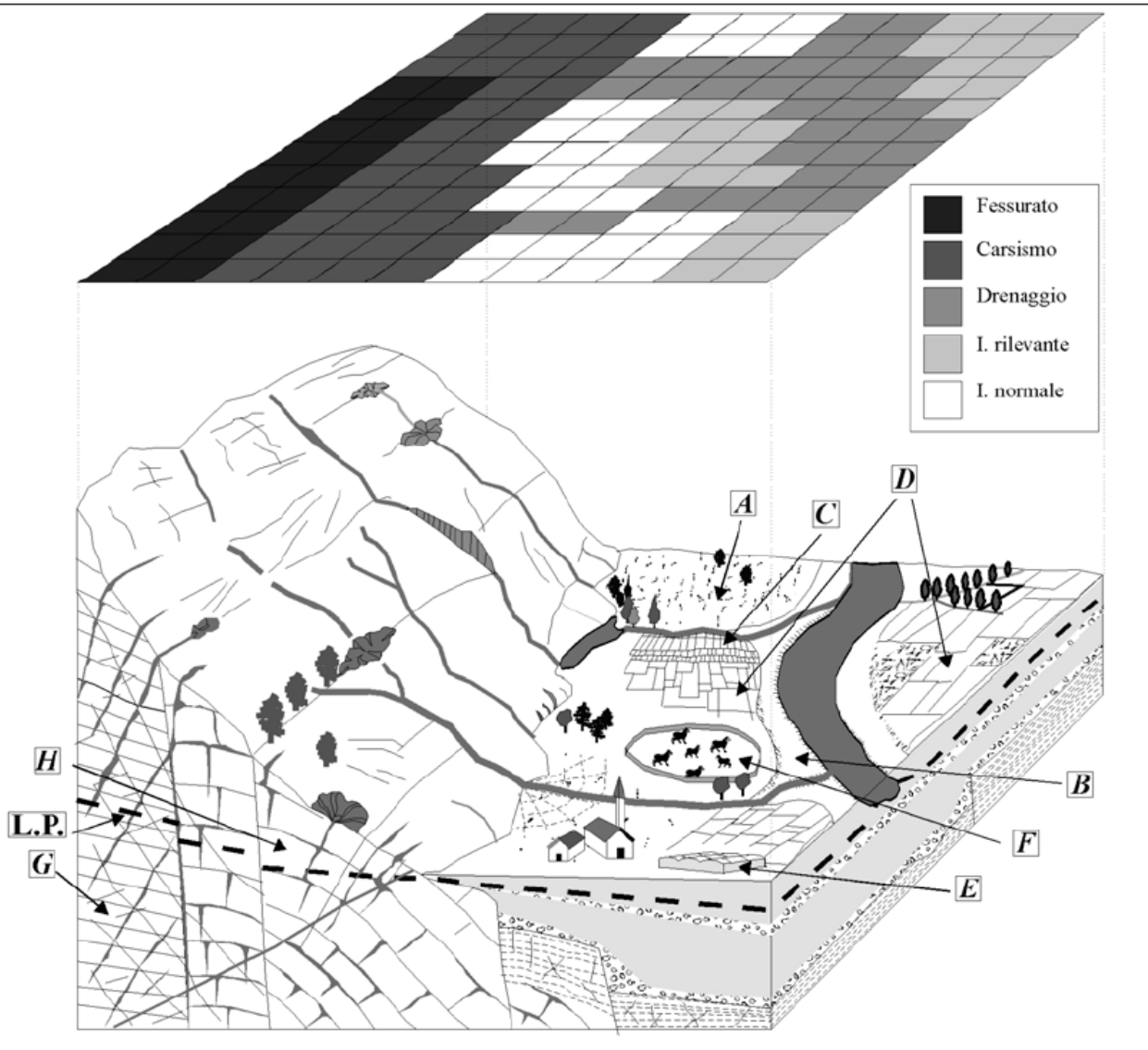
L'acclività influisce sulla valutazione della vulnerabilità intrinseca perché da essa dipende la quantità di ruscellamento che si produce a parità di precipitazione e la velocità di spostamento dell'acqua (e di un inquinante in soluzione) sulla superficie.



Esempio di cartografia dell'acclività della superficie topografica – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)



SCHEMA PER LA SELEZIONE DEI PESI



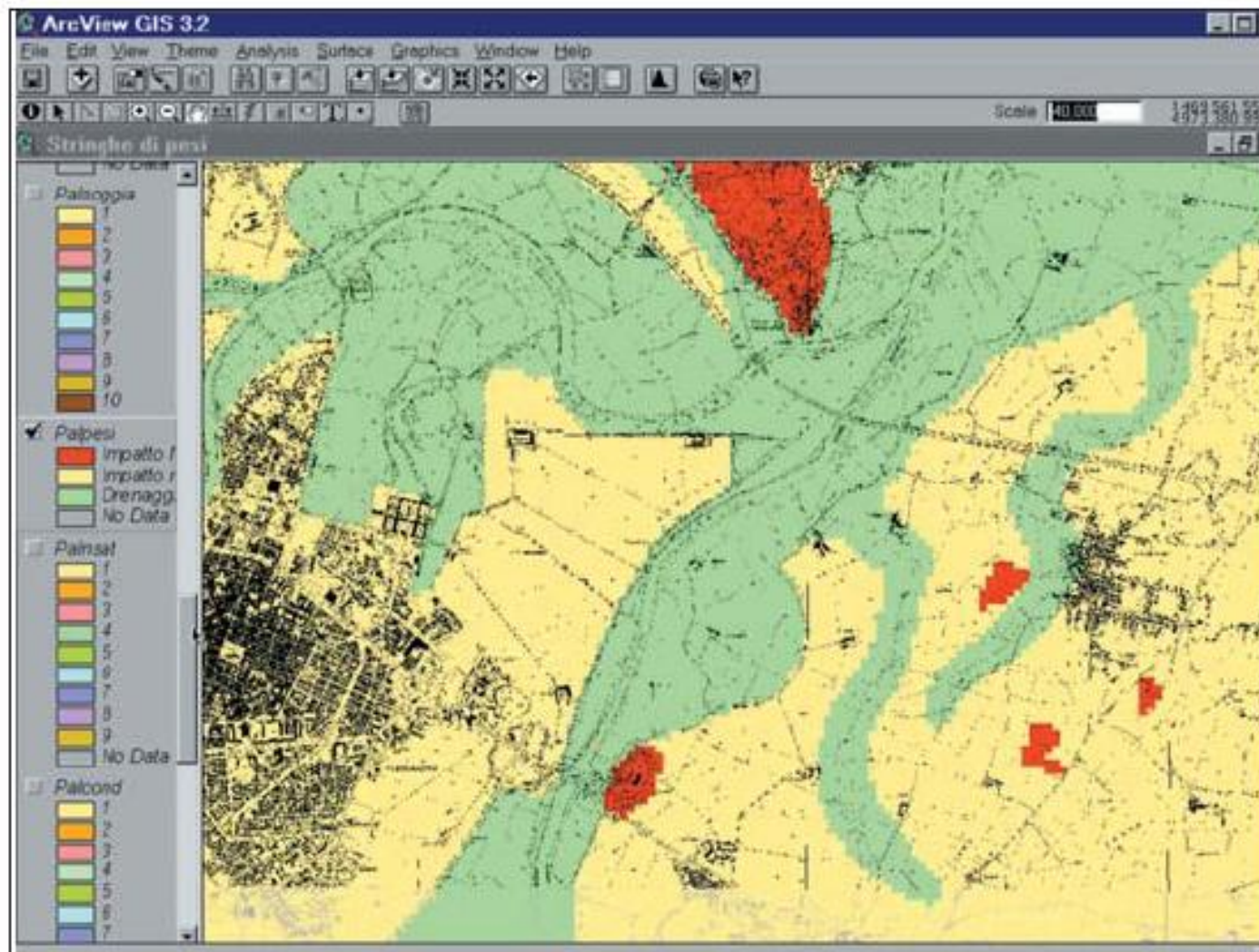
A = Area incolta
B = Area golenale
soggetta ad
alluvionamenti
C = Irrigazione per
sommersione
D = Colture con supporto
chimico
E = Serre
F = Allevamenti
G = Acquiferi in rocce
fessurate
H = Acquiferi in rocce
carbonatiche

PESI - W

Parametro	Impatto normale	Impatto rilevante	Drenaggio	Carsismo	Fessurato
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	3	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	3	2	2	5	4

Esempio di cartografia dei pesi

– area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)



INDICE DI VULNERABILITA' SINTACS

$$I_s = \sum_{i=1}^7 P_i W_i$$

Bb = Molto basso

B = Basso

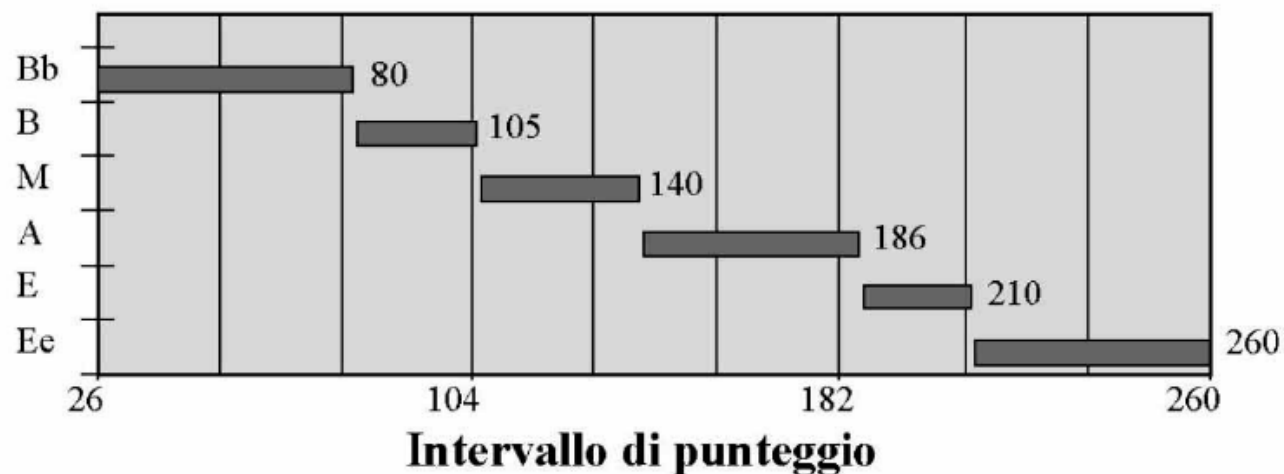
M = Medio

A = Alto

E = Elevato

Ee = Estremamente elevato

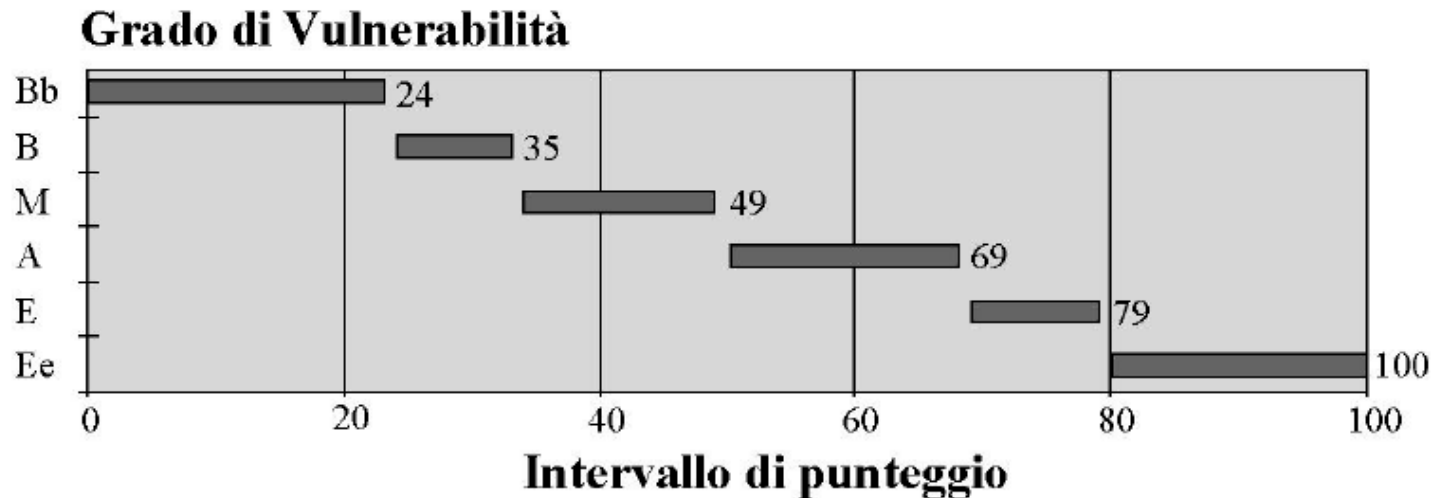
Grado di Vulnerabilità



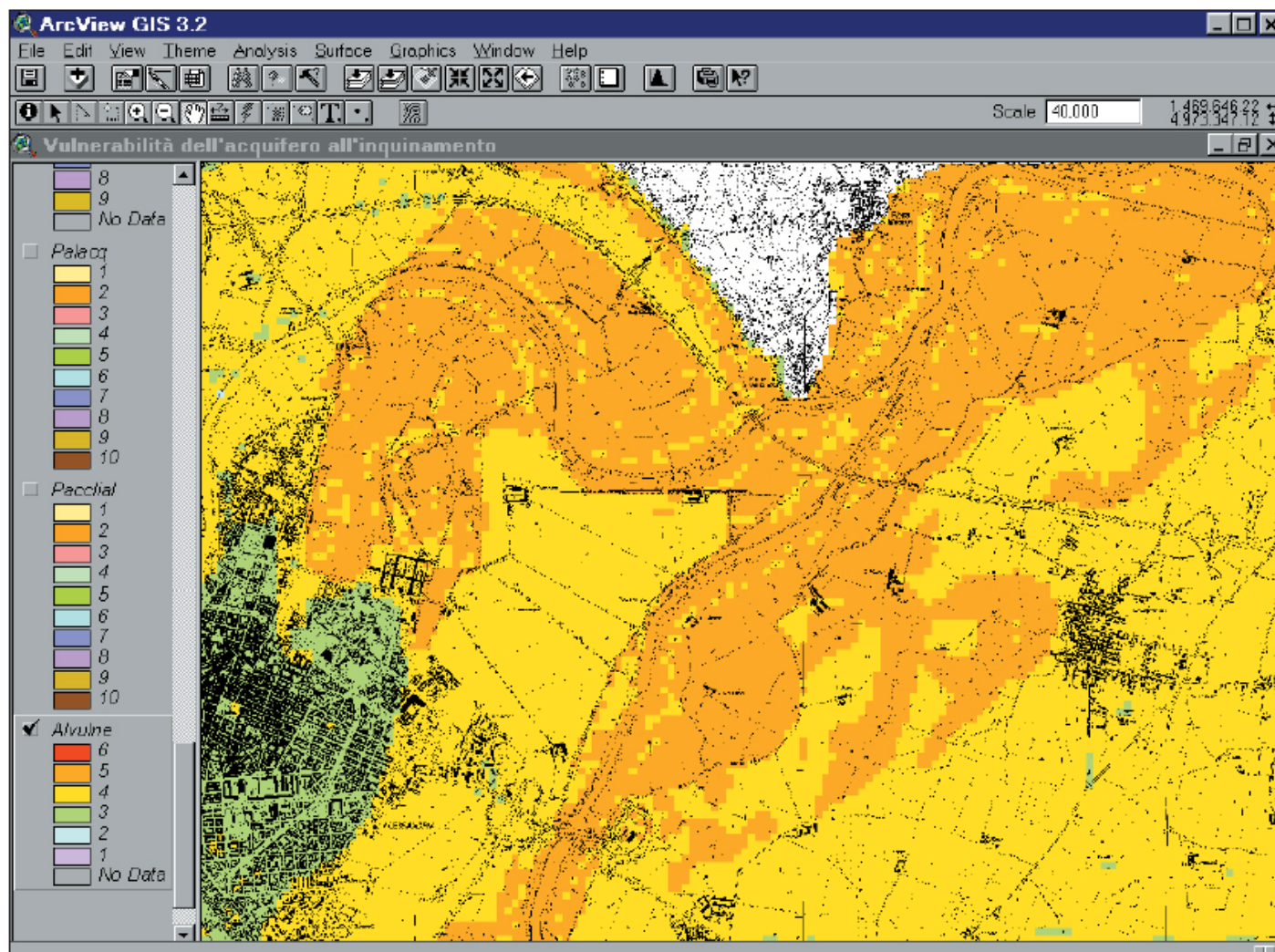
INDICE SINTACS normalizzato

$$I_{SN} = \frac{I_s - I_{smin}}{I_{smax} - I_{smin}} 100$$

$$I_{smin} = 26$$
$$I_{smax} = 260$$



Esempio di cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento – area di Alessandria (da Regione Piemonte, 2000)



Linea-guida per l'uso delle Carte di vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento (Civita M. et al., 1995)

Grado di vulnerabilità intrinseca	Fonti puntuali	Fonti non-puntuali
Estremamente elevata (Ee) ↓ Elevata (E)	a. Alcune attività ad alto rischio d'inquinamento sono fortemente sconsigliate. Se preesistenti o non spostabili in siti più idonei, sono da sottoporre a vincoli e controlli rigorosi e azioni di prevenzione che innalzano sensibilmente i costi di insediamento e di gestione. Da escludere le industrie a rischio previste dalla direttiva CEE Seveso (ora D.Lgs. 334/99) come recepito dalle norme italiane nonché tutte le attività che comportano uno scarico diretto o indiretto nelle acque sotterranee delle sostanze degli elenchi I e II allegati al D.Lgs. 132/92 o le operazioni di eliminazione e di deposito di rifiuti. b. Non sono da effettuare scarichi in acque superficiali di sostanze inquinanti o deve comunque essere garantito che, in tutte le condizioni di portata del corso d'acqua che è in connessione con le falde idriche, siano rispettate caratteristiche di qualità almeno entro quella indicata dalla Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2).	A. Sono da proibire scarichi inquinanti in acque superficiali o deve essere comunque garantito che, in tutte le condizioni di portata dei corsi d'acqua, nei tratti in connessione con gli acquiferi, siano garantite condizioni di qualità consone a quanto indicato nella Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2). B. Devono mettersi in essere revisioni delle normali pratiche agronomiche o attivati nuovi indirizzi colturali al fine di prevenire la dispersione di nutrienti e fitofarmaci nell'acquifero soggiacente: applicazione del codice di buona pratica agricola (Dir. CEE 91/676); iniziative di lotta guidata/integrata; scelta di nuovi indirizzi colturali tali da controllare la diffusione nel suolo e nel sottosuolo di azoto e altri nutrienti. C. Qualora non sia garantito, nonostante gli interventi suindicati, che le acque superficiali rientrino in Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2), si dovranno adottare interventi di attenuazioni dei carichi derivanti dal ruscellamento mediante tecniche a basso contenuto energetico con possibilità di recupero dei nutrienti. D. Forte limitazione di smaltimento dei liquami zootecnici E Vedi quanto riportato al punto D. F L'uso di fertilizzanti e liquami zootecnici è ammissibile previa adozione di un piano di concimazione laddove la gestione è affidata a servizi con sistemi di autocontrollo verificabili. Da privilegiare forme di gestione consortili con partecipazione della Pubblica Amministrazione.
Alta (A) ↓ Media (M)	c. Devono essere controllate tutte le attività che possono modificare direttamente o indirettamente la qualità delle RIS. Per ciascuna di esse devono essere previsti appropriati interventi di attenuazione dei carichi inquinanti. d. Particolari precauzioni sono da prevedersi nell'autorizzazione le attività che comportano uno scarico diretto o indiretto nelle acque sotterranee delle sostanze dell'elenco II allegato al D.Lgs. 132/92 o le operazioni di eliminazione e di deposito di rifiuti. Le autorizzazioni devono tenere conto della natura a quantità degli effluenti in relazione alle caratteristiche idrogeologiche ed idrauliche del corpo ricettore. e. Se lo scarico delle attività insediate o previste deve avvenire in corsi d'acqua che interessano zone con grado di vulnerabilità Ee o E, si applica quanto previsto al punto C.	
Bassa (B) ↓ Estremamente bassa (Bb)	f. Non è previsto nessun vincolo per le attività insediate o da insediarsi fatte salve le verifiche puntuali.	G. Nessuna limitazione d'uso, salvo che per il controllo del ruscellamento verso aree a vulnerabilità più elevata. In tal caso, la qualità delle acque superficiali deve rientrare in Tab. I/A del D.Lgs. 152/99 (allegato 2).