

## La vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento nell'ambito dello schema metropolitano dell'area senese

Piero Barazzuoli, Fausto Capacci, Jenny Migliorini, Benedetta Mocenni, Roberto Rigati,  
Massimo Salleolini

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena, Via Laterina 8 53100 barazzuoli@unisi.it tel. 0577 233809, fax 0577 233938.

### *Aquifers Vulnerability to pollution within the framework of Metropolitan Scheme of Siena area*

**ABSTRACT:** The Metropolitan Scheme of Siena area is an experimental project carried out by some municipalities of Siena area (Asciano, Castelnuovo Berardenga, Monteriggioni, Monteroni d'Arbia, Siena and Sovicille) aiming to overcome administrative limits and to propose a large-scale planning. On the basis of current knowledge we drew up a cartography of aquifers vulnerability to pollution to be used in the Structural Plans to guarantee an adequate standard of groundwater bodies protection. The methodology used (base method C.N.R. - G.N.D.C.I.) is based on groundwater pollution risk assessment (integrated vulnerability) as a consequence of three evaluation components interaction (intrinsic vulnerability, connected with the hydrogeological land characteristics - dangerousness, connected with anthropic activities - importance of the aquifer, that is to say its importance for human beings. We also applied the parametric method S.I.N.T.A.C.S. on a land portion as an example in order to point out the objective limits of integrated vulnerability cartography as well as to underline the need to improve knowledge on the subject of aquifers.

**Key terms:** aquifer, vulnerability, planning, land

**Termini chiave:** acquifero, vulnerabilità, pianificazione, territorio

### Riassunto

Lo Schema Metropolitano dell'area Senese (SMaS) è una sperimentazione condotta da alcuni Comuni dell'area senese (Asciano, Castelnuovo Berardenga, Monteriggioni, Monteroni d'Arbia, Siena e Sovicille) che ha l'obiettivo di superare i limiti amministrativi e di proporre una pianificazione d'area vasta.

Tra gli studi effettuati nel Quadro Conoscitivo si è proceduto alla redazione di una cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, da utilizzarsi per garantire nei Piani Strutturali un adeguato livello di protezione dei corpi idrici sotterranei.

La metodologia adottata (metodo base C.N.R. – G.N.D.C.I.) è fondata sulla assunzione del rischio di inquinamento (vulnerabilità integrata) come esito della interazione di tre elementi di valutazione (la vulnerabilità intrinseca, legata alle caratteristiche idrogeologiche del territorio - la pericolosità, legata alla presenza di determinati usi antropici – l'importanza rivestita dall'acquifero, ovvero la sua rilevanza a fini antropici).

Inoltre si è proceduto ad una applicazione esemplificativa del metodo parametrico S.I.N.T.A.C.S. ad una porzione del territorio finalizzata ad evidenziare da un lato i limiti oggettivi della cartografia della vulnerabilità integrata e dall'altro a sottolineare la necessità di

incrementare nel futuro le conoscenze in materia di acquiferi.

### Introduzione

La Legge Regionale della Toscana n° 1 del 2005 sul Governo del Territorio (L.R. 1/2005) individua tre livelli Pianificatori territoriali: *Regionale*: Piani di indirizzo territoriale (PIT); *Provinciale*: Piani territoriale di coordinamento (PTCP); *Comunale*: Piani strutturali (PS). Per questa PIT, PTCP e PS sono piani territoriali veri e propri e non urbanistici e devono perseguire l'obiettivo di conservare le risorse essenziali del territorio: Aria, Acqua, Suolo, Ecosistemi ecc.

In precedenza il contributo della geologia alla gestione territoriale era regolato solamente dalla (DCR 94/85) che indicava le indagini geologiche finalizzate all'individuazione delle pericolosità in chiave urbanistica (infatti si fa riferimento alle «Indagini geologico – tecniche di supporto alla pianificazione urbanistica» che non è certo territoriale); per questo e con riferimento alla LR 1/2005 il PTCP di Siena, ha riletto tali norme in chiave territoriale (Barazzuoli et alii, 2001, 2002) e questo:

- sia colmando lacune pianificatorie della suddetta DCR su risorse essenziali come Acqua (Vulnerabilità) e Suolo (Stabilità potenziale),

- sia definendo criteri di valutazione (omogenei per tutta la Provincia) di tutti i parametri estesi a tutto il territorio comunale e non solo alle aree per le quali i Regolamenti Urbanistici prevedono trasformazioni.

La necessità di zonizzare rischi potenziali e vulnerabilità delle risorse su tutto il territorio soggetto al Piano deriva anche dal fatto che altri soggetti, pubblici o privati, potranno in futuro proporre trasformazioni non previste dai piani; allora le Amministrazioni interessate - Comuni compresi e per primi - dovranno avere uno strumento generale e super partes che consenta loro di valutare la congruità di queste richieste con le criticità e le pericolosità presenti sul proprio territorio e quindi esprimere giudizi a ragion veduta e non basati esclusivamente su indagini "di parte".

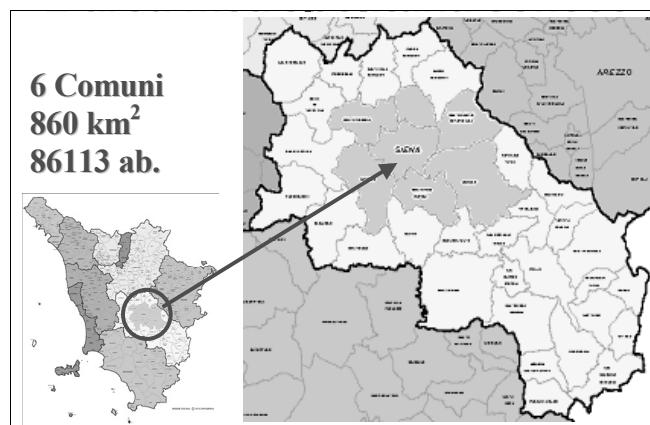


Fig.1 -Area Metropolitana di Siena  
*The Metropolitan Scheme of Siena area*

In questo contesto si colloca lo Schema Metropolitano dell'area senese (Fig. 1) o SMA (Area metropolitana: E' un sistema composto da una città principale e da altri centri minori ad essa strettamente connessi da rapporti economici, sociali e culturali intensi e quotidiani. Si caratterizza per una continuità urbana estesa del costruito, e per un elevato grado di integrazione ed interdipendenza delle attività economiche, del sistema dei trasporti e dei servizi essenziali. In conseguenza di ciò essa richiede forme di collaborazione e associazione tra più comuni.) che nasce dalla necessità del Comune capoluogo (Siena) e dei Comuni limitrofi (Asciano, Castelnuovo Berardenga, Monteriggioni, Monteroni d'Arbia e Sovicille) di coordinare le relative politiche territoriali, vale a dire:

- Politiche abitative
  - Politiche per la mobilità
  - Politiche di gestione del paesaggio
  - Politiche per la sostenibilità ambientale (Rischi e Risorse)
  - Politiche per le funzioni urbane di eccellenza
  - Politiche per gli insediamenti produttivi e per il turismo
- Nell'ambito delle politiche di sostenibilità sono ricomprese l'insieme delle linee di intervento tese ad

assicurare maggiori livelli di compatibilità tra insediamenti antropici e le componenti ambientali acqua e suolo.

Si tratta di aspetti legati:

- alla promozione della tutela coordinata degli acquiferi, sviluppando le linee di lavoro e la disciplina proposta dal PTCP, affinandole sulla base degli studi ricognitivi redatti per l'area senese;

- al controllo della compatibilità geologica delle trasformazioni edilizie ed infrastrutturali, utilizzando come riferimento gli esiti degli studi di natura geologica e geomorfologia (carta della stabilità potenziale dei versanti).

Per quanto concerne gli studi relativi alla promozione della tutela coordinata degli acquiferi, questi hanno perseguito la finalità di redigere una cartografia espressiva della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, da utilizzarsi per garantire nei Piani Strutturali un adeguato livello di protezione delle risorse idriche sotterranee.

La metodologia adottata è quella della Zonazione per aree omogenee (metodo base CNR-GNDI: Civita, 1990, 1994), (AA.VV.1988) ma è anche stata proposta a livello esemplificativo sperimentale una applicazione del metodo parametrico SINTACS (Civita & De Maio, 1997) ad una porzione di territorio campione dello SMA. Il metodo SINTACS utilizza un insieme di informazioni più dettagliate di quelle utilizzate nel metodo precedente, ma che ad oggi non sono disponibili per l'intero territorio dello SMA. L'applicazione dimostrativa è stata proposta per evidenziare da un lato i limiti oggettivi della cartografia della vulnerabilità integrata prodotta per lo SMA – cartografia che utilizza comunque al meglio le informazioni ad oggi disponibili – e dall'altro per sottolineare la necessità di incrementare nel futuro le conoscenze in materia di acquiferi.

### Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento

Allo scopo di fornire una zonizzazione delle aree maggiormente esposte alla contaminazione, utilizzabile a medio-lungo termine per la programmazione dell'uso dell'acqua, si compilano le Carte della Vulnerabilità degli Acquiferi all'Inquinamento che rappresentano; come definito da Civita nel 1987, 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 o idroveicolato tale da produrre, nello spazio e nel tempo, un impatto sulla qualità dell'acqua sotterranea". Comunque sia, gli studiosi concordano nel ritenere che la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento dipenda da diversi fattori tra i quali prevalgono la litologia e la struttura del sistema idrogeologico, la natura del suolo e la geometria della copertura, il processo ricarica→flusso sotterraneo→ emergenza delle acque e l'interazione chimico-fisico-biologica.

La vulnerabilità è l'unico parametro «naturale» (o intrinseco) del sistema; la redazione di una carta della

vulnerabilità intrinseca è solo uno degli obiettivi di base degli studi idrogeologici su di un dato territorio. Infatti, il concetto, e quindi, la valutazione e la zonizzazione della vulnerabilità intrinseca non ha mai un contenuto applicativo e pianificatorio; esso l'acquista quando alla vulnerabilità intrinseca di una zona viene associata la presenza, la posizione topografica ed idrogeologica e la tipologia (dunque la pericolosità) dei cosiddetti «centri di pericolo» ivi esistenti o dei quali si pianifica la realizzazione. In tal modo si esprime cartograficamente il concetto di vulnerabilità s.s. (o vulnerabilità integrata) che sottintende l'interazione tra la vulnerabilità intrinseca di un sistema idrogeologico caratterizzato ed i centri di pericolo effettivamente connessi al sistema stesso, offrendo al pianificatore una prima valutazione del rischio potenziale di situazioni specifiche (Civita, 1994). La predisposizione di una cartografia tematica di questo tipo costituisce quindi parte integrante della documentazione, che deve essere allestita ai fini di una corretta ed adeguata programmazione territoriale, finalizzata alla rappresentazione di «indicatori vocazionali» che evidenzino le caratteristiche intrinseche di ogni specifico ambito territoriale e le sue attendibili reazioni alle sollecitazioni indotte dai sistemi insediativi e produttivi; il supporto cartografico indispensabile per la stesura della vulnerabilità all'inquinamento necessita quindi della sovrapposizione di più carte tematiche (Beretta, 1992).

La formulazione analitica della Vulnerabilità Integrata, su un piano puramente qualitativo, è la seguente:

$$\text{Rischio} = \text{Pericolosità} \times \text{Vulnerabilità} \times \text{Valore}$$

$$\text{Vulnerabilità integrata} = \text{Centri di pericolo} \times \text{Vulnerabilità intrinseca} \times \text{Importanza acquifero}$$

Tale espressione mostra che il rischio di accadimento di un evento indesiderato per la collettività (in questo caso, la contaminazione di una falda da parte di un inquinante) è funzione della pericolosità dell'evento (tossicità, quantità sversata, mobilità nell'ambiente, probabilità di accadimento), della vulnerabilità dell'acquifero e del valore dei beni in pericolo (uso idropotabile dell'acqua sotterranea, popolazione servita, possibilità di reperire fonti alternative).

In definitiva, la cartografia tematica relativa alla vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi ha lo scopo di:

- fornire informazioni circa il diverso grado di idoneità dei vari settori ad accogliere insediamenti o attività;
- evidenziare natura ed entità del rischio in funzione delle diverse attività prefigurabili per uno stesso sito;
- localizzare e stabilire una gerarchia dei punti e delle situazioni di incompatibilità dello stato di fatto, così da consentire interventi per l'attenuazione del rischio;
- contribuire all'individuazione di vincoli e condizioni di gestione di determinate attività, nel proprio contesto ambientale, da attuare attraverso la disciplina urbanistica a livello locale e comprensoriale.

Il Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena, ha definito tra i suoi obiettivi quello della salvaguardia delle risorse idriche, ha introdotto norme in

relazione all'obbligatorietà per i P.S. di redigere la carta della Vulnerabilità (Barazzuoli et alii, 2001, 2002); a tal fine ha individuato come idoneo il metodo CNR-GNDI (Civita, 1990, 1994) a cui fa riferimento la "Legenda unificata per le carte della vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici sotterranei". Questo tipo di metodologia utilizza un certo numero di indici litologici, strutturali, piezometrici e idrodinamici non rigorosamente quantizzati che identificano situazioni diverse; le informazioni riportate riguardano, oltre alle modalità di circolazione idrica all'interno dei litotipi, la presenza e il tipo di copertura superficiale, la soggiacenza della falda e la posizione della superficie piezometrica rispetto ai corsi d'acqua.

Al fine di giungere alla stesura della "Carta della Vulnerabilità degli Acquiferi all'Inquinamento" nella sua forma integrata (secondo quanto previsto dal PTCP di Siena), relativa al territorio dello Schema Metropolitano (Comuni di Asciano, Castelnuovo Berardenga, Monteriggioni, Monteroni d'Arbia, Siena e Sovicille), si è dapprima proceduto alla raccolta ed all'analisi critica dei dati resisi finora disponibili provenienti da varie fonti informative (archivi "GIS oriented" della Regione e della Provincia, notizie pervenute dai Comuni, bibliografia edita ed inedita, ecc.) in relazione alle tipologie previste nelle sei sezioni della Legenda "Civita" ed adottate dal PTCP di Siena.

## Metodo base CNR-GNDI

### Permeabilità

La valutazione dei vari gradi di vulnerabilità intrinseca e la relativa zonazione sul territorio in esame si è basata sul grado di permeabilità relativo dei terreni affioranti; a partire dalla carta geologica è stata eseguita quindi una riclassificazione delle unità litologiche in sei classi di permeabilità come riportato qui di seguito (vedi tab. 1 di sintesi):

- Classe 1 => grado molto elevato
- Classe 2a => grado elevato
- Classe 2b => grado buono
- Classe 3a => grado medio
- Classe 3b => grado basso
- Classe 4 => grado molto basso

### Vulnerabilità intrinseca

A causa della mancanza di dati riguardanti la geometria e l'idrodinamica dei corpi idrici sotterranei, in relazione a tutta l'Area Metropolitana (sezione 1 della legenda di Civita, 1990) non è stato possibile seguire le indicazioni riportate nella legenda suddetta che individua sei classi di vulnerabilità.

D'altra parte è peculiarità di questo metodo l'adattabilità ai vari gradi di conoscenze idrogeologiche che si riescono ad avere in una determinata area. Per questo motivo, ed in sintonia con lo schema concettuale proposto dal PTCP di Siena le sei classi di permeabilità relativa sono state

raggruppate in sole quattro classi di vulnerabilità come riportato nello schema sottostante e nella Tab. 1 di sintesi:

- Vulnerabilità Classe 1 => elevato  
(*classe di permeabilità 1*)
- Vulnerabilità Classe 2 => medio – alto  
(*classe di permeabilità 2a-2b*)
- Vulnerabilità Classe 3 => medio – basso  
(*classe di permeabilità 3a-3b*)
- Vulnerabilità Classe 4 => basso  
(*classe di permeabilità 4*)

### Sensibilità

Al fine di tutelare gli acquiferi presenti nel proprio

territorio, il Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena (PTCP), prevede il passaggio dai quattro gradi di vulnerabilità a tre classi di Sensibilità, (Fig. 2) secondo lo schema logico visibile nella tabella 1 di sintesi, dove:

- la classe di Sensibilità 1 corrisponde ad “*Aree a vincolo elevato*”;
- la classe di Sensibilità 2 corrisponde ad “*Aree a vincolo medio*”;
- la classe di Sensibilità 3 corrisponde ad “*Aree non vincolate*”.

Tab. 1 – Correlazione tra i parametri permeabilità, vulnerabilità e sensibilità.  
*Correlation between the permeability, vulnerability and sensibility parameters.*

<b>Grado di permeabilità</b>	<b>Vulnerabilità intrinseca</b>	<b>Classi di sensibilità previste dal PTCP di Siena per tutelare gli acquiferi presenti nel proprio territorio</b>
Classe 1 => molto elevato	Classe 1 => elevato	<b>Sensibilità 1: “Aree a vincolo elevato”</b>
Classe 2a => elevato		<b>Sensibilità 2: “Aree a vincolo medio”</b>
Classe 2b => buono		
Classe 3a => medio	Classe 3 => medio-basso	
Classe 3b => basso		<b>Sensibilità 3: Aree non vincolate”</b>
Classe 4 => molto basso	Classe 4 => basso	

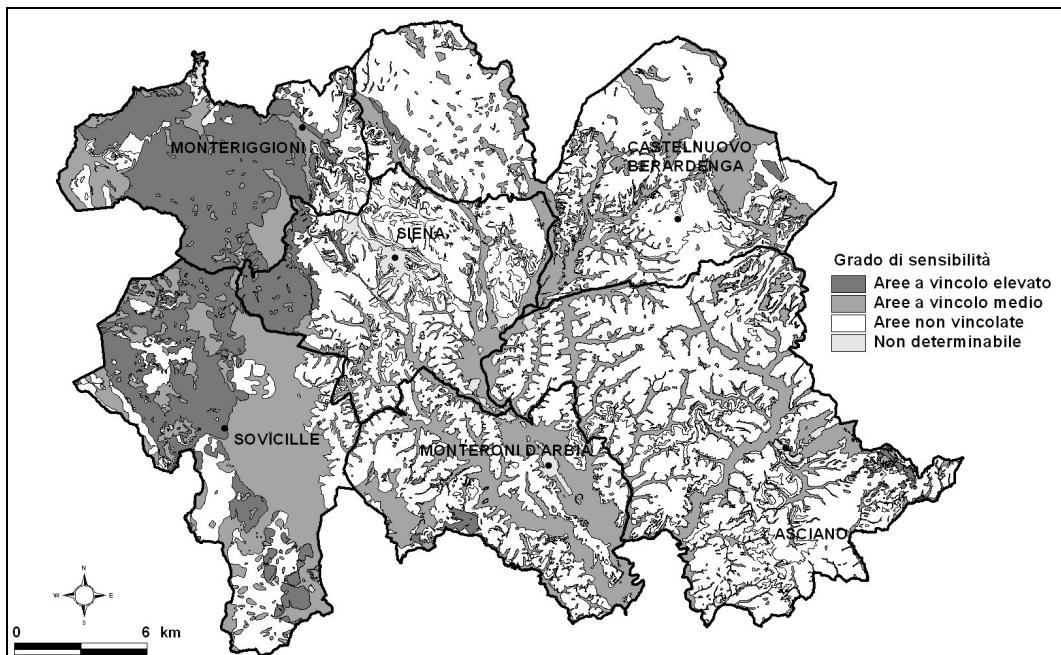


Fig. 2 – Carta della sensibilità dell’Area Metropolitana di Siena

*Sensitivity map of the Metropolitan Scheme of Siena area*

### Vulnerabilità integrata

La vulnerabilità integrata è correlabile, come già ricordato, al concetto di rischio; la sua redazione ha come intento quello di fornire al pianificatore una precisa idea del rischio potenziale di inquinamento degli acquiferi presenti nella zona in esame. Insieme alla carta della sensibilità (che

invece individua vincoli all’uso del territorio in modo da ridurre i rischi di inquinamento) diviene uno strumento principe nelle mani del pianificatore per orientare il governo del territorio in linea con i principi dello sviluppo sostenibile. Al fine di giungere alla stesura della carta della vulnerabilità integrata degli acquiferi all’inquinamento

relativa all'Area Metropolitana (SMaS) si fa riferimento alla legenda di Civita (1990) che prevede l'acquisizione di una gran mole di dati suddivisi in sei sezioni:

- 1) *Geometria ed idrodinamica dei corpi idrici sotterranei;*
- 2) *Stato di inquinamento reale dei corpi idrici sotterranei;*
- 3) *Produttori reali e potenziali di inquinamento dei corpi idrici sotterranei;*
- 4) *Potenziali ingestori e via colo di inquinamento dei corpi idrici sotterranei;*
- 5) *Preventori e/o riduttori dell'inquinamento;*
- 6) *Principali soggetti ad inquinamento.*

## Metodo SINTACS

Nell'ambito di questo studio, su di una porzione di territorio è stato utilizzato il metodo parametrico SINTACS (Civita & De Maio, 1997), in modo tale da confrontare la Carta della Vulnerabilità Intrinseca ottenuta, con quella conseguita

attraverso il metodo base CNR-GNDCl.

I sistemi parametrici (Civita, 1994) sono basati sulla selezione dei parametri con i quali si intende valutare la vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento; a ciascun parametro selezionato (ad esempio: soggiacenza della falda, conducibilità idraulica, ecc.), suddiviso per intervalli di valori e/o tipologie dichiarate, viene attribuito un punteggio crescente in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale. I punteggi ottenuti per ciascun parametro possono essere sommati tra loro (RS = Rating System) o incrociati in una matrice (MS = Matrix System) o moltiplicati per stringhe di pesi che descrivono la situazione idrogeologica e/o d'impatto, enfatizzando in varia misura l'azione e l'importanza dei vari parametri (PCSM = Point Count System Model). A questo ultimo tipo appartiene il metodo SINTACS (Civita & De Maio, 1997), con l'acronimo che deriva dalle denominazioni dei sette parametri presi in considerazione (ognuno con punteggio variabile da 1 a 10):

Tab. 2 – Confronto numerico tra i metodi CNR e SINTACS.  
Numerical comparison between methods CNR and SINTACS

Grado di sensibilità	AREA - METODO C.N.R.		AREA - METODO S.I.N.T.A.C.S.		DIFFERENZA S.I.N.T.A.C.S. – C.N.R.	
	(km <sup>2</sup> )	(%)	(km <sup>2</sup> )	(%)	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
Aree a vincolo elevato	45,00	81,02	0,01	0,01	- 44,99	- 81,01
Aree a vincolo medio	8,69	15,64	48,06	86,52	39,37	70,88
Aree non vincolate	1,85	3,34	7,48	13,46	5,62	10,12

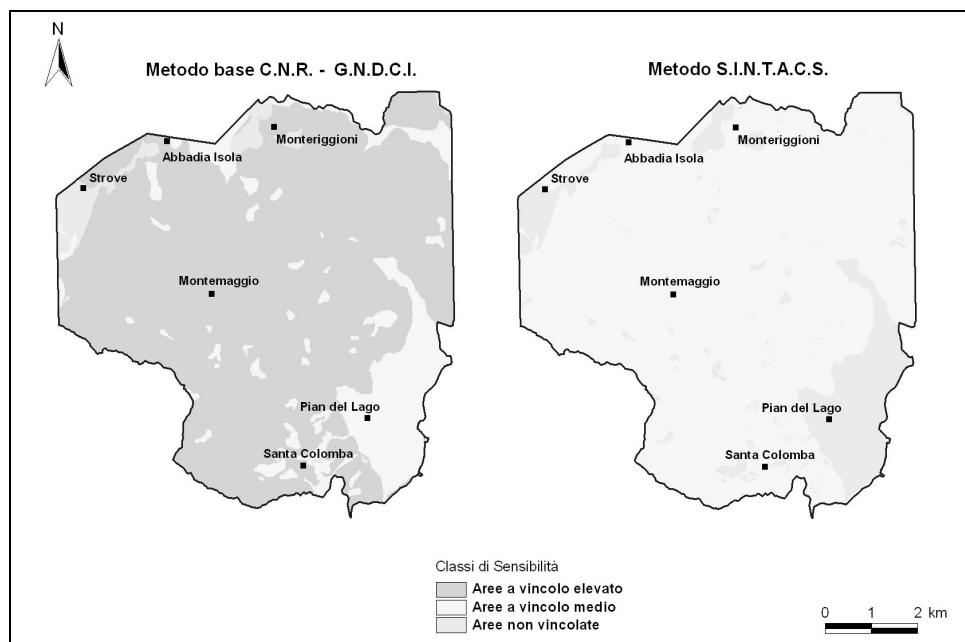


Fig. 3 – Confronto delle classi di sensibilità ottenuto con il metodo base e con il metodo SINTACS.

Comparison of the sensitivity classes obtained with the base method C.N.R. - G.N.D.C.I. and the parametric method SINTACS

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

Il metodo utilizza linee di pesi moltiplicatori diverse per ogni situazione di impatto considerata, in modo da amplificare il punteggio in misura proporzionale all'importanza che il parametro assume nel determinare il grado di vulnerabilità nella situazione di impatto di riferimento.

### Confronto dei risultati ottenuti con il metodo base e con il metodo SINTACS

Dal confronto dei gradi di vulnerabilità in cui risulta suddivisa l'area campione, secondo il metodo base e secondo il metodo S.I.N.T.A.C.S., ne risulta un sostanziale abbassamento di un grado di vulnerabilità con la seconda metodologia rispetto alla prima (Tab. 2 e Fig. 3). Infatti mentre con il metodo base, ben l'81% dell'area esaminata ricade nel grado di vulnerabilità elevato, con il metodo SINTACS circa la stessa percentuale di territorio (l'86%), è rappresentata invece, dal grado medio – alto (il grado di vulnerabilità elevato è praticamente inesistente, essendo rappresentato dallo 0,01% dell'area). Ed inoltre, se con il metodo base, il 16% dell'area in esame ricade nel grado di vulnerabilità medio – alto, dall'altra parte, con il metodo S.I.N.T.A.C.S., si ottiene che il 13% del territorio rientra nel grado medio – basso.

### Conclusioni

Questa analisi seppur sommaria, mette in luce che le problematiche sulla corretta gestione delle risorse idriche iniziano ben prima che l'acqua venga immessa nella rete acquedottistica e quindi utilizzata. Viste le peculiarità della risorsa idrica:

- la sua limitata disponibilità,
- la notevole variabilità di tali disponibilità sia nello spazio che nel tempo,
- la sua suscettibilità all'inquinamento,
- la complessità delle conoscenze, necessarie a definire fisicamente gli acquiferi ed idrodinamicamente le falde in essi ospitate, utili per un progetto di razionale sfruttamento ed efficiente controllo e protezione, appare chiaro che:
- la sua corretta gestione è innanzitutto un problema scientifico prima che tecnico,
- è innanzitutto un problema idrogeologico prima che d'ingegneria idraulica. E' certamente vero che ogni territorio è caratterizzato da qualche emergenza, ma la vera grande emergenza sta nella mancanza di conoscenza, risolvendo la quale avremmo automaticamente a

disposizione la chiave per avviare a soluzione e risolvere le altre emergenze "minori". E la mancanza di conoscenza non è un'emergenza che si risolve in poco tempo e con pochi soldi; sarebbe illusorio, e quindi dannoso, convincersi di colmare in fretta e con scarso onere le lacune derivanti da decenni di solo sfruttamento e di non gestione del patrimonio idrico.

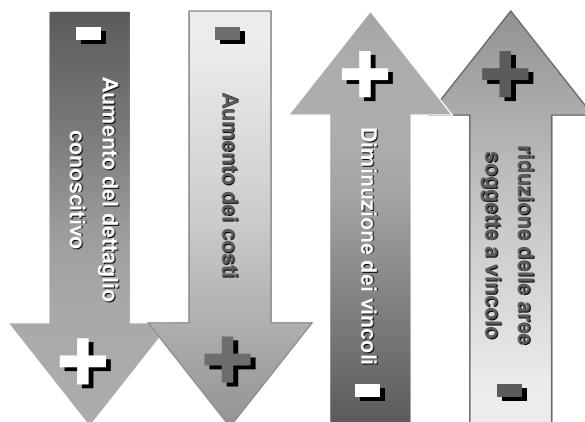


Fig. 4 - Rapporti tra il dettaglio conoscitivo idrogeologico e vincoli pianificatori

*Relationships between the idrogeological cognitive detail and rules of planning*

Occorre allora un progetto che, partendo dall'esistente, programmi, in un tempo che non potrà essere breve, investimenti finanziari non nell'inseguire le "piccole emergenze", ma nel colmare quelle carenze (o più spesso assenze) conoscitive di cui prima si diceva.

Così, ad esempio, nell'applicazione dei Metodi per la definizione della Vulnerabilità vi è la possibilità di utilizzare uno dei seguenti metodi:

#### 1- Zonazione per aree omogenee

Definisce la Vulnerabilità del sito in funzione della circolazione idrica sotterranea. Si basa sulle conoscenze idrogeologiche ed è applicabile ad ogni tipo di scenario fisiografico. È utilizzato in territori vasti e complessi del punto di vista idrostrutturale, idrogeologico e morfologico. La Vulnerabilità viene valutata per complessi e situazioni idrogeologiche utilizzando la tecnica di sovrapposizione cartografica (Metodo GNDCI – CNR).

#### 2- Valutazione per sistemi parametrici

Questo metodo definisce un valore della Vulnerabilità "quantitativo"; è basato sulla determinazione del valore numerico di alcuni parametri selezionati, assegnando ad ognuno di essi un "peso" all'interno della valutazione complessiva della Vulnerabilità. La Vulnerabilità sarà definita da un indice numerico il quale può essere inserito in vari intervalli di grandezza in modo da facilitare la lettura dei risultati da parte di tutti (Metodo SINTACS).

#### 3- Valutazione per modelli numerici

Sono basati sulla stima di un “indice di Vulnerabilità” mediante relazioni matematiche, più o meno complesse.

Ovviamente nel passare dal primo al terzo metodo vi è la necessità di maggiori conoscenze che comportano maggiori oneri, ma portano a definire vincoli più

appropriati, quindi più sostenibili e conseguentemente più accettati e condivisi (Fig. 4) come dimostrato nell'applicazione esemplificativa del metodo parametrico SINTACS e dal relativo confronto con quello CNR (zonazione per aree omogenee).

## Bibliografia

- AA.VV. (1988) - Proposta di normativa per l'istituzione delle fasce di rispetto delle opere di captazione delle acque sotterranee. Ed. GeoGraph, Segrate (Milano).
- AA.VV. (1998) - Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena. 1.Relazione generale. 2 Norme. 3 Allegati. (2000).
- Barazzuoli P., B. Mocenni, R. Rigati & M. Salleolini (2001) - Il contributo delle Scienze della Terra nel Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena. Quaderni di Urbanistica, 36, Edizioni Atena, Roma, 48-55.
- Barazzuoli P., Filpa A., Mocenni B., Rigati R. & Salleolini M. (2002) - La tutela delle acque sotterranee nella pianificazione territoriale: un esempio dal PTCP di Siena. *Geologia Tecnica & Ambientale*, 4/2002, 13-26.
- Beretta P. (1992) - Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee: tecniche per lo studio e la progettazione degli interventi di prevenzione, controllo, bonifica e recupero. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione “Protezione delle Acque Sotterranee”, 18, Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita M. (1987) - La previsione e la prevenzione del rischio di inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le carte di vulnerabilità. Atti del Convegno “Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione”, Mantova, Prov. MN, Ass. Amb. e Ecol., 9-17.
- Civita M. (1990) - Legenda unificata per le carte della vulnerabilità all'inquinamento dei corpi idrici sotterranei/Unified legend for the aquifer pollution vulnerability maps. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione “Protezione delle Acque Sotterranee”, Studi sulla vulnerabilità degli acquiferi, 1 (Appendice), Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita M. (1994) - Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione “Protezione delle Acque Sotterranee”, 31, Pitagora Editrice, Bologna.
- Civita M. & De Maio M. (1997) – SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione della cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia ed automazione. Quaderni di tecniche di protezione ambientale. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- D.C.R. Toscana 94/85-L.R. 17 aprile 1984, n. 21. Norme per la formazione e l'adeguamento degli strumenti urbanistici al fine della prevenzione del rischio sismico. Direttiva « Indagini geologico-tecniche di supporto alla pianificazione urbanistica
- L.R.Toscana 3 gennaio 2005 n.1. Norme per il governo del territorio. 12/01/2005 Bollettino Ufficiale della Regione Toscana – N. 2