

# Water resources and main groundwater bodies in the Province of Siena in the framework of the land management plan

## *Le risorse idriche della Provincia di Siena e dei suoi principali acquiferi nell'ambito del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP)*

Piero Barazzuoli, Jenny Migliorini, Fausto Capacci

**Riassunto:** La gestione delle risorse idriche, soprattutto a fini idropotabili, non è più demandata ai singoli Comuni o a consorzi tra essi dato che la legislazione comunitaria europea, nazionale e regionale ha individuato Autorità ed Enti che, a vario titolo, perseguono lo stesso obiettivo di gestione delle risorse idriche.

Davanti ad un problema così strategico come è quello della gestione delle risorse idriche le Amministrazioni locali della Toscana devono necessariamente contribuire a definire le strategie pianificatorie così come è nello spirito della Legge Regionale 65/2014. Questo studio trova quindi collocazione in ricerche che, nell'ambito della Pianificazione Territoriale, sono finalizzate a disciplinare la gestione delle risorse idriche alla scala provinciale.

L'area oggetto di indagine comprende il territorio dell'intera Provincia di Siena all'interno della quale, in occasione della redazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP), ab-

biamo valutato le risorse idriche superficiali e sotterranee dell'intero territorio, con particolare riferimento a quelle relative agli acquiferi che, per la Regione Toscana, sono da ritenersi quelli più significativi (Corpi Idrici Significativi Sotterranei, CISS) e conseguentemente strategici, per la Provincia stessa.

Si è proceduto, quindi, da una parte a confrontare tale risorsa sotterranea con la domanda d'acqua complessiva del territorio provinciale al fine di valutare la sostenibilità delle attività connesse a tale domanda, dall'altra a individuare la pericolosità ed il rischio di inquinamento definendo le relative vulnerabilità per tutto il territorio provinciale; tali vulnerabilità sono state poi corredate da una serie di norme finalizzate ad indirizzare l'uso del territorio in maniera tale da minimizzare il rischio di inquinamento degli acquiferi ivi presenti.

**Keywords:** *Water resources, resource planning, groundwater management.*

**Parole chiave:** Risorse Idriche, pianificazione delle risorse naturali, gestione delle acque sotterranee.

**Jenny MIGLIORINI** 

Geologo libero professionista  
j.migliorini@tin.it

**Fausto CAPACCI**

Geologo libero professionista

**Piero BARAZZUOLI**

Dipartimento Scienze Fisiche della Terra e dell'Ambiente  
Università degli Studi di Siena

Ricevuto/Received: 18 November 2019-Acettato/Accepted: 24 March 2020  
Pubblicato online/Published online: 30 March 2020

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2020

**Abstract:** *The management of water resources, especially drinking water, is no longer the responsibility of single municipal councils or groups of councils because European Union, national and regional legislation created and appointed authorities and bodies for this purpose.*

*Faced with a strategic problem such as the management of water resources, local government in Tuscany has the task of defining planning strategies in line with Regional law no. 65/2014. This study is part of research aimed at defining water management at province level in the framework of regional planning.*

*The study area includes the whole Province of Siena, where we evaluated surface- and ground- water resources, during preparation of the land management plan (territorial coordination plan) of the province, with special attention to aquifers that the Regional government considers significant (Relevant Groundwater Bodies and therefore strategic for the Province.*

*We compared the groundwater resources with the overall demand for water in the Province in order to assess the sustainability of activities determining that demand; we also evaluated the danger level and risk of contamination, defining the corresponding vulnerabilities for the whole Province. The vulnerabilities were matched with a series of rules aimed at regulating land use so as to minimise the risk of polluting groundwater.*

## Introduzione

Lo scopo del presente studio è da individuarsi nella valutazione e nell'uso sostenibile delle risorse idriche e delle modalità di protezione delle stesse nell'ambito della pianificazione territoriale di area vasta che, nel caso in questione, è corrisposta alla redazione del Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP: Amministrazione Provinciale di Siena 2012; Barazzuoli et al. 2010a, Barazzuoli et al. 2002a, Barazzuoli et al. 2002b) della Provincia di Siena (Fig.1) sulla base delle normative Nazionale e Regionale della Toscana. La gestione delle risorse idriche, soprattutto a fini idropotabili, non è più demandata ai singoli Comuni o a consorzi tra essi, dato che le legislazioni nazionale e regionale (Legge 183/1989: Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo; Decreto Legislativo 152/2006: Norme in materia ambientale, recepimento della direttiva 2000/60/CE; Legge Regionale 65/2014: Norme per il governo del territorio) ha individuato Autorità ed Enti locali che, a vario titolo, perseguono lo stesso obiettivo di gestione delle risorse idriche.

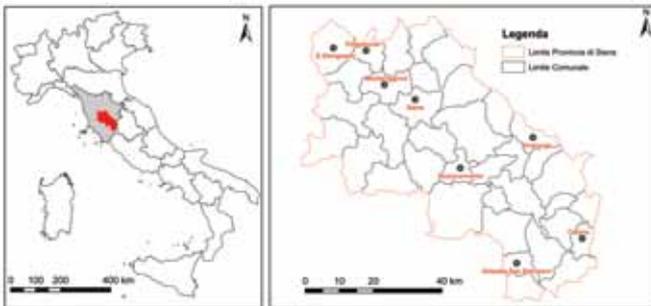


Fig. 1 - Ubicazione dell'area di studio.  
Fig. 1 - Location of the study area.

Davanti ad un problema così strategico come è quello dell'acqua gli Enti locali devono essere i primi e più severi controllori delle scelte e delle strategie previste dai piani che essi stessi contribuiscono a definire così come indicato dalla Legge Regionale 65/2014.

Tutto ciò è stato perseguito anche attraverso:

- Valutazione quantitativa della domanda d'acqua e confronto con la risorsa idrica del territorio;
- Valutazione delle risorse idriche su tutto il territorio provinciale attraverso i calcoli di Bilancio Idrico riferiti all'Anno Idrologico medio (A.I.) 1967-2006;
- Valutazione delle risorse idriche sotterranee dei "corpi idrici significativi sotterranei" della provincia (Bilanci idrogeologici per l'A.I. 1967-2006);
- Domanda d'acqua della provincia.
- Protezione qualitativa della risorsa: Valutazione della Vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento;
- Vulnerabilità intrinseca: il metodo SIPS.

L'ambito territoriale del presente lavoro, la Provincia di Siena, occupa una superficie di 3822 km<sup>2</sup> ed amministra una popolazione di 248274 abitanti (dati ISTAT 2001) ripartiti in 36 Comuni.

Dal punto di vista dell'assetto idrogeologico generale, la Provincia di Siena è caratterizzata prevalentemente dall'affioramento di terreni poco permeabili o impermeabili (63%), mentre quelli molto permeabili occupano solamente poco più dell'8% del territorio provinciale. Per maggiori dettagli sull'assetto idrogeologico della Toscana Meridionale della quale la Provincia di Siena fa parte, si rimanda a Barazzuoli e Salleolini (1993).

## Materiali e metodi

### Risorse idriche

#### Valutazione delle risorse idriche su tutto il territorio provinciale (Bilancio Idrico per l'A.I. 1967-2006)

La valutazione delle risorse idriche complessive riferibili alla Provincia di Siena e la loro ripartizione in superficiali e sotterranee è stata effettuata con i criteri proposti in Barazzuoli e Salleolini (1992) e Barazzuoli et al. (1994; 1995); questi poggiano su calcoli di bilancio idrologico (aventi come riferimento spaziale sia i bacini idrografici che i complessi idrogeologici) ed, in particolare, sulla stima dell'eccedenza idrica  $Ws$ . In particolare per la stima di tale eccedenza idrica, detta anche precipitazione efficace  $Pe$  o risorsa totale potenziale, le grandezze indagate possono essere sinteticamente espresse con l'equazione generale del bilancio idrico di un bacino idrografico:

$$P = Er + D + Ie \quad (1)$$

dove:  $P$  = afflussi;  $Er$  = evapotraspirazione reale;  $D$  = deflussi alla stazione idrometrografica che sottende il bacino;  $Ie$  = infiltrazione efficace. I valori dei vari termini vengono generalmente ragguagliati all'intera superficie del bacino ed espressi in mm/anno.

Per giungere alla valutazione delle risorse idriche attraverso i calcoli di bilancio idrico con tali criteri, si prende avvio dall'equazione generale del bilancio (1) che può essere scritta anche nella forma seguente:

$$P - Er = D + Ie \quad (2)$$

dove il termine di sinistra costituisce il totale delle precipitazioni efficaci ( $Pe$ ) e quello di destra rappresenta l'eccedenza idrica ( $Ws$ ), detta anche deflusso idrico totale o risorsa idrica totale rinnovabile. Quest'ultimo parametro rappresenta la potenzialità idrica totale del territorio esaminato, quindi il massimo volume d'acqua superficiale (ruscellamento  $R$ ) e sotterranea (infiltrazione totale  $Iti$ ) teoricamente utilizzabile.

#### Valutazione delle risorse idriche sotterranee dei "corpi idrici sotterranei significativi" (CISS-Delibera Giunta Regione Toscana 225/2003 e 939/2009) della provincia di Siena (Bilanci idrogeologici per l'A.I. 1967-2006)

Com'è noto, nel caso di complessi idrogeologici il bilancio idrogeologico è espresso dall'equazione:

$$Iti = D_{sott}. \quad (3)$$

In essa  $Iti$  identifica le masse idriche in entrata rappresentate dall'infiltrazione nelle aree di alimentazione degli acquiferi,

frazione delle precipitazioni efficaci  $P_e$  quest'ultime pari a:

$$P_e = P - E_r \quad (4)$$

mentre  $D_{sott}$  definisce le uscite che corrispondono al deflusso sotterraneo.

Per le valutazioni del Deflusso sotterraneo ( $D_{sott}$ ) si è fatto riferimento, laddove possibile, a misure continuative di livelli piezometrici o delle portate sorgive alimentate da tali acquiferi. Questo si è potuto fare solo per gli acquiferi oggetto di specifiche analisi idrogeologiche come quelli della Montagnola Senese (Capacci et al. 2008, Barazzuoli et al. 2018) e del M. Amiata (Barazzuoli et al. 2014, Barazzuoli et al. 2015); per gli altri ci si è limitati alla sola valutazione dell'infiltrazione.

Per la valutazione dell'infiltrazione ( $I_{ti}$ ) relativa alle aree di alimentazione dei complessi idrogeologici presi in esame (CISS), è stato utilizzato il procedimento di calcolo basato sui Coefficienti di Infiltrazione Potenziale (CIP in Civita, 2005; Celico, 1988) definiti, come % di  $W_s$ , i cui valori sono riportati in apposite tabelle, in funzione della litologia e del grado di permeabilità relativo di tali complessi. Per la determinazione di  $W_s$  si sono utilizzati i valori medi (per l'AI 1967-2006) dei parametri idroclimatici raccolti ed elaborati nel corso della redazione del bilancio idrico (formule 1 e 2) su tutto il territorio provinciale.

Si sono così acquisiti tutti gli elementi utili per una valutazione delle risorse idriche sotterranee dei Corpi Idrici Significativi Sotterranei individuati dalla Regione (Fig.4) e presenti all'interno della Provincia di Siena.

Questo tipo di determinazione, basata sui CIP, si è articolata in varie fasi:

- 1a- Definizione del grado di permeabilità dei vari litotipi e scelta da apposite tabelle dei relativi valori percentuali dei CIP;
- 2a- Elaborazione di una carta ad isolinee del  $W_s$  medio annuo;
- 3a- Valutazione del  $W_s$  relativo all'area di alimentazione di ciascun complesso idrogeologico considerato;
- 4a- Calcolo dell'infiltrazione totale in ciascuna area considerata tramite la relazione:

$$I_{ti} = W_s \times CIP \times S \quad (5)$$

dove, oltre agli elementi noti,  $S$  corrisponde alla superficie affiorante del bacino idrogeologico analizzato, luogo della sua ricarica per infiltrazione.

### Domanda d'acqua della provincia

Questo tipo di analisi è assai complesso in quanto le valutazioni necessarie risentono dell'assenza di dati storici sistematici sui consumi idropotabili, irrigui e produttivi, statisticamente confrontabili con le risorse. Così qui ci siamo limitati a fare il punto sulla domanda d'acqua all'interno della Provincia di Siena conosciuta all'atto dell'esecuzione degli studi in esame e nei termini di seguito specificati:

- **domanda d'acqua ai fini irrigui:** ci si è basati sui dati forniti dall'Agenzia Regionale Toscana ARSIA inerente al territorio della Provincia di Siena relativamente alle superfici irrigate e irrigabili (ARSIA Toscana 2008);

- **domanda d'acqua ai fini idropotabili e produttivi:** per valutare tale domanda d'acqua ci si è avvalsi delle stime effettuate nei PIANI DI AMBITO redatti dalle varie Autorità di Ambito Territoriale Ottimale (AATO) della Toscana allora operanti sul territorio provinciale e dove, in assenza di dati certi, il fabbisogno produttivo viene fatto corrispondere a circa 30% dell'idropotabile. (AIT, Autorità Idrica Toscana – Piani di Ambito 2008)

### Vulnerabilità intrinseca: il metodo SIPS

Uno degli strumenti pianificatori più idonei a fornire una zonizzazione delle aree maggiormente esposte alla contaminazione, utilizzabile a medio-lungo termine per la programmazione dell'uso dell'acqua, è identificabile con le Carte della Vulnerabilità degli Acquiferi all'Inquinamento che rappresentano, secondo la definizione proposta da Civita (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".

Considerata la non uniformità della distribuzione di dati idrogeologici riguardanti gli acquiferi ricadenti nel territorio provinciale, per la rappresentazione cartografica della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi all'inquinamento della Provincia di Siena, è stato messo a punto un nuovo sistema parametrico semplificato (SIPS in Barazzuoli et al. 2010b) atto ad una più speditiva valutazione della Vulnerabilità intrinseca di area vasta. Le elaborazioni sono state realizzate a scala 1:10.000 in modo da permettere ai Comuni l'acquisizione diretta della nuova cartografia nei relativi Piani Strutturali così da salvaguardare l'omogeneità delle valutazioni a livello provinciale in relazione alla tutela dei corpi idrici sotterranei.

Il sistema è contraddistinto con l'acronimo S.I.P.S. dalle iniziali dei quattro parametri presi in considerazione per valutare la vulnerabilità intrinseca del primo acquifero: Soggiacenza, Infiltrazione, Permeabilità, acclività della Superficie topografica. Questa nuova applicazione prende spunto dal già ben noto e collaudato SINTACS (Civita 1994; Civita e De Maio 1997) e ne rappresenta una nuova lettura e semplificazione.

Questo metodo nasce al fine di individuare il migliore compromesso fra il metodo CNR-GNDCI (zonazione per aree omogenee), adatto per valutazione sinottiche, e la metodologia strettamente parametrica SINTACS, ottimale per valutazioni di un certo dettaglio. Tale esigenza può emergere quando la valutazione della vulnerabilità viene effettuata con finalità strategiche e pianificatorie, per grandi aree, con una non uniformità della distribuzione di dati idrogeologici come si è verificato nel territorio provinciale di Siena.

Le zonazioni del territorio provinciale riferite ai parametri del metodo adottato, sono state così definite:

- il primo parametro, la soggiacenza ( $S$ ), è sempre stata fatta corrispondere alla profondità media della prima falda rispetto al piano di campagna;
- il parametro infiltrazione ( $I$ ), questo è stato valutato

utilizzando i CIP (dei quali si è detto in precedenza) applicati alla Pieggiata efficace media relativa all'Anno Idrologico medio 1967-2006 definita in corrispondenza delle aree di alimentazione di ciascun acquifero;

- il parametro Permeabilità (P), è stata valutato in termini relativi sulla base dei caratteri geo-litologici desumibili dalla Carta Geologica in scala 1:10.000 interpretati anche sulla base di locali studi idrogeologici.
- Infine, la zonazione dell'acclività della superficie topografica (S), è stata ottenuta dal modello digitale del terreno (DTM) messo a disposizione dalla Regione Toscana ed avente dimensione della cella di 10x10 metri.

Il metodo prevede che a ciascun parametro (SIPS), suddiviso per intervalli di valore e/o tipologie dichiarate, venga attribuito un punteggio, in funzione dell'importanza che esso assume nella valutazione complessiva finale della vulnerabilità.

I punteggi così ottenuti per ciascun parametro vengono infine moltiplicati per stringhe di pesi correlati alle due situazioni ambientali e/o antropiche previste dal metodo e che descrivono la situazione di impatto in funzione del grado di permeabilità relativo dei terreni affioranti.

Operativamente, ed in modo analogo a quanto previsto per il metodo SINTACS, il metodo SIPS prevede la sovrapposizione delle quattro carte di input, relative ai quattro parametri sopra elencati. Ogni dato di input è suddiviso in classi. A ciascun tematismo viene assegnato un peso e a ciascuna classe un punteggio. La carta risultante (Fig.4) è data dalla somma algebrica dei quattro prodotti (punteggio x peso) che per ciascun tematismo sono stati attribuiti a quella particolare area, secondo le modalità del calcolo algebrico su dati raster, ovvero:

$$Vulnerabilità = Somma (punteggio_i \times peso_i) \quad (6)$$

## Risultati

### Risorse idriche

Valutazione delle risorse idriche su tutto il territorio provinciale (Bilancio Idrico per l'A.I. 1967-2006)

I risultati relativi alla valutazione delle risorse idriche con i criteri proposti in Barazzuoli e Salleolini 1992 e Barazzuoli et al. 1994, 1995, si ottengono attraverso la determinazione dei valori dei parametri presenti nella (2) e che, relativamente al territorio provinciale, sono risultati essere:

- Precipitazioni (P): con l'ausilio di 75 stazioni pluviometriche si è ricavato un valore medio annuo pari a 820 mm, corrispondente a circa  $3,1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno;
- Evapotraspirazione reale (Er): operando sulle 75 stazioni anzidette attraverso la formula di Thornthwaite 1948, si è ricavato un valore medio annuo di 580 mm (ca. il 70% delle precipitazioni), pari a circa  $2,2 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno;
- Eccedenza idrica (Ws): corrispondendo questa alla differenza tra i valori medi di P ed Er si è ricavato un valore medio annuo di 240 mm (ca. il 30% delle precipitazioni), pari a circa  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno che rappresenta, appunto, la risorsa totale potenziale media riferibile ai ca. 3800 km<sup>2</sup> del territorio provinciale. Per ripartire tale valore

totale in stime di risorsa superficiale e sotterranea si può fare riferimento al bilancio idrico del bacino idrografico del F. Ombrone alla Stazione Idrometrografica di Sasso d'Ombrone (Fig. 2), i cui 2700 km<sup>2</sup> sono pressoché tutti compresi nella provincia di Siena.

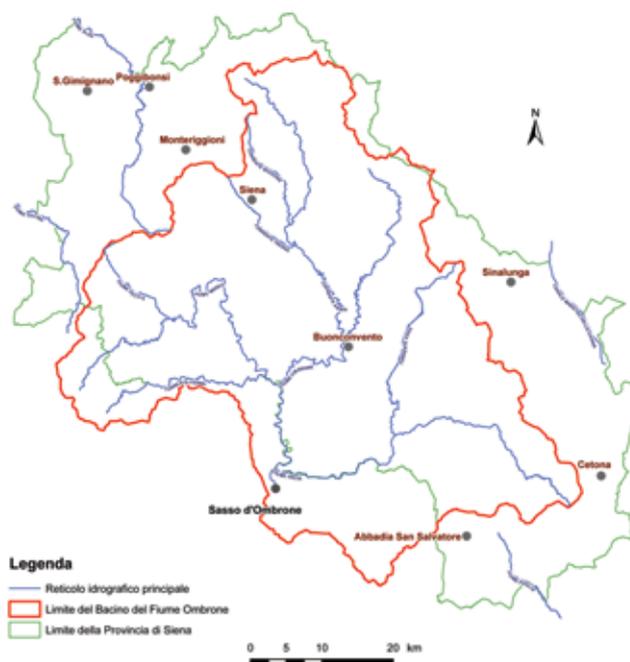


Fig. 2 - I territori della Provincia di Siena e del Bacino del F. Ombrone a Sasso d'Ombrone.

Fig. 2 - Map of the Siena Province and the Ombrone river catchment at Sasso d'Ombrone.

Tale bilancio, sempre con riferimento all'AI 1967-2006, ha così definito:

- un'eccedenza idrica di 245 mm (30% delle precipitazioni=812 mm), pari a circa  $0,65 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno di risorsa rinnovabile e potenzialmente utilizzabile. Questa, con i criteri suddetti e grazie alle misure di deflusso in uscita dal bacino, può essere ripartita in:
  - a) una risorsa totale superficiale potenziale (R), dovuta al ruscellamento diretto dell'acqua lungo la rete idrografica, pari a circa  $0,46 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno (70% di Ws);
  - b) una risorsa totale sotterranea potenziale (Iti), pari a circa  $0,19 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno (30% di Ws), che è la quantità d'acqua di infiltrazione nel sottosuolo.

L'estrapolazione di queste ultime valutazioni ci consente di indicare, approssimativamente, per la Provincia di Siena, una ripartizione del suo Ws (ca.  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno) in circa  $0,7 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno di risorsa superficiale (R), e  $0,3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno di risorsa sotterranea (Iti).

**Valutazione delle risorse idriche sotterranee dei "corpi idrici significativi sotterranei" (CISS) della provincia di Siena individuati come strategici dalla Regione Toscana (Bilanci idrogeologici per l'A.I. 1967-2006)**

L'acquisizione, tramite i calcoli di bilancio idrico, dei valori medi (per l'A.I. 1967-2006) dei parametri idroclimatici ad esso

riferibili, ci ha permesso di valutare tramite il procedimento basato sui CIP (Civita 2005, Celico 1988), le risorse idriche sotterranee dei Corpi Idrici Significativi Sotterranei (CISS)

(Fig.3) e presenti all'interno della Provincia di Siena

Le valutazioni che ne sono derivate per ciascuno di questi acquiferi, sono riportate in Tab. 1.

Tab. 1 - Risultati finali ottenuti nella stima delle risorse idriche superficiali e sotterranee dei principali acquiferi del territorio provinciale (A.I. 1967-2006); valori espressi in  $10^6$  m<sup>3</sup>/anno.

Tab. 1 - Estimated surface- and ground-water resources in the main aquifers of the Province of Siena – Final results (mean 1967-2006); units  $10^6$  m<sup>3</sup>/year.

AQUIFER – ACQUIFERO (valori espressi in $10^6$ m <sup>3</sup> /anno)	P	Er	Ws	CIP	Iti
a) Carbonatic Aquifer of the Montagnola Senese and Piana di Rosia	106	74	35	0.9	31.0
b) Carbonatic Aquifer of the Poggio del Comune	31	22	9	0.9	8.3
c) Aquifer of the Cecina river	2	1.3	0.7	0.6	0.4
d) Carbonatic Aquifer of the Colline Metallifere	7	4	3	0.9	2.7
e) Aquifer of the Elsa river	24	17	7	0.4	2.8
f) Aquifer of the Val di Chiana	137	101	37	0.3	10.9
g) Carbonatic Aquifer of the Monte Cetona	15	9	6	0.9	5.1
h) Carbonatic Aquifer of the Monte Amiata	94	44	50	0.9	45.0

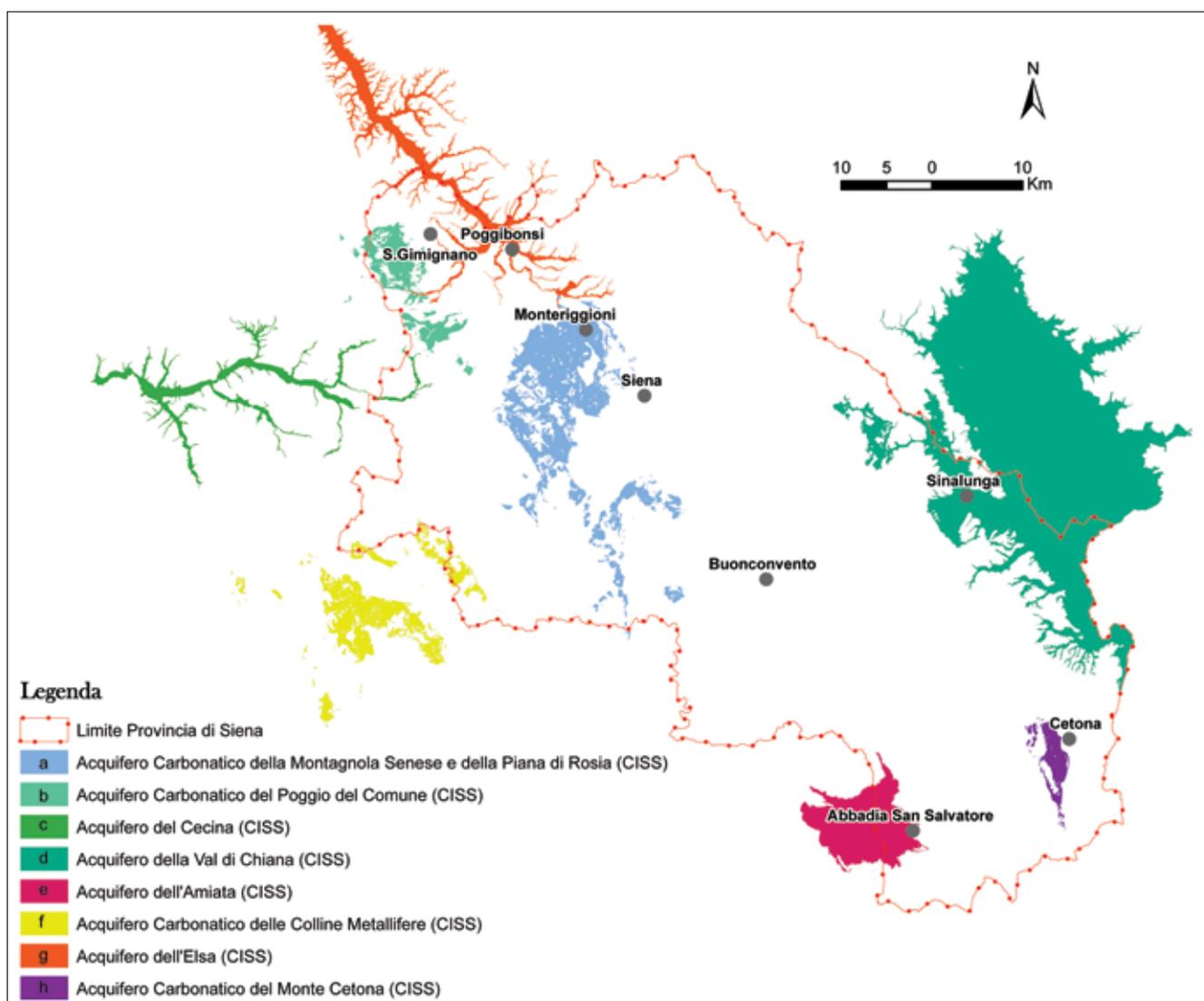


Fig. 3 - I corpi idrici significativi sotterranei (C.I.S.S.) della Provincia di Siena (da: "Amministrazione Provinciale di Siena, 2012" modificata).

Fig. 3 - Relevant groundwater bodies in the Province of Siena (by "Amministrazione Provinciale di Siena, 2012" modified).

Per ciascuno dei corpi idrici sopra indicati è stata realizzata una scheda sintetica dove sono state riportate tutte le informazioni note su tali acquiferi di importanza significativa (CISS) ricadenti, tutti od in parte, nel territorio provinciale; queste sono state un utile mezzo per definire le strategie di intervento, diretto e/o indiretto, dell'Amministrazione Provinciale sul tema strategico della Gestione delle Risorse Idriche. Riportiamo a titolo esemplificativo alla fine del lavoro in APPENDICE 1, una sintesi della scheda relativa all'acquifero del Monte Amiata (Barazzuoli et al. 2010, Provincia di Siena PTCP 2012).

### Domanda d'acqua della provincia

Le valutazioni della domanda d'acqua ai fini irrigui, basata sui dati forniti dall'Agenzia Regionale Toscana ARSIA, ed ai fini idropotabili e produttivi, basata sulle stime effettuate nei PIANI DI AMBITO redatti dalle varie AATO Toscane (AATO2, AATO4 e AATO6) allora operanti sul territorio provinciale hanno portato a stimare la domanda d'acqua complessiva per la Provincia di Siena così come riportato in Tab. 2. In essa si riassumono tutti i fabbisogni (Idropotabile, Irriguo e produttivo), che definiscono un fabbisogno medio totale di acqua per tutto il territorio, variabile tra circa  $54 \times 10^6$  e  $77 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno a seconda si consideri l'uso irriguo riferito alla superficie attualmente irrigata o a quella potenzialmente irrigabile.

### Vulnerabilità degli acquiferi

Per la rappresentazione cartografica della Vulnerabilità intrinseca del territorio provinciale ci siamo basati su di un nuovo sistema parametrico semplificato, il metodo SIPS. La carta risultante (Fig.4), presenta una zonazione data dalla somma algebrica dei quattro prodotti (punteggio x peso) riportati nell'equazione (6).

Dall'analisi quantitativa della carta risultante dall'applicazione del metodo S.I.P.S. è derivata la seguente ripartizione del territorio provinciale:

- 8,3% a vulnerabilità elevata;
- 28,9% a vulnerabilità medio-alta;
- 27,4% a vulnerabilità medio-bassa;
- 35,4% a vulnerabilità bassa.

Tab. 2 - Ipotesi di domanda d'acqua complessiva interna alla Provincia di Siena (Idropotabile, Irriguo e Produttivo).

Tab. 2 - Estimated overall water demand in the Province of Siena (for drinking, Irrigation and industrial uses).

PROVINCIA DI SIENA		Superficie km <sup>2</sup>	3822
		Popolazione dati ISTAT2001 ab.	248274
Ipotesi di fabbisogno per uso POTABILE	Dotazione teorica Provincia di Siena $l/gg \times Ab$ 320	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> / anno	29.1
Ipotesi di fabbisogno per uso IRRIGUO	Superficie irrigabile	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> / anno	39.0
	Superficie irrigata		16.4
Ipotesi di fabbisogno per uso PRODUTTIVO	Supposto pari al 30% del Potabile $l/gg \times Ab$ 96	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> / anno	8.7
Fabbisogno TOTALE di acqua nel territorio della Provincia	IRRIGUO=Superficie irrigabile	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> / anno	76.8
	IRRIGUO=Superficie irrigata		54.2

## Discussione

### Risorse idriche

Facendo riferimento alle valutazioni precedentemente effettuate e sintetizzate nella Tab. 3 relativamente a RISORSE IDRICHE e DOMANDA DI ACQUA, è possibile affermare che al momento delle stime e anche per i successivi decenni non sembrano esserci particolari criticità per ciò che riguarda la disponibilità della risorsa acqua in rapporto alla domanda dei fabbisogni idrici potabili, irrigui e produttivi.

Nonostante la positiva situazione relativa alla risorsa rinnovabile in rapporto alla domanda d'acqua e che i dati surriportati dimostrano, la reale situazione inerente la gestione da parte degli Enti preposti, emersa nel corso di questo studio, ha evidenziato anche scenari fonte di preoccupazione.

Insieme di queste conoscenze ci hanno indotto così formulare in "Amministrazione Provinciale di Siena 2012, PTCP: Barazzuoli et al.: 1) Relazione generale; 2) Norme; 3) Allegati 2010", un'analisi critica della situazione di tipo SWOT attraverso la quale si sono evidenziati i Punti di Forza (*Strengths*), i Punti di Debolezza (*Weaknesses*), le Opportunità (*Opportunities*) e le Minacce (*Treats*) del sistema "Risorse Idriche della Provincia di Siena".

### Vulnerabilità degli acquiferi

Al fine di tutelare gli acquiferi presenti nel proprio territorio, la carta della vulnerabilità degli acquiferi è stata utilizzata per redigere una vera e propria carta di piano, detta CARTA DELLA SENSIBILITÀ (Fig. 5), dove i quattro gradi di vulnerabilità vengono trasformati in tre classi di Sensibilità, ovvero:

- 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".

A tali classi di Sensibilità sono associate una serie di norme che indirizzano l'uso del territorio in maniera tale da minimizzare il rischio di inquinamento.

I vincoli previsti da tali norme dal PTCP di Siena in

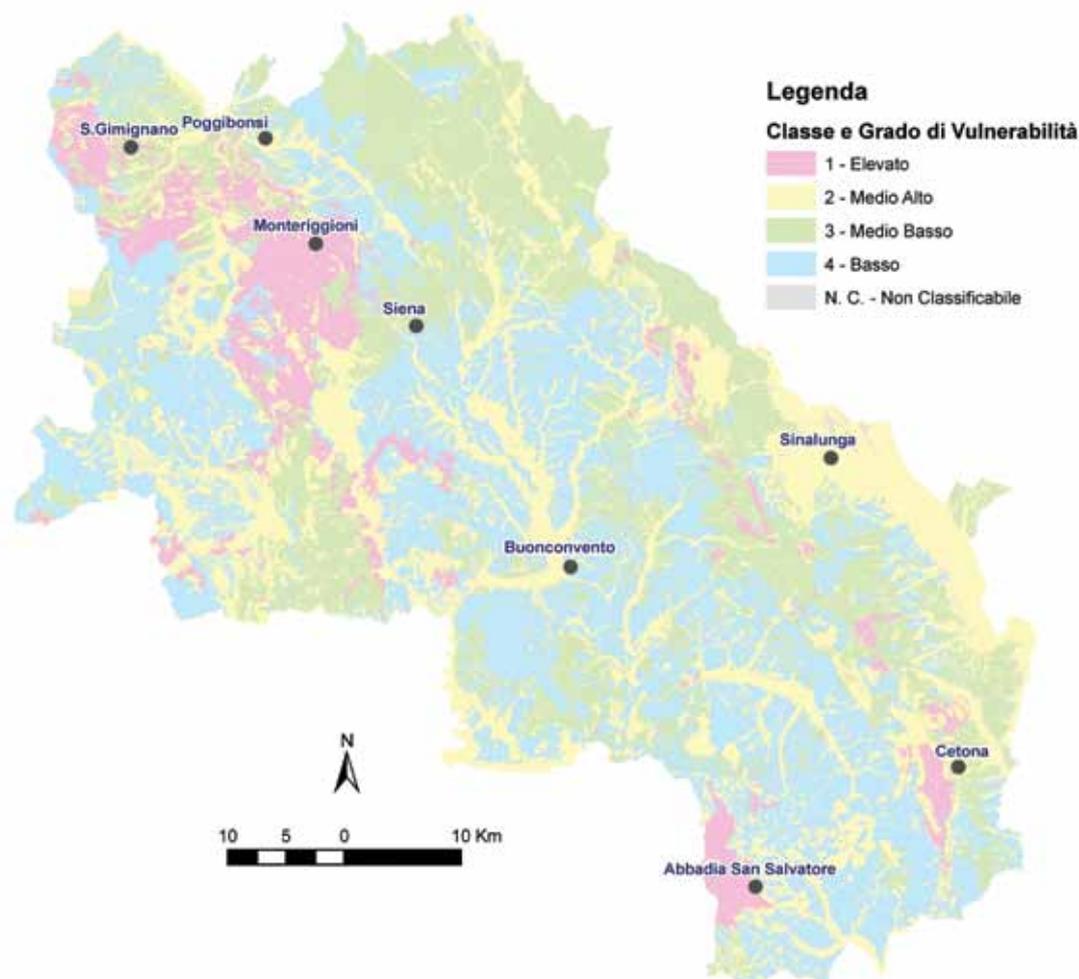


Fig. 4 - Carta della Vulnerabilità intrinseca della Provincia di Siena (da: "Amministrazione Provinciale di Siena 2012" modificata).

Fig. 4 - Intrinsic Vulnerability map of the Province of Siena (by "Amministrazione Provinciale di Siena 2012" modified).

Tab. 3 - Sintesi delle Valutazioni di Risorse Idriche e di domanda d'acqua in provincia di Siena (valori in  $10^6 m^3$ ).

Tab. 3 - Summary of water resource assessments and demand for water in the Province of Siena (units  $10^6 m^3$ ).

valori in $10^6 m^3$	RISORSE IDRICHE MEDIE ANNUE A.I. 1967-2006			DOMANDA MEDIA DI ACQUA		
	Risorsa Superficiale	Risorsa Sotterranea	RISORSA TOTALE	Uso Agricolo	Uso Potabile e Produttivo	DOMANDA TOTALE
Bacino F. Ombrone a Sasso d'Ombrone (2700 km <sup>2</sup> )	460	190	650			
Territorio Provincia di Siena (3820 km <sup>2</sup> )	700	300	1000	16	38	54
Acquiferi Significativi (CISS) Provincia di Siena		324	324			
Toscana Meridionale circa 7000 km <sup>2</sup>	1120	480	1600	95	55	150

relazione all'uso del territorio ricadente nelle aree sensibili di classe 1 e 2, sono ovviamente proporzionali alla classe di sensibilità: più stringenti per la sensibilità 1 rispetto alla 2. La distribuzione areale quantitativa delle classi di Sensibilità a scala di Provincia è riportata in Tab. 4.

Come si può notare la maggior parte del territorio (62,5%) non è sottoposto a vincolo mentre la restante parte è suddivisa in un 28,9% a vincolo medio (sensibilità 2) e in un 8,3% a vincolo elevato (sensibilità 1).

Tab. 4 - Suddivisione del territorio provinciale in base al grado di Sensibilità.

Tab. 4 - Relation between aquifer vulnerability and sensitivity classes.

Classi di Sensibilità	Grado di Sensibilità	Area (km <sup>2</sup> )	Area (%)
1	Vincolo elevato	313.1	8.3
2	Vincolo medio	1105.5	28.9
3	Nessun vincolo	2390.4	62.5
(N.C.) Non Classificabile	Non Classificabile	12.6	0.3

## Conclusioni

Nell'ambito del PTCP della Provincia di Siena si sono valutate le risorse idriche superficiali e sotterranee del territorio che, attraverso le varie metodologie utilizzate, hanno fornito i risultati di seguito riportati.

- Risorse idriche da bilancio idrico (AI 1967-2006):
  - risorsa idrica totale  $1 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno;
  - risorsa superficiale  $0,7 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno;
  - risorsa sotterranea  $0,3 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno.
- Risorse idriche sotterranee dei "corpi idrici significativi sotterranei" (CISS) della provincia

- Risorsa sotterranea complessiva di tutti i CISS  $324 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno;
- In particolare: Acquifero del Monte Amiata (Appendice 1)  $45 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno.
- Sono state inoltre stimate le domande d'acqua riferibili al territorio provinciale per i vari usi:
  - Domanda TOTALE: da  $54 \times 10^9$  a  $77 \times 10^9$  m<sup>3</sup>/anno, a seconda si consideri quello l'irriguo riferito alla superficie attualmente irrigata o potenzialmente irrigabile.

Dal confronto dei valori inerenti la domanda d'acqua con quelli delle risorse, risulta evidente che la prima è ampiamente soddisfacibile dalla seconda.

Per completare il quadro conoscitivo finalizzato alla corretta gestione delle risorse idriche del territorio provinciale, si è infine provveduto alla definizione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento.

Fra le aree individuate come vulnerabili solo quelle relative alle classi a Vulnerabilità elevata e medio-alta (Sensibilità 1 e 2, pari al 37,2 % del territorio provinciale) sono state oggetto di una normativa vincolistica che indirizza l'uso del territorio in maniera tale da minimizzare il rischio di inquinamento.

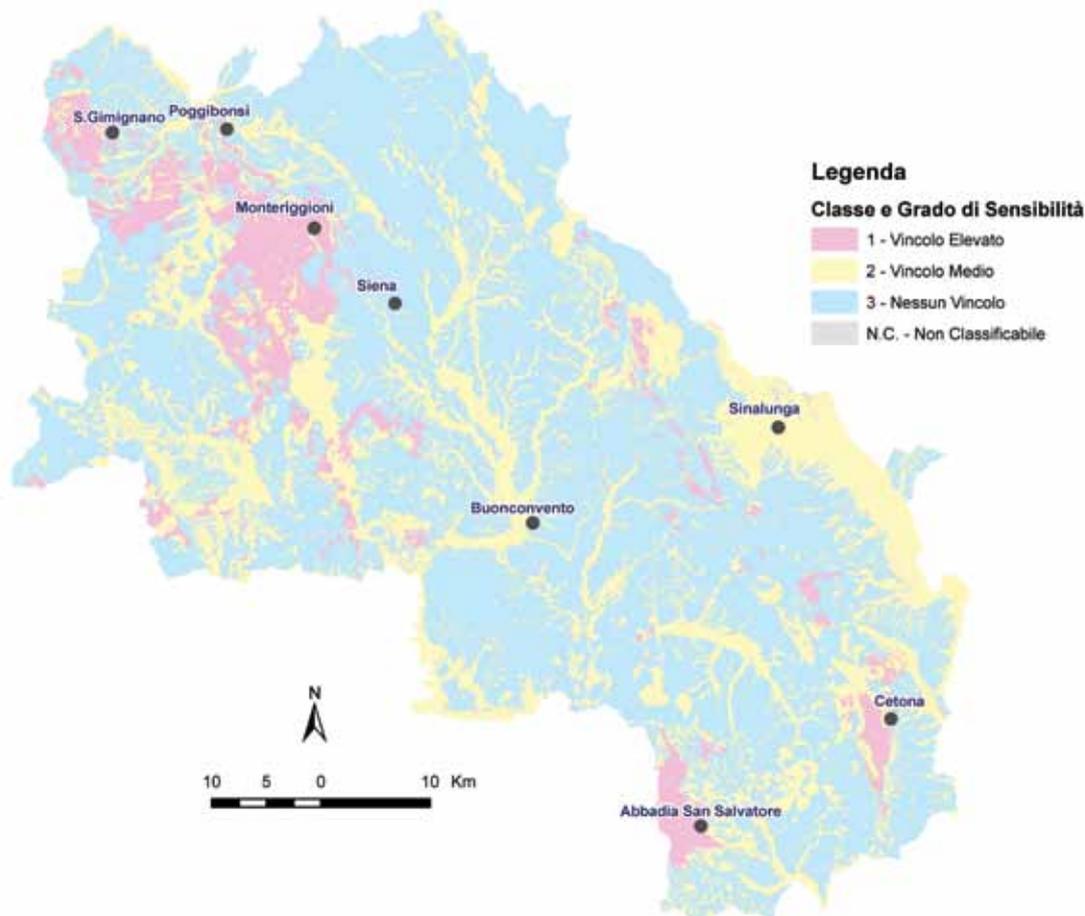


Fig. 5 - Carta della Sensibilità della Provincia di Siena (da: "Amministrazione Provinciale di Siena, 2012" modificata).

Fig. 5 - Sensitivity Map of the Province of Siena (by "Amministrazione Provinciale di Siena, 2012" modified).

## APPENDICE 1-Schede Tecniche dei corpi idrici sotterranei significativi (CISS): Esempio sintetico dell'acquifero del Monte Amiata (Barazzuoli et al. 2010)

### APPENDIX 1-Technical Data Sheets of significant groundwater bodies - Synthetic example of the aquifer of Mount Amiata (Barazzuoli et al. 2010)

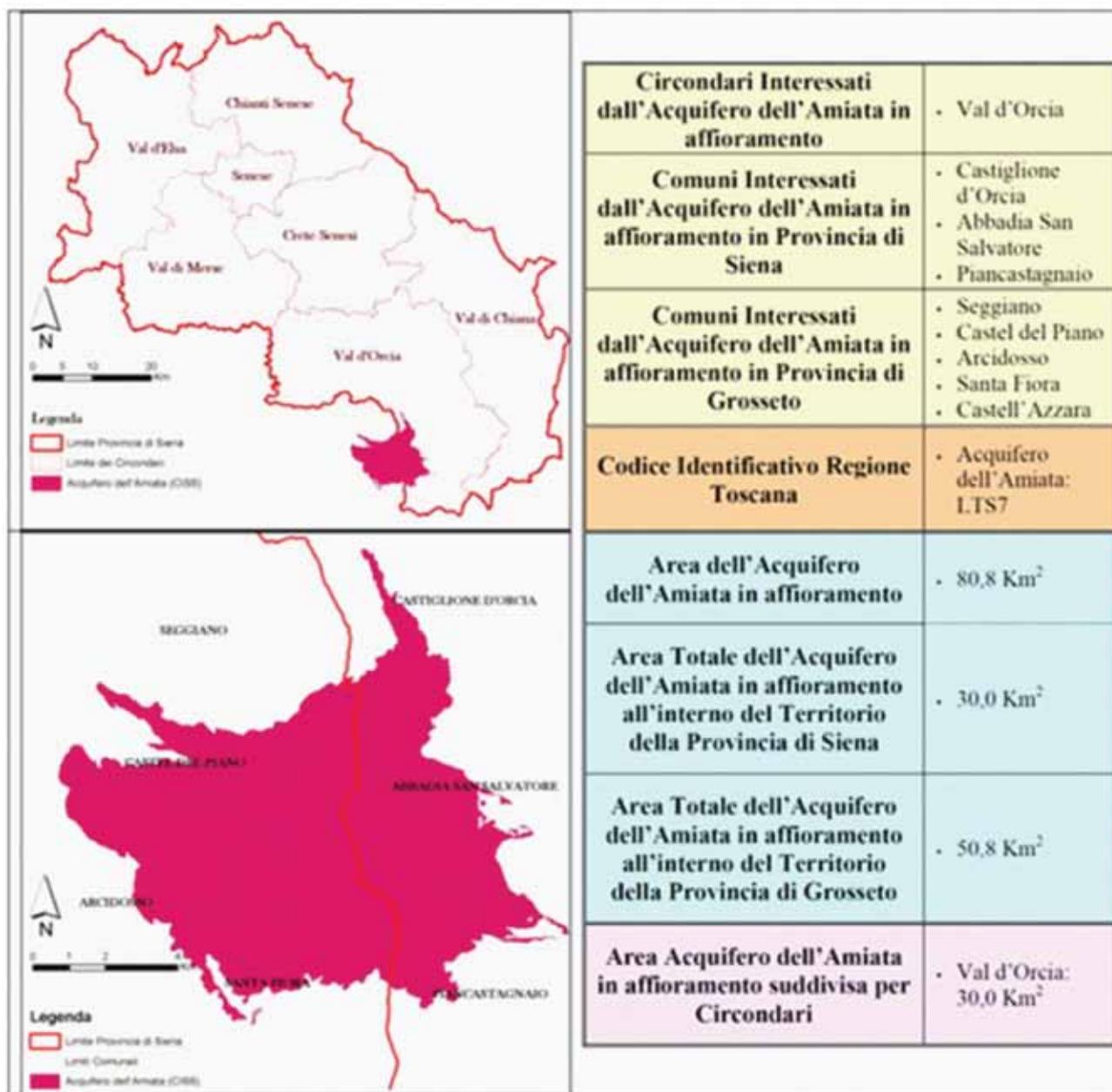


Fig. 1 APP Acquifero del Monte Amiata - Inquadramento Geografico (da: "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modificata).

Fig. 1 APP - Mount Amiata aquifer - Geographic setting (by "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modified).

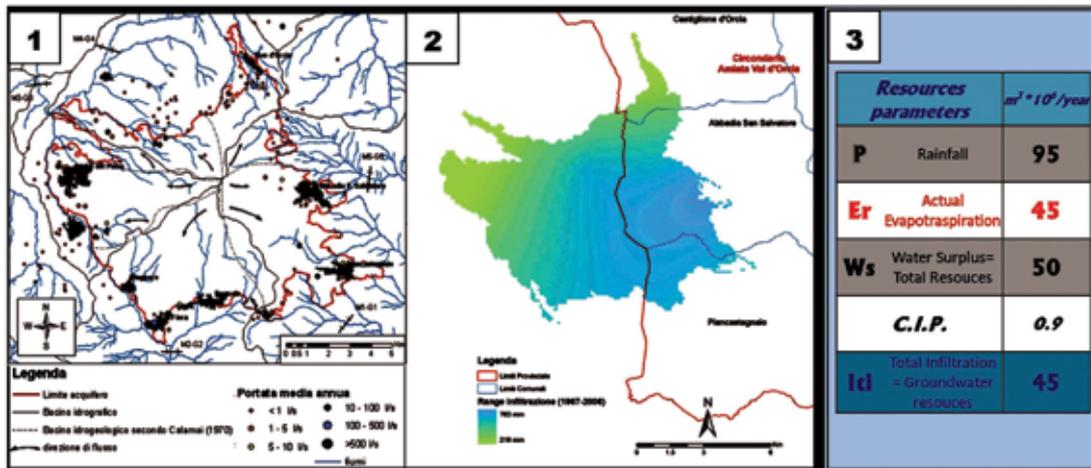


Fig. 2 APP Acquifero del Monte Amiata - Risorse idriche: 1-Schema idrogeologico dell'acquifero del M. Amiata; 2-Carta dell'infiltrazione media annua, valore medio 561 mm; 3-Bilancio idrogeologico e risorse sotterranee medie annue. (da: "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modificata).

Fig. 2 APP - Mount Amiata aquifer - Water Resources: 1-Hydrogeological profile of the M. Amiata Aquifer; 2-Mean annual recharge map: mean value 561 mm; 3-Hydrological Balance and mean annual groundwater recharge (by "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modified).

Tab. 3 Acquifero del Monte Amiata - Variabilità delle risorse idriche dell'acquifero. Variabilità statistica dei valori della risorsa idrica rinnovabile (It) in relazione all'intera area di alimentazione della falda acquifera dell'Amiata (da: "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modificata).

Tab. 3 Mount Amiata aquifer - Variability of the aquifer resources. Statistical variability of renewable water resource (It) in relation to the whole catchment area of the Amiata aquifer (by "Amministrazione Provinciale di Siena 2012", modified).

		Ws (mm/anno)	c.i.p.	It (mm/anno)	Sup. alim. Km <sup>2</sup>	It 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /anno	Totale annuo prelevato 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /anno
Valore medio	Media	623.6	0.9	561.2	80.8	45.3	8.4
	CV	0.35					
	SQM	206.0					
Range del valore atteso con la probabilità del 66%	max	829.6	0.9	755.1	80.8	61.0	
	min	417.6		367.3		29.7	
Range del valore atteso con la probabilità del 99%	max	1241.5	0.9	1143.0	80.8	92.4	
	min	5.7		0.0		0	

## BIBLIOGRAFIA

- Ammministrazione Provinciale di Siena (2012) Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena “*Land management plan in the framework of the Province of Siena*”. - Sito WEB: <http://gis.sienaprovincia.consortioterrecablate.it/?q=ptcp>. Ultimo accesso 27/03/2020.
- A.R.S.I.A. Toscana (2008) Dati relativi ai consumi idrici per uso agricolo dei Comuni della Provincia di Siena “*Water consumption data for agricultural use of the Municipalities of the Province of Siena*”. Regione Toscana ARSIA: - Sito WEB: <http://agroambiente.info.arsia.toscana.it/servlet/aeditaIdroBase>.
- A.I.T. Autorità Idrica Toscana - Piani di Ambito A.A.T.O.6 Ombrone 2008 “*A.A.T.O.6 Plans 2008, Ombrone 2008*” - Sito WEB: <https://www.autoritaidrca.toscana.it/documenti-e-normativa/pianificazione-e-governo-del-territorio/documenti-di-programmazione-preesistenti/piani-di-ambito-preesistenti/conferenza-territoriale-n-6-ombrone-piano-d-ambito-per-la-societa-acquedotto-della-flora-s-p-a/piano-d-ambito-acquedotto-della-flora-s-p-a/view>
- A.I.T. Autorità Idrica Toscana - Ricognizione dello stato dei servizi “*Reconnaissance of the state of the services*”. - Sito WEB (<https://www.autoritaidrca.toscana.it/filesplone/25209.pdf>).
- Barazzuoli P, Salleolini M (1992) Evaluation of surface water and groundwater resources in watershed planning: comparison between various estimation methods. *Mem. Soc. Geol. It.*, 48(3), 813-817.
- Barazzuoli P, Salleolini M (1993) L'acqua: risorsa, rischio e pianificazione. In *La storia naturale della Toscana meridionale “Water: resource, risk and planning. In The Natural History of Southern Tuscany”* (pp. 173-246). MILANO : Pizzi Editore.
- Barazzuoli P, Salleolini M (1994) Variabilità climatica e trend delle risorse idriche rinnovabili nella Toscana meridionale “*Climate variability and trends in renewable water resources in southern Tuscany*”. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione “Protezione delle acque sotterranee”, 49, 329-337.
- Barazzuoli P, Izzo S, Menicori P, Rigati R, Salleolini M (1995) Uso del deflusso calcolato su basi fisiografiche nella stima delle risorse idriche dell'alto bacino del F. Sinni (Basilicata) “*Use of the outflow calculated on physiographic bases in the estimate of resources water from the upper basin of the F. Sinni (Basilicata)*”. *Boll. Soc. Geol. It.*, 115(2), 287-305.
- Barazzuoli P, Mocenni B., Rigati R., & Salleolini M. (2002)a. Il contributo delle Scienze della Terra al PTCP di Siena. URBANISTICA QUADERNI, 36, 48-55.
- Barazzuoli P, Filpa A, Mocenni B, Rigati & Salleolini M (2002)b La tutela delle acque sotterranee nella pianificazione territoriale: un esempio dal PTCP di Siena *Groundwater protection in spatial planning: an example from the PTCP in Siena*.” *Geologia Tecnica & Ambientale*, 4/2002, 13-26.
- Barazzuoli P, Capacci F, Migliorini J, Mocenni, Rigati R, Salleolini M (2005) La Vulnerabilità degli Acquiferi all'inquinamento nell'ambito dello Schema Metropolitan dell'Area Senese “*The Vulnerability of Aquifers to Pollution within the Metropolitan Scheme of the Siena Area*”. *Giornale di Geologia Applicata* 2, 151-157.
- Barazzuoli P, Capacci F, Migliorini J, Rigati R (2010)a. Gruppo di lavoro aspetti geologico applicati: Idrogeologia e Geologia Tecnica Pianificatoria: 1.Relazione generale. 2 Norme. 3 Allegati. In Amministrazione Provinciale di Siena. Piano Territoriale di Coordinamento della Provincia di Siena (2012) “*Group of work geological aspects applied: Hydrogeology and Technical Geology Planning: 1.General report. 2 Standards. 3 Annexes. In Administration Provincial of Siena. Land management plan in the framework of the Province of Siena (2012)*”.
- Barazzuoli P, Capacci F, Migliorini J, Rigati R, (2010)b S.I.P.S.: Sistema parametrico semplificato per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento alla scala di area vasta “*S.I.P.S.: System simplified parametric for vulnerability assessment of aquifers to pollution at the large area scale*”, *Giornale di Geologia Applicata*, Vol.14, 11 - 23.
- Barazzuoli P, Capacci F, Gobbini M, Migliorini J, Rigati R, Mocenni B (2014) Valutazione delle risorse idriche dell'acquifero contenuto nelle vulcaniti del Monte Amiata attraverso criteri strettamente idrologici “*Assessment of aquifer water resources contained in the volcanites of Mount Amiata through criteria strictly hydrological*”. *Il Geologo* (94), 5-13.
- Barazzuoli P, Bertini G, Brogi A, Capezuoli E, Conticelli S, Doveri M, Ellero A, Gianelli G, Felice S, La Liotta D, Marroni M, Manzella A, Meccheri M, Montanari D, Pandeli E, Principe C, Ruggieri G, Sbrana A, Vaselli O, Vezzoli L (2015). Comment on: “Borgia A, Mazzoldi A, Brunori CA, Allocca C, Delcroix C, Micheli L, Vercellino A, Grieco G 2014 Volcanic spreading forcing and feedback in geothermal reservoir development, Amiata Volcano, Italia. *J. Volc. Geoth. Res.* 284, 16–31”. *Journal of volcanology and geothermal research*, 303, 1-6.
- Barazzuoli P, Capacci F, Migliorini J (2018) Individuazione del substrato impermeabile dell'acquifero della Montagnola Senese con l'ausilio di un sondaggio esplorativo “*Identification of the Montagnola Senese substrate Aquifer through of an exploratory borehole*”. *Il Geologo*, XXIX(107), 20-26.
- Barazzuoli P, Capacci F, Migliorini J (2019) Water resources provided by the major aquifers in the Province of Siena within the framework of the Provincial Territorial Plan (PTCP). In *Flowpath 2019, National Meeting on Hydrogeology. Conference Proceedings* (pp.202-204). Milano : Ledizioni srl.
- Capacci F, Migliorini J, Barazzuoli P. (2008) Studio Idrogeologico dell'acquifero del Luco (Toscana, Italia) “*Hydrogeological Study of the Luco aquifer (Tuscany, Italy)*”. *Giornale di geologia Applicata*, 8 (1) (1), 29-39.
- Celico P (1988) Prospezioni idrogeologiche “*Hydrogeological surveys*”. Voll. I e II, Liguori Editore, Napoli.
- Civita M (1994) Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento: teoria e pratica “*Aquifer vulnerability maps to pollution: theory and practice*”. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale, Sezione “Protezione delle Acque Sotterranee”, 31, Pitagora Ed., 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 “*SINTACS. A parametric system for the assessment of aquifer vulnerability cartography to pollution. Methodology and automation*”. Quaderni di tecniche di protezione ambientale. Pitagora Editrice, Bologna, 191 pp.
- Civita M. (2000) Dalla Vulnerabilità al Rischio di inquinamento, Relazione generale della sessione 1 del “3° Conv. Naz. Sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio” “*From Vulnerability to Pollution Risk, Report general of session 1 of the “3rd Naz. Conv. on Protection and Underground Water Management for the 3rd Millennium”*”. Parma 13-15/10/199, Atti, vol. 3 pp.59-76.
- Civita M (2005) Idrogeologia applicata e ambientale “*Applied and environmental hydrogeology*”. Casa Editrice Ambrosiana (Milano)
- DECRETO LEGISLATIVO 3 aprile 2006, n. 152 Norme in materia ambientale “*Rules for the organisational and functional reorganisation of soil protection*”. (GU Serie Generale n.88 del 14-04-2006 - Suppl. Ordinario n. 96)
- Giunta Regione Toscana Delibere n. 225/2003 e 939/2009 Legge 18 maggio 1989, n. 183 Norme per il riassetto organizzativo e funzionale della difesa del suolo “*Rules for the organisational and functional reorganisation of soil protection*”. (GU Serie Generale n.120 del 25-05-1989 - Suppl. Ordinario n. 38)
- Legge regionale 10 novembre 2014, n. 65 - Norme per il governo del territorio “*Rules for territorial government*”. Bollettino Ufficiale n. 53, parte prima, del 12 novembre 2014
- Lupoli A, Nicolardi V, Barazzuoli P, Azzolini E, Messina G, Nante N, et al. (2012) Drug substances in urban wastewater: a pilot study. *European Journal of public health*, 22(Supplement 2), 147-148.
- Thornthwaite CW (1948) An approach toward rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94