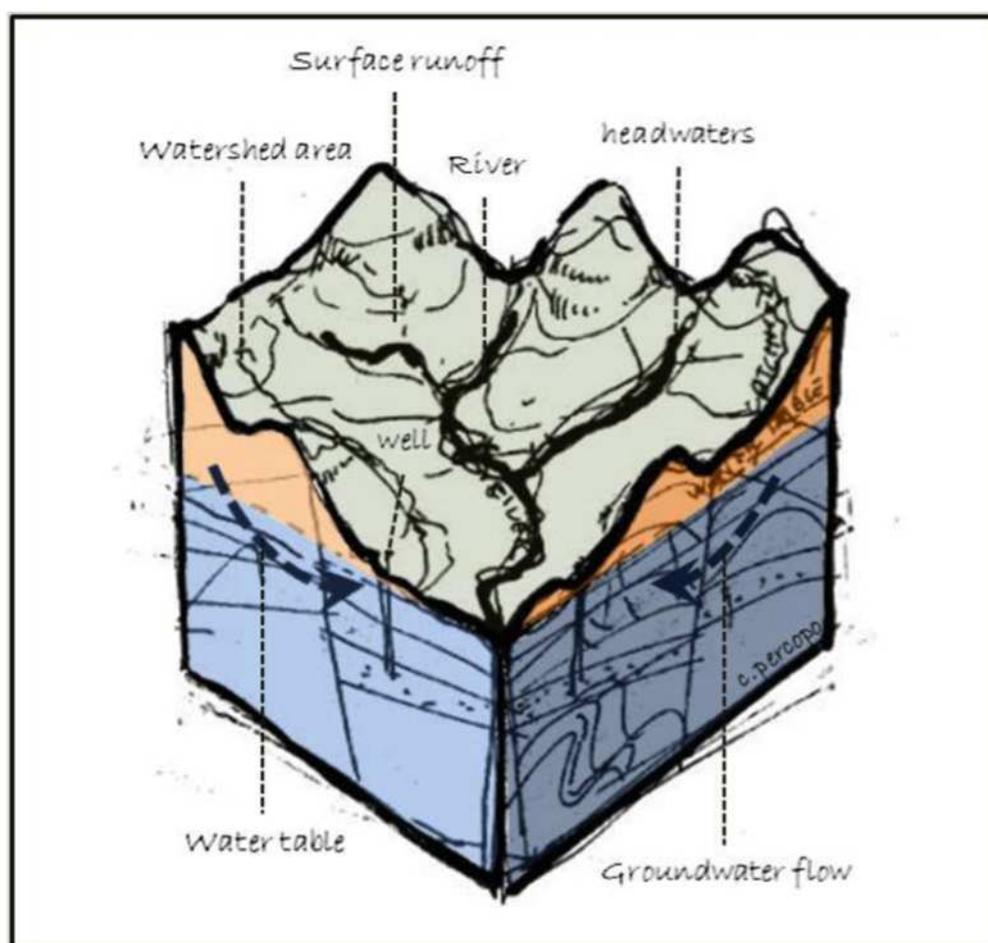


Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 15.05.2017. Doc. n.8/2017



Criteria tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei

Delibera del Consiglio SNPA. Seduta del 15.05.2017. Doc. n.8/2017

a Giovanni

Giovanni Conte era il responsabile del Settore di Idrogeologia del Servizio Geologico d'Italia in ISPRA; è scomparso prematuramente la mattina del 12 gennaio 2016, mentre veniva in ufficio. La sua scomparsa ha lasciato un grande vuoto perché Giovanni, oltre ad essere un geologo come pochi, era una persona semplice, colta e gentile, sempre attenta ai rapporti umani con gli altri colleghi.

Informazioni legali

Il Consiglio Federale, istituito presso l'ISPRA con il compito di promuovere lo sviluppo coordinato del Sistema Agenziale (ISPRA/ARPA/APPA) nonché per garantire omogeneità nello svolgimento dei compiti istituzionali delle Agenzie e di ISPRA stessa, ha deciso con Delibera del 29 maggio 2012 di contraddistinguere i prodotti editoriali e le iniziative frutto delle attività congiunte a carattere nazionale dell'ISPRA e delle Agenzie ambientali, con la denominazione Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente e un nuovo logo rappresentativo.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA), le Agenzie Regionali per la Protezione dell'Ambiente (ARPA), le Agenzie Provinciali per la Protezione dell'Ambiente (APPA) e le persone che agiscono per loro conto non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo manuale.

ISPRA - Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
Via Vitaliano Brancati, 48 – 00144 Roma
www.isprambiente.gov.it

ISPRA, Manuali e Linee Guida 157/2017
ISBN: 978-88-448-0837-2

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica
ISPRA

Coordinamento pubblicazione on-line:
Daria Mazzella
ISPRA – Area comunicazione

Giugno 2017

Autori

Carlo Percopo (Coordinatore)	ISPRA
Davide Brandolin	ARPA Friuli Venezia Giulia
Marco Canepa	ARPA Liguria
Pietro Capodaglio	ARPA Valle d'Aosta
Giuseppa Cipriano	ARPA Lombardia
Rossella Maria Gafà	ISPRA
Marco Marcaccio	ARPA Emilia-Romagna
Massimo Mazzola	ARPA Veneto
Adolfo Mottola	ARPA Campania
Elio Sesia	ARPA Piemonte
Maurizio Testa	ARPA Sardegna

Con il contributo di:

Daniela Iervolino Regione Friuli Venezia Giulia

Ringraziamenti:

Si ringraziano Letteria Settineri (*ARPA Calabria*), Mina Lacarbonara (*ARPA Puglia*), Virginia Palumbo (*ARPA Sicilia*), Alessandra Santucci (*ARPA Umbria*), Claudia Vanzetti (*ARPA Piemonte*), Teo Ferrero (*ARPA Piemonte*), Demetrio Errigo (*ARPAE Emilia-Romagna*), Giovanni Desiderio (*ARTA Abruzzo*) per la collaborazione e le utili indicazioni.

Revisione e correzione dei testi per ISPRA

Claudio Piccini (ISPRA - Dipartimento Difesa della Natura)

Citare questo documento come segue:

Percopo C., Brandolin D., Canepa M., Capodaglio P., Cipriano G., Gafà R., Iervolino D., Marcaccio M., Mazzola M., Mottola A., Sesia E., Testa M. (2017): Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei - ISPRA – Manuali e Linee Guida 157/2017. Roma, Giugno 2017.

INDICE

1. PREMESSA E SCOPO DEL LAVORO	6
2. PRINCIPI GENERALI	7
SEZIONE 1 - ANALISI DELLO STATO QUANTITATIVO	10
3. IL MODELLO CONCETTUALE DELL'ACQUIFERO	11
3.1 Limiti di permeabilità	15
3.2 Area di ricarica	15
3.3 Sorgenti puntuali e lineari	16
3.4 Linee di deflusso sotterraneo	16
3.5 Interazione acque superficiali - acque sotterranee	17
4. ANALISI DELLO STATO QUANTITATIVO E ANALISI DI RISCHIO	18
5. VALUTAZIONE DELLO STATO QUANTITATIVO DELLE ACQUE SOTTERRANEE	20
6. TEST 1 BILANCIO IDRICO	23
6.1 Fase 0 - Preselezione	25
6.2 Fase A - Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee	25
6.2.1 Metodologia di valutazione delle tendenze dei livelli a scala di corpo idrico	26
6.3 Fase B - Analisi di bilancio idrico	29
6.3.1 Periodicità del bilancio idrico per la valutazione dello stato quantitativo	30
6.4 Indicatori idrologici di bilancio	30
7. TEST 2 ACQUE SUPERFICIALI CONNESSE	34
8. TEST 3 ECOSISTEMI TERRESTRI DIPENDENTI	36
9. TEST 4 INTRUSIONE SALINA O DI ALTRO TIPO	38
9.1 Acquiferi costieri	39
9.2 Link a casi studio di monitoraggio del cuneo salino:	41
SEZIONE 2 - MONITORAGGIO DELLO STATO QUANTITATIVO	42
10. MONITORAGGIO QUANTITATIVO E INDICATORI IDROLOGICI	43
10.1 Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio	46
10.2 Periodicità del monitoraggio	46
11. MONITORAGGIO DEGLI ACQUIFERI ALLUVIONALI	49
11.1 Monitoraggio tramite misura del Livello piezometrico (H)	49
11.1.1 Livello piezometrico di riferimento	50
11.1.2 Periodicità delle misure	51
11.1.3 Risultati del monitoraggio	52
11.1.4 Analisi dei trend	53
11.1.5 Scala spaziale	53

12. MONITORAGGIO DEGLI ACQUIFERI FRATTURATI E FESSURATI E DEI SISTEMI CARSICI -----	55
12.1 Monitoraggio dello stato quantitativo tramite i deflussi-----	55
SEZIONE 3 - ALLEGATI -----	61
ALLEGATO I – INQUADRAMENTO NORMATIVO -----	62
ALLEGATO II – BILANCIO IDRICO -----	65
13. CALCOLO DEL BILANCIO IDRICO -----	65
13.1 FASE 1 – calcolo della ricarica media dell’acquifero -----	65
13.1.1 <i>Calcolo indiretto della Infiltrazione efficace</i> -----	67
13.1.2 <i>Calcolo diretto della Infiltrazione efficace</i> -----	67
13.1.3 <i>Scomposizione dell’idrogramma in flusso di base e ruscellamento</i> -----	67
13.1.4 <i>Risultato della fase 1</i> -----	69
13.2 FASE 2 – calcolo dei prelievi idrici -----	70
13.2.1 <i>Risultato della fase 2</i> -----	70
13.3 FASE 3 – Bilancio tra risorse disponibili e prelievi-----	70
13.3.1 <i>Risultato della fase 3</i> -----	71
13.4 Corpi idrici a rischio o in stato quantitativo scarso-----	71
ALLEGATO III – BILANCIO IDRICO IN FRIULI VENEZIA GIULIA -----	72
14. BILANCIO IDRICO IN FRIULI VENEZIA GIULIA -----	72
14.1 PRECIPITAZIONE (P)-----	72
14.1.1 <i>Distribuzione delle precipitazioni e delle temperature</i> -----	72
14.1.2 <i>Neve: accumulo e scioglimento</i> -----	72
14.2 EVAPOTRASPIRAZIONE REALE (Et)-----	73
14.2.1 <i>Evapotraspirazione di riferimento</i> -----	73
14.2.2 <i>Evapotraspirazione colturale</i> -----	74
14.3 DEFLUSSO SUPERFICIALE (R) -----	74
14.3.1 <i>Desscrizione della metodologia adottata</i> -----	74
14.3.2 <i>Calcolo del parametro Cn(II)</i> -----	76
14.4 INFILTRAZIONE (I) -----	81
ALLEGATO IV – TREND DEI LIVELLI PIEZOMETRICI IN EMILIA-ROMAGNA 82	
15. CORPI IDRICI SOTTERRANEI IN EMILIA-ROMAGNA -----	82
15.1 Risultati del monitoraggio quantitativo 2010-2012 -----	84
15.2 Sintesi dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei 2010-2013 (SQUAS) -----	87
15.3 Metodologia di valutazione delle tendenze dei livelli sul lungo periodo -----	89
ALLEGATO V – INTERAZIONE ACQUE SUPERFICIALI - SOTTERRANEE -----	92
16. INTERAZIONE CORPI IDRICI SOTTERRANEI/SUPERFICIALI -----	92
16.1 Misura dell’interazione acque sotterranee - acque superficiali-----	93
16.1.1 <i>Misure dirette dell’interazione acquifero - fiume</i> -----	93
16.1.2 <i>Misure indirette dell’interazione acquifero - fiume</i> -----	95
16.2 Rappresentazione dell’interazione acquifero - fiume -----	96
ACRONIMI -----	97
GLOSSARIO -----	98
BIBLIOGRAFIA -----	101

1. PREMESSA E SCOPO DEL LAVORO

La Direttiva Quadro sulle Acque (*Water Framework Directive - WFD, 2000/60/CE*) stabilisce il raggiungimento dell'obiettivo del *buono stato* qualitativo e quantitativo per tutte le acque in Europa.

Le acque sotterranee sono, per definizione, tutte le acque che si trovano sotto la superficie del suolo, nella zona di saturazione dell'acquifero e a contatto diretto con il suolo o il sottosuolo (Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152). All'Articolo 4, la WFD sancisce che “*gli Stati membri proteggono, migliorano e ripristinano i corpi idrici sotterranei, e assicurano un equilibrio tra l'estrazione e il ravvenamento delle acque sotterranee al fine di conseguire un buono stato delle acque sotterranee*”. Ne deriva che il buono stato delle acque sotterranee è determinato dal raggiungimento del buono stato sia quantitativo sia qualitativo in ciascun corpo idrico sotterraneo.

Il presente documento ha lo scopo di fornire i criteri tecnici per la valutazione dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei e per la programmazione del monitoraggio quantitativo, in accordo con quanto stabilito dalla WFD, dalle altre direttive europee sull'argomento e dalla legislazione nazionale che recepisce e disciplina la materia.

Un ulteriore obiettivo di questo documento è quello di favorire l'omogeneizzazione dei metodi di lavoro a scala nazionale, dei criteri di analisi dei dati e di progettazione delle reti di monitoraggio per quanto attiene lo stato quantitativo.

La redazione di questo documento fa seguito al lavoro svolto dal Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente riportato nel documento “*Progettazione di reti e programmi di monitoraggio delle acque ai sensi del D.Lgs 152/2006 e relativi decreti attuativi*” (ISPRA, 2014).

Dopo la presente *Premessa* e il paragrafo contenente i *Principi generali*, il documento è strutturato in tre parti:

Sezione 1 – Analisi dello stato quantitativo (Capitoli 3 - 9);

Sezione 2 – Monitoraggio dello stato quantitativo (Capitoli 10 - 12);

Sezione 3 – Allegati: Inquadramento normativo, metodologie di analisi e monitoraggio, presentazione di alcuni casi studio (Capitoli 13 – 16).

Nella prima sezione sono descritti i metodi di analisi dello stato quantitativo ai sensi della WFD. Sono illustrati i criteri comuni da adottare a scala nazionale in funzione della tipologia dei corpi idrici sotterranei e delle interazioni con i corpi idrici superficiali e con le acque marine e in funzione delle pressioni che insistono sui diversi corpi idrici.

Nella seconda sezione, dedicata al monitoraggio, vengono forniti i criteri tecnici per il monitoraggio e l'analisi degli indicatori idrologici dello stato quantitativo, in funzione delle diverse tipologie di acquifero.

La terza parte riporta, infine, oltre all'inquadramento normativo, la descrizione più dettagliata di alcune metodologie, come ad esempio il calcolo di bilancio idrico e l'analisi della interazione acque sotterranee-acque superficiali. Vengono inoltre presentati alcuni casi studio esemplificativi delle metodologie proposte.

2. PRINCIPI GENERALI

Definizione dello stato quantitativo

Lo stato quantitativo *buono* delle acque sotterranee è definito dalla WFD (European Commission, 2000, Allegato V, punto 2 *Acque sotterranee*), come segue:

“Stato buono: Il livello di acque sotterranee nel corpo idrico è tale che la media annua dell'estrazione a lungo termine non esaurisca le risorse idriche sotterranee disponibili.

Di conseguenza, il livello delle acque sotterranee non subisce alterazioni antropiche tali da:

- *impedire il conseguimento degli obiettivi ecologici (...) per le acque superficiali connesse;*
- *comportare un deterioramento significativo della qualità di tali acque;*
- *recare danni significativi agli ecosistemi terrestri direttamente dipendenti dal corpo idrico sotterraneo.*

Inoltre, alterazioni della direzione di flusso risultanti da variazioni del livello possono verificarsi, su base temporanea o permanente, in un'area delimitata nello spazio; tali inversioni non causano tuttavia l'intrusione di acqua salata o di altro tipo né imprimono alla direzione di flusso alcuna tendenza antropica duratura e chiaramente identificabile che possa determinare siffatte intrusioni”.

Il buono stato quantitativo di un corpo idrico sotterraneo è pertanto raggiunto quando sono soddisfatti contemporaneamente tutti i seguenti criteri:

- le risorse idriche sotterranee disponibili sono superiori ai prelievi, in un'analisi quantitativa per unità di bilancio condotta su lungo termine (analisi pluriennale);
- le variazioni per cause antropiche dei livelli di falda nel corpo idrico sotterraneo non provocano danni alle acque superficiali e agli ecosistemi connessi, anche quando il bilancio idrico non rilevi condizioni di criticità da un punto di vista quantitativo;
- assenza di intrusione salina o di altro tipo nel corpo idrico sotterraneo, causata da alterazioni di origine antropica della direzione di flusso.

Va sottolineato che lo “stato quantitativo” di cui si tratta in questo documento è riferito alle disposizioni della Direttiva Quadro sulle Acque (WFD) secondo la quale lo stato *buono* o *scarso* è riferito alla presenza di pressioni antropiche sul corpo idrico.

Pertanto, l'assenza di pressioni (prelievi significativi di acque dal corpo idrico sotterraneo o dai corpi idrici connessi che alimentano le acque sotterranee) implica uno *stato quantitativo buono per definizione* ai sensi della WFD.

In tal caso le eventuali alterazioni dei livelli piezometrici sono da attribuire ad altre cause di tipo naturale, come ad esempio la variazione nel regime degli afflussi (precipitazioni), variazioni nella entità dell'evapotraspirazione reale, variazioni per cause naturali del livello di base, cambiamenti climatici, ecc.

In base a questi principi, il *buono stato quantitativo* è raggiunto quando:

- (i) i prelievi medi su lungo termine delle acque sotterranee non superano l'effettiva disponibilità della risorsa idrica, al netto delle portate necessarie a mantenere il buono stato chimico-fisico ed ecologico delle acque superficiali dipendenti da quelle sotterranee (fiumi perenni, laghi, aree umide);
- (ii) il consumo di risorse idriche sotterranee ad opera di prelievi, derivazioni e altre pressioni dirette o indirette, non danneggia né qualitativamente né quantitativamente le acque superficiali e gli ecosistemi terrestri che dipendono dai corpi idrici sotterranei;
- (iii) non sono presenti fenomeni di intrusione salina o di altro tipo nel corpo idrico sotterraneo, causati da prelievi o da alterazioni antropiche del deflusso idrico sotterraneo.

Per la verifica della prima delle tre condizioni è necessario effettuare l'analisi di bilancio idrico su lungo termine riferita all'unità idrogeologica (corpo idrico o acquifero). Tale analisi, ripetuta

con una definita periodicità, permette il confronto tra i volumi medi delle risorse idriche sotterranee disponibili (volumi di ricarica dell'acquifero) e i volumi idrici medi prelevati.

L'unità spaziale di riferimento per questa analisi è l'*unità di bilancio idrogeologico*, definita a partire dalla identificazione del modello concettuale dell'acquifero.

Modello concettuale dell'acquifero

Il *modello concettuale* descrive, con l'ausilio della cartografia e di sezioni idrogeologiche, lo schema di circolazione delle acque sotterranee.

In particolare, nel modello concettuale devono essere identificate l'area di ricarica dell'acquifero, le direzioni di deflusso sotterraneo, i punti di recapito delle acque, le interazioni tra le acque superficiali e quelle sotterranee, le pressioni antropiche esistenti, con una rappresentazione alla scala spaziale adeguata al corpo idrico o all'acquifero (v. Cap. 3).

Esso costituisce, laddove siano disponibili i dati, la base per la definizione del modello numerico, alimentato e migliorato sulla base dei dati raccolti dalla rete di monitoraggio quantitativo. Il modello concettuale è indispensabile per procedere alla identificazione dei corpi idrici sotterranei, alla definizione del programma di monitoraggio e all'interpretazione dei dati derivanti da questo (D. Lgs. 30/09).

Monitoraggio

Come stabilito nella normativa europea e nazionale, i livelli delle acque sotterranee rappresentano l'indicatore idrologico principale per il monitoraggio dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei. *“Tuttavia, mentre il monitoraggio dei livelli idrici è essenziale per determinare gli impatti e identificare i trends a lungo termine, esso è insufficiente da solo e ulteriori informazioni e parametri saranno in genere necessari”* (European Commission, 2009), come ad esempio le portate dei corsi d'acqua drenanti e delle sorgenti puntuali, la direzione del deflusso delle acque sotterranee, la correlazione precipitazioni/livelli piezometrici e alcuni parametri chimico-fisici essenziali per la valutazione dei fenomeni di intrusione salina (o di altro tipo) nelle acque dolci.

I livelli piezometrici sono rappresentati dalle misure della quota di falda misurata nei pozzi e nei piezometri. Nel caso di sorgenti naturali o di sorgenti da gallerie drenanti, il monitoraggio dello stato quantitativo viene effettuato tramite la misura delle portate. Nel caso dei pozzi, le misure di livello possono essere espresse sia come *piezometria*, ovvero espresse in quote assolute del pelo libero dell'acqua rispetto al livello medio del mare, sia come *soggiacenza*, espresse in termini di profondità dell'acqua dal piano campagna. In quest'ultimo caso si parlerà di *salianza* quando la quota del livello piezometrico (gradiente idraulico) è superiore alla quota del piano campagna, assumendo quindi valori negativi di *soggiacenza*.

La definizione delle reti di monitoraggio, a seguito dell'individuazione dei corpi idrici sotterranei, è riportata nel D. Lgs. 30/09 Allegato 4, in cui viene descritta la rete necessaria al monitoraggio dello stato quantitativo e gli scopi per cui essa è realizzata:

- *stabilire lo stato chimico e quantitativo di tutti i corpi idrici sotterranei, inclusa una valutazione delle risorse idriche sotterranee disponibili;*
- *supportare l'ulteriore caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei;*
- *validare la valutazione del rischio;*
- *stimare la direzione e la portata delle acque sotterranee che oltrepassano la frontiera tra Stati membri;*
- *assistere la progettazione dei programmi di misure;*
- *dimostrare la conformità con gli obiettivi delle aree protette comprese le aree protette designate per l'estrazione di acque destinate al consumo umano;*
- *definire la qualità naturale delle acque sotterranee, incluse le tendenze naturali;*
- *identificare le tendenze nella concentrazione di inquinanti di origine antropica e la loro inversione.*

Inoltre, la stessa norma stabilisce che le Regioni debbano assicurare che i programmi di monitoraggio siano basati su:

- *identificazione dei corpi idrici di cui all'Allegato 1, Parte A del citato Decreto;*
- *i risultati della caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei;*
- *il modello concettuale dell'acquifero, di cui all'Allegato 1, parte C del citato Decreto.*

La frequenza di monitoraggio e la densità delle stazioni della rete dipendono dalle caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi riportate nel *Modello concettuale idrogeologico*.

La rete di monitoraggio deve inoltre includere quegli indicatori che permettano di controllare lo stato qualitativo ed ecologico dei corpi idrici superficiali, connessi con quello sotterraneo, in quanto tale corpo idrico sotterraneo è da classificare in stato quantitativo scarso quando le alterazioni antropiche di livello di falda o del deflusso sotterraneo danneggiano le acque superficiali connesse, anche nel caso in cui le risorse idriche sotterranee siano superiori ai prelievi.

In tal senso esiste una relazione tra le reti di monitoraggio qualitativo ed ecologico delle acque superficiali e le reti di monitoraggio quantitativo.

Analisi dei livelli piezometrici

Laddove esista una chiara evidenza di un decremento persistente (cioè relativo ad un periodo pluriennale) dei livelli di falda causato dai prelievi idrici o da altre pressioni antropiche (derivazioni, prelievi da altri corpi idrici connessi, ecc..), la valutazione dello stato quantitativo può essere fatta anche sulla base dei soli dati di livello piezometrico. In questo caso infatti il corpo idrico (o i corpi idrici sotterranei all'interno dell'acquifero oggetto di monitoraggio) è classificabile in *'stato quantitativo scarso'* anche senza l'ulteriore analisi di bilancio idrologico.

La valutazione di stato basata sui livelli piezometrici dovrebbe basarsi su una rete rappresentativa di pozzi, in grado di fornire una rappresentazione ad una scala spaziale adeguata della geometria della falda e delle sue variazioni nel tempo.

Come sopra già accennato, nell'analisi dei livelli delle acque sotterranee vanno tenuti in considerazione anche i parametri chimico-fisici, in genere previsti nel relativo monitoraggio chimico delle acque sotterranee, allo scopo di verificare i possibili effetti indotti dai prelievi sull'intrusione salina o diffusione di contaminanti.

Analisi di bilancio

Per l'analisi di bilancio sono necessari, oltre ai dati di monitoraggio quantitativo già descritti, i dati di base idrologici e meteo-climatici richiesti per il calcolo della ricarica naturale degli acquiferi, nonché quelli dei prelievi che insistono nei diversi acquiferi.

Le reti e i programmi di monitoraggio quantitativo delle acque superficiali e sotterranee includono pertanto tutti i dati necessari al calcolo degli afflussi, dell'infiltrazione efficace, dei deflussi (portate), dei livelli idrometrici, della interazione tra le acque superficiali e quelle sotterranee e i dati chimico-fisici di base per il controllo della intrusione salina o di altro tipo, inclusi nel monitoraggio chimico delle acque sotterranee.

La mancanza dei dati riguardanti i prelievi di acque sotterranee per i diversi usi non dovrebbe impedire in ogni caso di effettuare l'analisi di bilancio idrico, in considerazione dell'importanza che rivestono, nella gestione delle risorse idriche sotterranee, i dati relativi alla ricarica efficace dell'acquifero e alla risorsa naturale sotterranea effettivamente disponibile.

SEZIONE 1 - ANALISI DELLO STATO QUANTITATIVO

3. IL MODELLO CONCETTUALE DELL'ACQUIFERO

La Direttiva Quadro sulle Acque (WFD) definisce il “corpo idrico sotterraneo” come un “*volume distinto di acque sotterranee contenuto da uno o più acquiferi*”.

Esso rappresenta quindi il mezzo liquido contenuto nella roccia serbatoio. La definizione di corpo idrico sotterraneo è legata all'identificazione dell'acquifero (o di più acquiferi) che lo contiene.

In base alla definizione data in idrogeologia, l'acquifero “*è una formazione idrogeologica permeabile che permette il deflusso significativo di una falda idrica sotterranea e la captazione di quantità apprezzabili d'acqua*” (Castany, 1982).

L'acquifero è definito da alcuni elementi fisici che permettono di definire il *modello idrogeologico concettuale* (Figura 1):

- (1) **limiti di permeabilità**, costituiscono i confini dell'acquifero. Essi definiscono dimensioni e volume della roccia serbatoio;
- (2) **l'area di ricarica**, rappresenta la superficie sulla quale gli afflussi meteorici alimentano l'acquifero, attraverso i percorsi del deflusso sotterraneo;
- (3) **i punti di recapito delle acque** sotterranee (*sorgenti puntuali*, localizzate in aree ben definite e *sorgenti lineari*, ovvero contributi in acque sotterranee lungo determinati tratti dei corsi d'acqua “drenanti” o settori costieri).
- (4) **direzione del flusso sotterraneo** delle acque, che si muovono all'interno della roccia serbatoio dalle aree di alimentazione fino ai punti di recapito;

Questi elementi sono necessari alla definizione del modello concettuale idrogeologico.

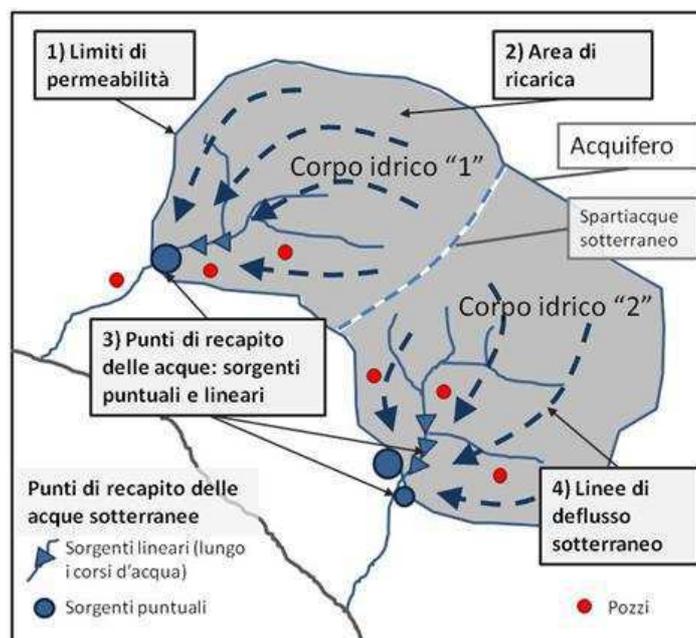


Figura 1 - Schema esemplificativo del modello concettuale di un acquifero

La figura 1 mostra uno schema teorico del “*Modello concettuale*” di due corpi idrici, separati tra loro da uno spartiacque sotterraneo. Oltre ai già citati elementi principali, nel modello concettuale vanno identificate anche le pressioni antropiche.

I punti di emergenza delle acque sotterranee sono rappresentati dalle sorgenti localizzate e da quelle lineari, identificate dagli incrementi di portata nei fiumi che drenano le strutture idrogeologiche.

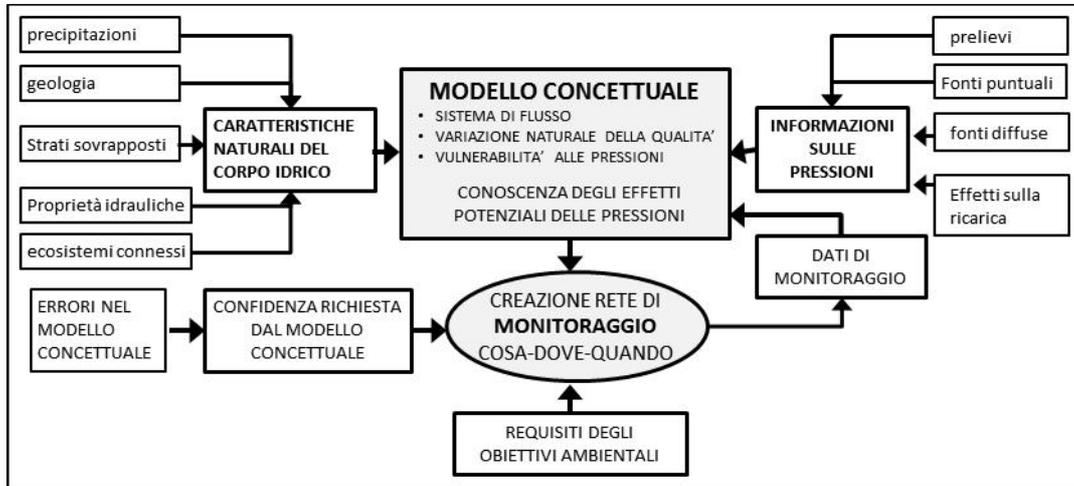


Figura 2 – Elementi contenuti nel modello concettuale dei corpi idrici sotterranei (da: D. Lgs. 30/09)

In Figura 2 si riportano gli elementi necessari alla costruzione del modello concettuale del corpo idrico sotterraneo, riportati nel Decreto Legislativo 16 marzo 2009, n. 30 (Allegato 1 *Identificazione e caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei*, Parte C – *Modello concettuale*). In esso sono evidenziati i rapporti di relazione tra le informazioni di base, il modello idrogeologico concettuale e la rete di monitoraggio i cui dati a loro volta alimentano e migliorano le conoscenze acquisite.

In base alla conoscenza dello schema di circolazione sotterranea delle acque è possibile, pertanto, programmare il monitoraggio quantitativo, scegliendo i punti più idonei e rappresentativi da sottoporre alla misura degli indicatori idrologici, e identificare le relazioni idrauliche tra le acque di superficie e quelle sotterranee, da cui dipende inoltre la classificazione del loro stato quantitativo.

Uno degli elementi chiave nella definizione del modello concettuale idrogeologico è infatti l'**interazione tra le acque superficiali e quelle sotterranee**. Questo elemento è necessario ai fini della valutazione dello stato quantitativo ai sensi della WFD, che è in stato *buono* quando le alterazioni causate dalle pressioni antropiche non danneggiano le acque superficiali e gli ecosistemi terrestri connessi.

Le metodologie per l'identificazione delle interazioni tra acque superficiali e sotterranee e la loro rappresentazione nel modello concettuale sono riportate in appendice al presente documento (Allegato V).

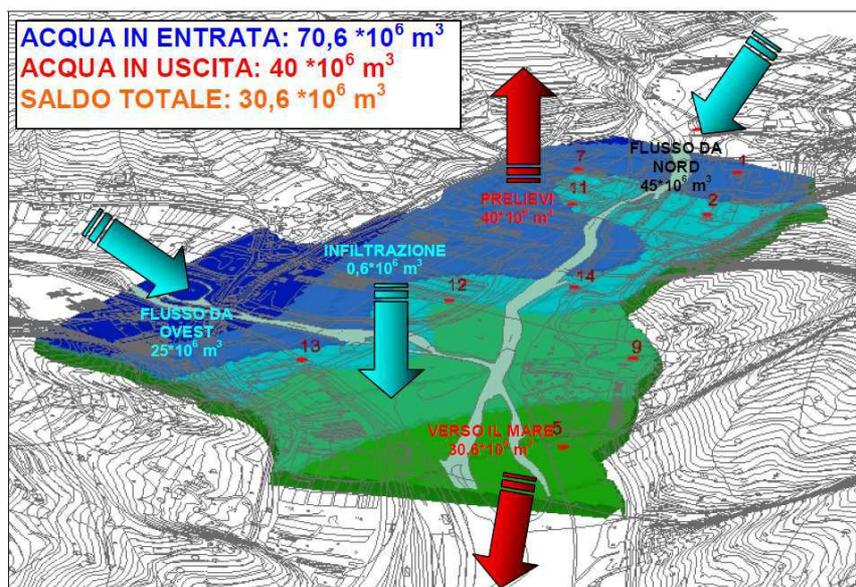


Figura 3 - Modello idrogeologico concettuale dell'acquifero alluvionale del Fiume Roja (da: Barazzuoli et al., 2006)

La Figura 3 mostra un esempio dei termini del bilancio che devono essere considerati nel modello concettuale: nel caso specifico si tratta della piana alluvionale del Fiume Roja, presso la foce, tratto dallo studio condotto dall'Università degli Studi di Siena nell'ambito del Progetto PIC Interreg. III A 2000-2006 "Eurobassin". Il modello numerico realizzato è relativo ad una porzione limitata del bacino idrogeologico del Roja, tuttavia essa è significativa a causa dei prelievi di risorse idriche concentrate in questo tratto della piana. La Figura mostra gli scambi idrici da e verso l'acquifero. Dal bilancio calcolato con il modello numerico si ricava che, a fronte di un contributo di risorse idriche sotterranee medio annuo di circa $70 \text{ Mm}^3/\text{anno}$ nella piana, i prelievi sono pari a circa $40 \text{ Mm}^3/\text{anno}$ e le uscite verso mare sono pari a circa $30,6 \text{ Mm}^3/\text{anno}$.

In letteratura sono disponibili molti esempi di modello concettuale per lo studio delle risorse idriche sotterranee nelle diverse tipologie di complessi idrogeologici. Ad esempio, in Figura 4 viene identificato il modello concettuale dell'acquifero carbonatico reatino (tratto da Martarelli et al., 2008) la cui modellazione numerica è stata condotta attraverso le seguenti fasi:

- a) identificazione dei complessi idrogeologici;
- b) acquisizione di dati climatici e idrologici disponibili;
- c) censimento di punti d'acqua (pozzi e sorgenti) e misure di portata fluviali in diverse campagne;
- d) rappresentazione dei dati acquisiti attraverso un sistema informativo territoriale;
- e) ricostruzione della circolazione idrica sotterranea e delle sue interazioni con le acque superficiali.

Il risultato dell'analisi idrogeologica ha portato alla seguente rappresentazione del modello concettuale:

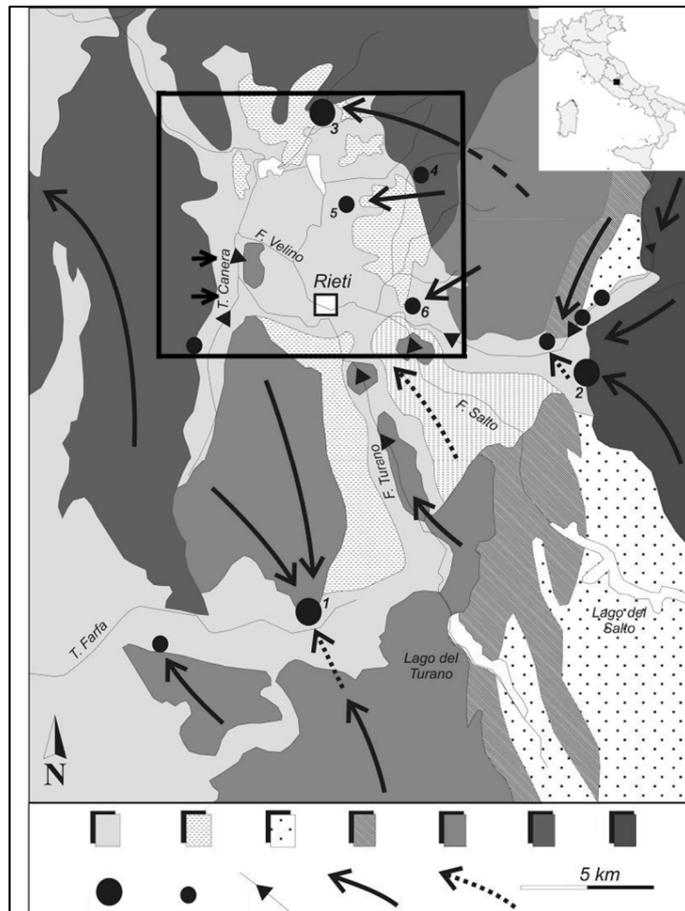


Figura 4 – Schema idrogeologico dell'area reatina e sabina (Martarelli et al., 2008)

Un utile documento di interesse ai fini della modellazione numerica degli acquiferi, ed in particolare della differente modellazione tra gli acquiferi di pianura e quelli carbonatici delle aree montuose, è fornito in Preziosi & Romano, 2009. Nel lavoro sono riportati due esempi di modellazione numerica rispettivamente in un acquifero carbonatico, in area montuosa, e in un acquifero alluvionale, mettendo in luce le differenze dei dati disponibili nei differenti contesti idrogeologici per la rappresentazione del modello concettuale (Figura 5).

Nell'acquifero carbonatico, dove mancano pozzi all'interno dell'idrostruttura, sono meglio conosciute le condizioni al contorno. In questo caso, i dati per la modellazione sono quindi riferiti ai risultati del bilancio idrologico. Nell'acquifero alluvionale, viceversa, sono note molto bene le condizioni idrogeologiche interne e la geometria della superficie piezometrica, per la presenza di numerosi pozzi, captazioni, indagini geologiche, mentre è difficile per la variabilità dei parametri, ottenere affidabilità dei risultati dall'analisi di bilancio. Queste considerazioni sulla disponibilità dei dati in funzione del diverso tipo di acquifero giustificano, in alcuni casi, la necessità di considerare come indicatore di monitoraggio alternativo ai livelli piezometrici (vedi Cap. 10) la portata delle sorgenti in uscita dagli acquiferi montuosi.

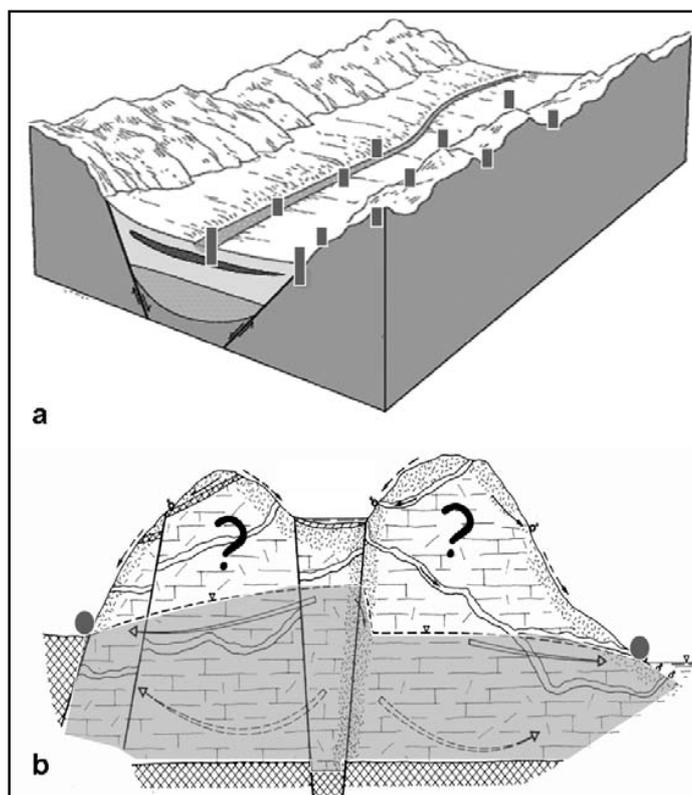


Figura 5 - Confronto fra l'assetto di un acquifero di piana alluvionale (a) ed un acquifero montuoso carbonatico. Nel primo caso, la presenza di pozzi permette di studiare l'assetto interno dell'acquifero; nel secondo caso l'informazione disponibile riguarda le condizioni al contorno (da: Preziosi & Romano, 2009)

3.1 Limiti di permeabilità

La definizione dei limiti di permeabilità delle strutture idrogeologiche (complessi idrogeologici) all'interno delle quali sono compresi i corpi idrici sotterranei è il primo passo per la loro identificazione e caratterizzazione. La cartografia idrogeologica prodotta negli ultimi 20 anni copre una buona porzione del territorio nazionale a diverse scale di dettaglio (Capelli & Mazza, 2009¹).

Una prima delimitazione dei complessi idrogeologici può essere fatta sulla base delle conoscenze già acquisite e della cartografia geologica nazionale².

3.2 Area di ricarica

All'interno di ciascun sistema idrogeologico (idrostruttura, acquifero o corpo idrico) deve essere individuata l'area di ricarica delle risorse idriche sotterranee. Essa corrisponde alla superficie sulla quale la lama d'acqua affluita si infila ed alimenta la falda idrica, al netto delle perdite per evapotraspirazione reale.

L'identificazione dell'area di ricarica del corpo idrico, di rilevanza anche nell'analisi delle pressioni, procede attraverso lo studio geologico del territorio e sulla base dei dati del bilancio idrologico.

¹ <http://www.idrogeologiaquantitativa.it/wordpress/wp-content/uploads/2010/04/Pubbl-2009-CARTE-IDROGEOLOGICHE-REGIONALI-IN-ITALIA.pdf>

² <http://www.isprambiente.gov.it/Media/carg>

3.3 Sorgenti puntuali e lineari

Le acque sotterranee trovano recapito nelle emergenze puntuali e lineari. Le prime sono emergenze localizzate in aree poste a quote ben definite e possono trovarsi in prossimità dei corsi d'acqua, nelle zone di risorgiva (alta pianura), lungo la costa o al contatto tra l'acquifero e i terreni meno permeabili che rappresentano limiti idrogeologici (*aquiclude*).

Le sorgenti lineari sono invece sorgenti diffuse lungo tratti dei corsi d'acqua che drenano le acque sotterranee. Esse vengono identificate con i metodi propri della idrogeologia quantitativa e “*non devono essere confuse con generici contributi di acque di scorrimento superficiale*” (Boni *et al.*, 1993a).

Le sorgenti lineari rappresentano il luogo di interazione tra le acque sotterranee ed i corsi d'acqua superficiali. La loro individuazione permette una prima definizione della dinamica di interazione tra i corpi idrici sotterranei e quelli superficiali.

Esse variano nello spazio e nel tempo a seconda delle condizioni meteorologiche, del regime degli afflussi e in funzione delle pressioni antropiche (in particolare dei prelievi) cui l'acquifero è sottoposto.

Le sorgenti lineari vengono individuate tramite misure di portata effettuate in serie, lungo il corso d'acqua da monte a valle, in modo da registrare gli incrementi dovuti al flusso di base (v. Allegato V).

In una visione unitaria del sistema ‘*acquifero-fiume*’, si capisce come abbia senso considerare le acque sotterranee e superficiali come un “*continuum*” in termini di *risorsa idrica*. Il fiume perenne rappresenta in alcuni periodi dell'anno la manifestazione di superficie dell'acquifero: ne riceve le acque e, da queste, è sostenuto nei periodi di magra. Esso rappresenta il livello di base dell'acquifero e subisce variazioni di portata in funzione delle oscillazioni del livello di falda nel sottosuolo.

La descrizione della ‘*interazione acque superficiali-acque sotterranee*’ si esplica attraverso la localizzazione degli incrementi di portata in alveo (sorgenti lineari) o dei decrementi (perdite verso la falda al netto dei prelievi), individuando così i processi di scambio idrico e le loro variazioni nello spazio e nel tempo.

3.4 Linee di deflusso sotterraneo

Una volta individuata l'area di ricarica del corpo idrico sotterraneo e i punti di recapito delle acque, la conoscenza della geologia del territorio, dei rapporti tra le diverse formazioni geologiche e della natura dei limiti idrogeologici permette di ricostruire le direttrici del deflusso sotterraneo delle acque.

La presenza sul territorio di una rete di monitoraggio delle acque sotterranee (pozzi, piezometri, sorgenti) permette di migliorare la conoscenza della geometria della superficie piezometrica e di individuare i gradienti idraulici. In tal modo è possibile rappresentare su carta le curve di eguale potenziale idraulico (curve *isopieze* o *idroisopse*) e le direttrici del deflusso sotterraneo.

Si tratta spesso di un processo iterativo, che procede per tentativi in funzione del miglioramento delle conoscenze: ad esempio, dopo un primo ciclo di monitoraggio dei livelli di falda nel sottosuolo, l'aumento delle misure disponibili consente di rappresentare con una certa omogeneità tutta l'area del corpo idrico (o dell'acquifero).

3.5 Interazione acque superficiali - acque sotterranee

I principi generali della WFD pongono come condizione di *buono stato quantitativo* dei corpi idrici sotterranei quello del buono stato delle acque superficiali da cui esse dipendono.

Risulta pertanto evidente che nel modello idrogeologico concettuale debbano essere evidenziate, dove esistono e dove sono significative, le interazioni tra le acque superficiali e quelle sotterranee, identificando le dipendenze idrauliche, i rapporti idrogeologici tra i corpi idrici, le direzioni di deflusso delle acque e degli scambi idrici.

In questo documento vengono forniti nell'Allegato V alcuni approfondimenti per l'analisi di tali interazioni.

Tra gli elementi idrogeologici già citati, quello della 'continuità' tra le risorse sotterranee e superficiali dev'essere enfatizzato. Le une e le altre rappresentano un unico sistema globale in connessione idraulica, chimico-fisica e biologica (Winter *et al.* 1998).

Ciascun corso d'acqua perenne (o area umida di superficie) non può sussistere senza le acque sotterranee che lo alimentano e ne sostengono la portata in periodi di magra (Boni *et al.* 1993a).

Tali fiumi rappresentano il livello di base delle grandi strutture idrogeologiche che attraversano e di cui drenano le acque, rappresentando sorgenti lineari delle acque sotterranee così come le sorgenti puntuali.

4. ANALISI DELLO STATO QUANTITATIVO E ANALISI DI RISCHIO

Come definito nell'art. 2 della WFD, lo “stato quantitativo” delle acque sotterranee è “l'espressione del grado in cui un corpo idrico sotterraneo è affetto da prelievi diretti o indiretti” di risorse idriche.

Le risorse idriche sotterranee disponibili sono infatti definite come “l'aliquota (rate, nel testo originale della Direttiva, che sta per 'aliquota' o 'porzione' in senso quantitativo del termine e pertanto riferito ai volumi idrici) media su lungo periodo della ricarica naturale complessiva dell'acquifero, meno l'aliquota media su lungo periodo delle portate necessarie al raggiungimento degli obiettivi di qualità ecologica per le acque superficiali connesse, specificati all'art. 4 della stessa WFD, al fine di evitare ogni significativa diminuzione dello stato ecologico sia di tali acque superficiali connesse sia degli ecosistemi terrestri connessi [con il corpo idrico sotterraneo]”.

Al fine di una corretta comprensione della terminologia usata nel presente documento, si riporta la definizione data in idrologia di “risorsa idrica disponibile”, che descrive la *quantità d'acqua naturalmente rinnovabile che può essere estratta da un sistema idrogeologico durante un determinato periodo di tempo* (ad es. l'anno idrologico o l'anno idrologico medio su lungo termine) “tenuto conto dei criteri o dei vincoli tecnici, socio-economici, politici” senza compromissione dei naturali equilibri idrodinamici, idrochimici ed idrobiologici dell'acquifero (Castany, 1982).

Diverse fonti bibliografiche hanno nel tempo cercato di quantificare a scala globale la quantità di acqua stoccata nei diversi sistemi idrici (atmosfera, mare, corsi d'acqua, invasi, ghiacciai, acqua trattenuta dalla vegetazione, acque sotterranee sia salate che dolci) e sono stati quantificati i volumi di acque sotterranee infiltrate (risorsa idrica disponibile), più giovani di 50 anni nei primi 2 km di crosta terrestre, volumi che rappresentano solo il 6% del totale delle acque sotterranee (Gleeson *et al*, 2015).

La “riserva idrica”, invece, è la quantità d'acqua sotterranea non rinnovabile, immagazzinata nei sistemi idrogeologici. Essa è funzione della capacità del serbatoio acquifero.

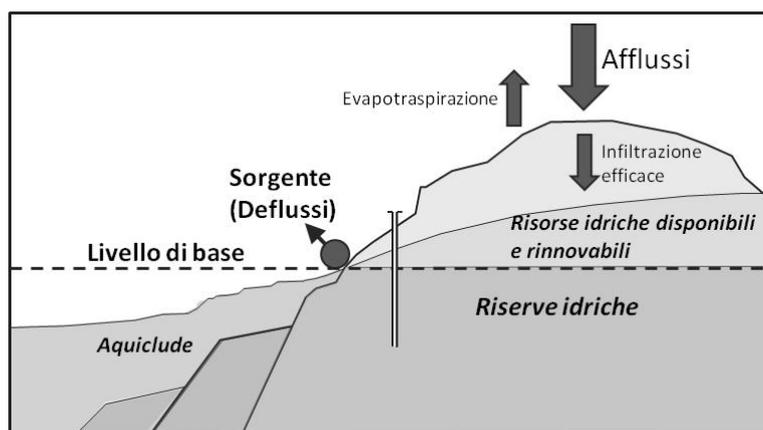


Figura 6 - Risorse e riserve idriche

La Figura 6 mostra una sezione idrogeologica ideale con la suddivisione dei volumi idrici immagazzinati all'interno dell'acquifero nelle due componenti (i) risorse disponibili e naturalmente rinnovabili, al di sopra del livello di base, e (ii) riserve non rinnovabili.

Nella definizione della WFD, lo stato quantitativo è riferito agli impatti causati dai prelievi diretti o indiretti sul corpo idrico sotterraneo, ad esempio prelievi su altri corpi idrici superficiali o sotterranei in connessione con quello in esame.

Allo scopo di chiarire i termini “*analisi di stato quantitativo*” dei corpi idrici sotterranei e “*analisi di rischio*” di non raggiungere gli obiettivi ambientali previsti all’art. 5 della WFD, si riportano di seguito le relative definizioni.

L’*Analisi di Rischio*, eseguita attraverso l’analisi delle pressioni e degli impatti rispetto allo stato quantitativo ricostruito con i dati disponibili fino a quel momento, viene condotta all’inizio del ciclo sessennale di gestione del bacino, e ha come obiettivo la previsione di raggiungere o meno il *buono stato* quantitativo alla fine del ciclo di gestione.

L’Analisi di rischio viene supportata dai dati di monitoraggio acquisiti fino a quel momento. Nel caso in cui non sia certo il raggiungimento del buono stato quantitativo per determinati corpi idrici sotterranei alla fine del ciclo di gestione, saranno necessarie nuove indagini, supportate da specifici programmi di monitoraggio e acquisizione dati, e programmi di misure adeguati. Tali programmi di indagini e di misure saranno indicati nei Piani di Gestione di Bacino (*River Basin Management Plans - RBMPs*).

L’*Analisi dello Stato Quantitativo*, invece, è condotta alla fine del ciclo di gestione, sulla base dei dati di monitoraggio registrati e ha lo scopo di accertare se i corpi idrici, al termine del sessennio, siano in buono stato quantitativo e se i programmi di misure previsti dall’Analisi di Rischio iniziale abbiano avuto effetto sullo stato quantitativo (Figura 7).

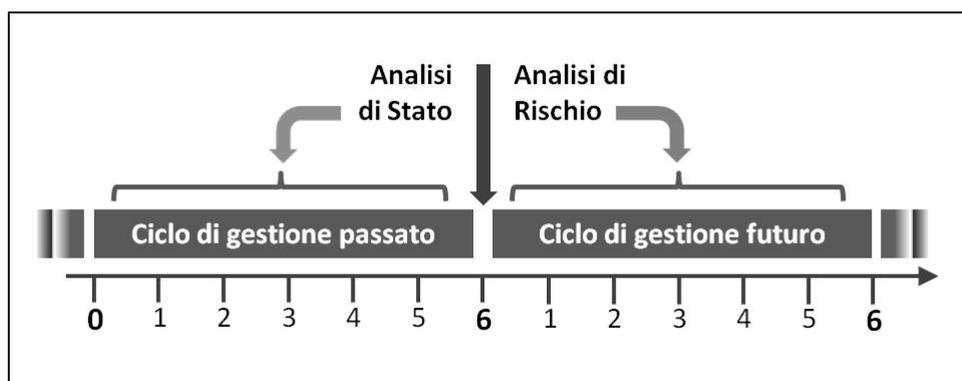


Figura 7 - *Analisi di Rischio e Analisi di Stato* (da: *European Commission, 2009, mod.*)

5. VALUTAZIONE DELLO STATO QUANTITATIVO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Come discusso nel Cap. 2, il buono stato quantitativo si ha quando il corpo idrico sotterraneo non subisce prelievi di risorse superiori alla sua naturale disponibilità di risorse idriche rinnovabili. Inoltre, anche nel caso in cui questa condizione sia soddisfatta, il buono stato quantitativo del corpo idrico sotterraneo si realizza quando le variazioni del livello di falda, dovute a cause antropiche, non danneggiano qualitativamente e quantitativamente i corpi idrici superficiali e gli ecosistemi terrestri che dipendono dal corpo idrico sotterraneo. In aggiunta, è necessario che le stesse variazioni di livello non provochino ingressione salina o di altro tipo nelle acque dolci sotterranee. Solo quando sono soddisfatte tutte queste condizioni, allora lo stato quantitativo è classificabile come *buono* ai sensi della WFD.

I gruppi di lavoro a supporto delle politiche di implementazione della WFD (*WFD Common Implementation Strategy Groups*) hanno sviluppato le linee guida di riferimento per l'applicazione della Direttiva WFD (European Commission, 2000) e della Direttiva 2006/118/CE "Groundwater Directive - GWD", in particolare (European Commission, 2006) e per il raggiungimento degli obiettivi ambientali di tutti i corpi idrici (European Commission, 2007; European Commission, 2009; European Commission, 2010; Craig and Daly, 2010, UKTAG, 2012).³

In particolare, il lavoro svolto dal *Working Group on Groundwater* nel Guidance Document No. 18 (European Commission, 2009,) definisce i test operativi necessari per la verifica sul campo delle condizioni stabilite dalle Direttive WFD e GWD, finalizzati alla determinazione dello stato quantitativo e chimico delle acque sotterranee.

I test, opportunamente declinati per tipologia di corpo idrico e delle relazioni con le acque superficiali e marine, rispondono a quanto previsto dalle direttive Europee e possono essere ritenuti strumenti di riferimento per l'analisi di stato dei corpi idrici sotterranei.

In Figura 8 è riportato lo schema dei test per lo stato chimico e quantitativo.

³ Ulteriori EC Guidance al link <https://circabc.europa.eu/sd/a/8564a357-0e17-4619-bd76-a54a23fa7885/Guidance%20No%2026%20-%20GW%20risk%20assessment%20and%20conceptual%20models.pdf>

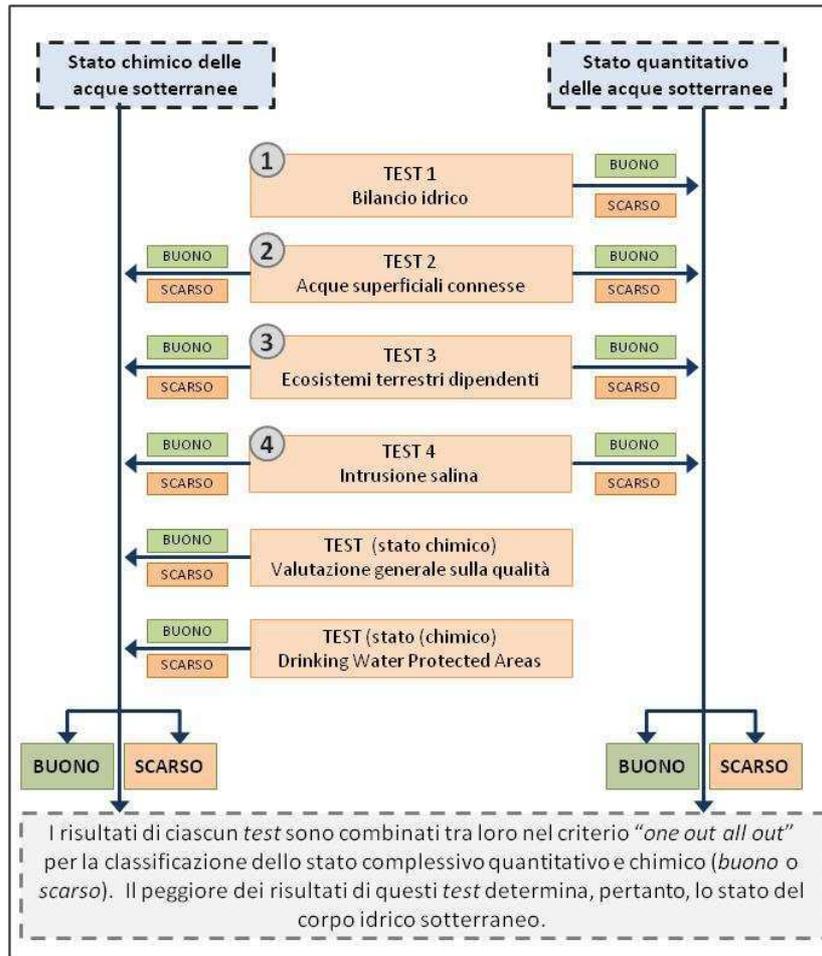


Figura 8 - Groundwater status assessment: Test per la definizione dello stato chimico e quantitativo (European Commission, 2009)

Ai fini dell'applicazione sul campo dei test di stato riportati in Figura 8 e dei principi generali relativi alla valutazione dello *stato quantitativo*, occorre precisare i seguenti aspetti:

1 - Incertezza dei dati di base

La quantità di risorsa idrica sotterranea effettivamente disponibile per i prelievi è un dato che presenta una intrinseca approssimazione dovuta agli strumenti di calcolo adottati, con un errore nelle stime pari al 10-15%, in funzione della metodologia applicata (v. ad es. Fekete *et al.*, 2004; ISPRA, 2013).

Tale approssimazione dipende sia dall'incertezza nel calcolo della 'ricarica effettiva degli acquiferi' sia dalla stima delle portate necessarie al mantenimento del buono stato ecologico e chimico-fisico delle acque di superficie e degli ecosistemi terrestri dipendenti. Quest'ultimo dato, in particolare, presenta la maggiore fonte di variabilità nella stima finale delle risorse effettivamente disponibili [Available Groundwater Resources], a causa dei metodi di valutazione del deflusso minimo vitale e degli *Ecological Flow Needs* (v. Cap. 6 TEST 1 BILANCIO IDRICO).

2 - Scala spaziale

La definizione dello stato quantitativo secondo la WFD e le direttive figlie si applica a tutto il corpo idrico, anche quando i test di stato sono riferiti ad una scala locale o di sito, come nel caso dei test degli ecosistemi superficiali dipendenti o della intrusione salina o di altro tipo.

Analogamente, il test della intrusione salina o di altro tipo è riferito a una porzione più o meno ridotta del corpo idrico, in funzione della estensione areale del fenomeno.

A differenza di questi ultimi test, il calcolo dello stato quantitativo mediante il bilancio idrico rappresenta invece una valutazione a grande scala, spesso a scala regionale, i cui risultati riguardano il corpo idrico nel suo complesso e l'intero sistema idrogeologico di cui fa parte.

In ogni caso, indipendentemente dal test applicato, i risultati dovrebbero essere riferiti all'intero corpo idrico allo scopo di definire lo stato quantitativo nel suo complesso, circostanza che rende il **modello idrogeologico** (numerico o concettuale) lo strumento fondamentale per poter estrapolare correttamente i risultati alla scala dell'intero corpo idrico.

3 - *Deterioramento della qualità delle acque*

Il test dell'intrusione salina o di altro tipo (v. Cap. 9) pone l'attenzione sul caso in cui un corpo idrico è classificato in stato quantitativo scarso (anche nel caso di risorse idriche disponibili superiori ai prelievi), quando i prelievi modificano le condizioni naturali di circolazione delle acque sotterranee tali da provocare la contaminazione ad opera di acque diverse da quelle del corpo idrico, riducendone la qualità chimico-fisica.

Il caso più diffuso è quello dell'intrusione del cuneo salino nelle acque dolci soprastanti, in particolare negli acquiferi alluvionali o fessurati costieri, ma possono verificarsi, ad esempio, anche casi di richiamo di acque profonde più mineralizzate in altri contesti idrogeologici.

Particolari condizioni di richiamo delle acque di falda possono indurre una contaminazione sia da fonti naturali sia da sorgenti di inquinamento antropiche, tali da peggiorare lo stato chimico complessivo delle acque sotterranee. In questo caso, nonostante la disponibilità di risorsa evidenzi un bilancio positivo tra ricarica e prelievi, lo stato quantitativo è definito *scarso* e si devono pertanto attuare le misure necessarie per l'inversione delle tendenze rispetto all'intrusione del contaminante.

6. TEST 1 BILANCIO IDRICO

Il test del bilancio idrico (Figura 9) ha lo scopo di verificare il buono stato quantitativo sulla base del principio dell'equilibrio tra i *prelievi medi su lungo termine* delle acque sotterranee (LTAAQ: *Long-Term Annual Average abstraction*) e le *risorse naturali disponibili* (AGR: *Available Groundwater Resources*).

Le risorse naturali disponibili corrispondono alla Ricarica dell'acquifero (LTAAR: *Long-Term Annual Average Recharge*) al netto dei contributi delle acque sotterranee (EFN: *long-term Ecological Flow Needs*) necessari al buono stato degli ecosistemi terrestri e dei corpi idrici superficiali connessi:

$$AGR = LTAAR - EFN$$

Lo stato quantitativo è *buono* se le risorse naturali disponibili meno i volumi necessari per il buono stato chimico, quantitativo ed ecologico (degli ecosistemi superficiali) sono superiori ai prelievi.

$$\text{Buono stato quantitativo: } AGR > LTAAQ$$

Tale bilancio rappresenta un'analisi su lungo termine in cui i volumi idrici considerati sono valori annui medi relativi ad un periodo idrologico rappresentativo, in ogni caso non inferiore ad almeno un ciclo di gestione di bacino (6 anni). Questo allo scopo di definire un limite minimo temporale per ottenere una rappresentatività idrologica dei risultati, non influenzata dai naturali cicli idrologici pluriennali aridi e umidi.

Scala spaziale e scala temporale

Come sopra ricordato, questo test è l'unico dei test proposti (vedi Figura 8) i cui risultati sono riferiti all'intero corpo idrico. Il bilancio idrico infatti è relativo alla scala spaziale dell'intera unità di bilancio. Per l'applicazione di questo test sono necessari i dati di base del monitoraggio idrologico e meteo-climatico di lungo termine (precipitazioni, temperature dell'aria, portate, ecc.), generalmente acquisiti dalle reti di monitoraggio regionali.

Inoltre, va rilevato che la conoscenza del modello concettuale dell'acquifero è fondamentale per l'esecuzione del test, permettendo ad esempio di stabilire se esistono effetti indiretti dovuti a pressioni su altri corpi idrici, con impatti su quello in esame e per l'identificazione, ad esempio, dell'area di ricarica effettiva.

Il periodo di lungo termine è variabile in funzione delle condizioni idrogeologiche dell'acquifero e generalmente può essere fissato pari a 15-20 anni. In ogni caso esso non dovrebbe essere inferiore al periodo sessennale di gestione di bacino (European Commission, 2009).

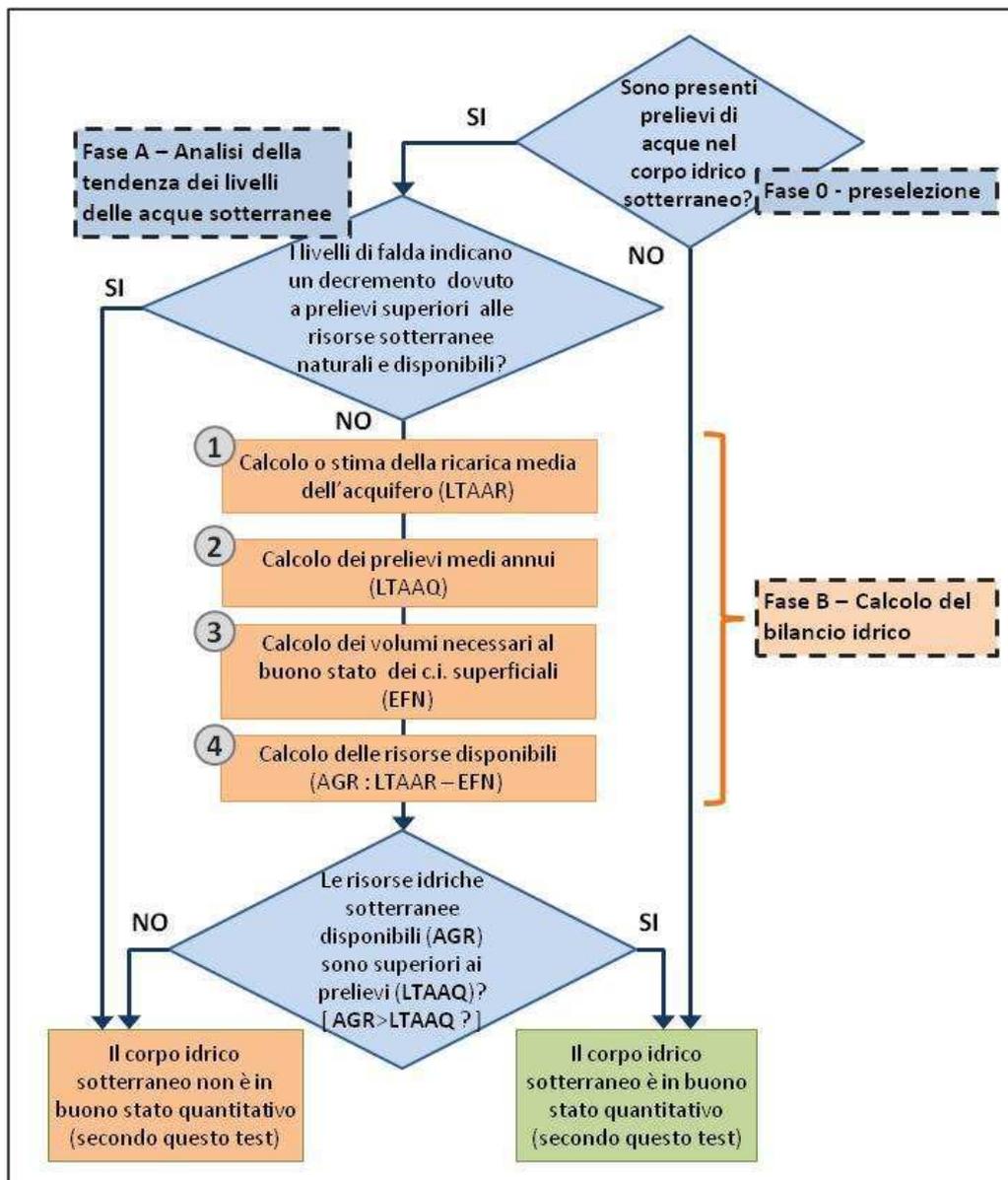


Figura 9 - Test No. 1 del bilancio idrico (European Commission, 2009, modificato)

Il test è suddiviso in tre fasi distinte, che necessitano di altrettante fasi di analisi dei dati sulle pressioni esistenti e sui livelli piezometrici:

- Fase 0: Preselezione - verifica della presenza di pressioni significative dirette o indirette;
- Fase A: Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee;
- Fase B: Calcolo del bilancio idrico.

Lo stato quantitativo è sempre buono qualora non si riscontrino nel corpo idrico prelievi, ovvero pressioni antropiche di tipo quantitativo (Fase 0 di preselezione), mentre è sempre scarso qualora le tendenze dei livelli piezometrici sono significativamente negative (Fase A), risultano invece da verificare con il calcolo del bilancio idrico (Fase B) le situazioni nelle quali pur essendo presenti dei prelievi, non si ha evidenza statistica di tendenze negative dei livelli delle acque sotterranee.

Di seguito vengono descritte le fasi di esecuzione del test.

6.1 Fase 0 - Preselezione

Questa prima verifica del test del bilancio idrico determina se un corpo idrico si può definire a priori in stato buono in quanto privo di pressioni antropiche significative.

In base alla definizione di ‘Stato quantitativo’ data dalla WFD all’Articolo 2, nei corpi idrici sotterranei dove non insistono prelievi significativi o altre pressioni dirette o indirette (ad es. emungimenti da altri corpi idrici che hanno effetti negativi sul corpo idrico in esame) e nei quali il deflusso idrico sotterraneo avviene in condizioni naturali, lo stato quantitativo è per definizione buono.

Ciò dovrà comunque essere verificato e dimostrato attraverso un monitoraggio quantitativo dedicato, utile anche a caratterizzare le variazioni nel tempo dei livelli/portate in analogia con gli altri indicatori idrologici.

6.2 Fase A - Analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee

Una volta verificato che sul corpo idrico esistono pressioni dirette o indirette sulle acque sotterranee che possono avere impatti (i) sulla variazione dei livelli di falda, (ii) sull’alterazione delle direzioni di deflusso sotterraneo delle acque o (iii) effetti sull’idrologia e (iv) sulla qualità dei corpi idrici superficiali connessi, si deve procedere all’analisi della tendenza dei livelli delle acque sotterranee.

Questa analisi consente di assegnare lo *stato quantitativo scarso* all’intero corpo idrico sotterraneo, senza la necessità di effettuare l’analisi di bilancio, nel caso in cui sulla base del monitoraggio dei livelli si rileva un chiaro decremento dei valori protratto nel tempo, ovvero relativo a più anni di osservazione (pari almeno a sei anni, fino ad un massimo di 20 anni⁴). Tale decremento deve inoltre essere ascrivibile ai prelievi di risorse sotterranee già rilevati nella Fase 0 di “preselezione”.

Nel caso in cui, invece, si rileva su scala temporale pluriennale un andamento positivo o stazionario dei valori dei livelli piezometrici, andamento riferibile all’intero corpo idrico, allora per l’assegnazione dello stato quantitativo occorre procedere con l’analisi di bilancio idrico.

Infatti, in accordo con quanto riportato nei documenti tecnici sulla *Common Implementation Strategy* della WFD (European Commission, 2009), i livelli idrici stazionari (o sostenuti, dal termine originale ‘*sustained*’) non necessariamente indicano un buono stato quantitativo, sia per la scala locale o puntuale dei dati di monitoraggio su singolo pozzo rispetto alla scala dell’intero corpo idrico sia poiché i volumi idrici capaci di mantenere costanti i livelli in determinate aree del corpo idrico possono derivare da acque superficiali connesse, causando inoltre un potenziale danno ecologico a queste ultime, oppure possono derivare da corpi idrici adiacenti.

In particolare, nel caso di acquiferi permeabili per fessurazione e carsismo, l’extrapolazione dei dati di livello piezometrico all’intero acquifero comporta ampi margini di incertezza e potenziali errori, per l’elevata anisotropia che caratterizza questi acquiferi. In questi casi, l’analisi dello stato quantitativo dovrebbe essere condotta tramite l’analisi di bilancio idrico.

⁴ La definizione di *Long Term Annual Average* (LTAA) fornita da OCSE - Eurostat e relativa ai dati idrologici richiesti nel *Water accounting* che l’istituto di statistica europeo conduce tra gli stati membri è riferito ad un periodo minimo di 20 anni di osservazioni (Eurostat, 2008), in linea con gli studi sulla rappresentatività delle serie storiche dei dati idrologici di lunghezza da 15 a massimo 20 anni (Huh *et al.*, 2005; Braca *et al.*, 2013)

Va precisato che le tendenze nelle variazioni di livello osservate nella rete dei pozzi e piezometri devono essere indipendenti dalle variazioni naturali degli afflussi meteorici e devono quindi essere riferibili a cause antropiche (es. prelievi e derivazioni di acque superficiali che alimentano le falde sotterranee); per questo motivo il periodo medio-lungo di analisi è richiesto per mediare il normale alternarsi di periodi siccitosi a periodi umidi. L'analisi dei livelli dovrebbe pertanto essere correlata a quella degli afflussi meteorici sull'area di alimentazione del corpo idrico sotterraneo.

6.2.1 **Metodologia di valutazione delle tendenze dei livelli a scala di corpo idrico**

Come evidenziato al paragrafo precedente, è importante rilevare che i risultati del monitoraggio dei livelli di falda devono essere riferibili all'intero corpo idrico o comunque a porzioni significative di questo.

La metodologia che segue permette di estrapolare all'intero corpo idrico i dati puntuali di monitoraggio, a partire dai dati registrati alle singole stazioni (pozzi e piezometri).

Valutazione delle tendenze a scala puntuale:

- a) **lunghezza serie temporale:** scelta della lunghezza della serie temporale da considerare per il calcolo delle tendenze (10-15 anni; o almeno 6 anni di misure recenti);
- b) **densità serie temporale:** scelta della numerosità campionaria annua per il periodo di riferimento (2, 4, 6, 12 misure annue per tutti gli anni del periodo di riferimento scelto);
- c) **significatività della densità serie temporale:** scelta dei valori di livello per ciascun anno da utilizzare per il calcolo delle tendenze; in particolare, quando la numerosità campionaria è di sole 2 misure all'anno, devono necessariamente essere presenti soli valori massimi e minimi dell'anno misurati nei periodi rispettivamente di massima ricarica della falda e di minimo livello utilizzando anche dati di monitoraggio automatico;
- d) **completezza serie temporali:** scelta del numero minimo di anni e/o di misure per procedere al calcolo delle tendenze (>5 anni e/o >10-12 misure più recenti);
- e) **qualità e omogeneità dei dati:** statistica di base delle serie storiche (piezometria) per ciascuna stazione di monitoraggio. E' possibile ricorrere, quando significativo, al collegamento delle serie storiche di dati relative a stazioni sostituite nel tempo. Analisi dei dati con grafici e calcolo dei principali indici statistici, al fine di individuare la presenza di *outlier* (ISPRA, 2013);
- f) **calcolo tendenza dei livelli sulla singola stazione:** regressione lineare dei dati selezionati della serie storica per la singola stazione di monitoraggio (piezometria in ordinata espressa in metri e tempo in ascissa espresso in decimali di anno). La tendenza è data dalla stima del coefficiente angolare della retta di regressione calcolata ed è espressa in metri/anno;
- g) **stima della significatività delle tendenze dei livelli:** test statistici con significatività al 95% dovranno essere condotti sulla tendenza calcolata utilizzando preferibilmente il test di Mann-Kendall. Possono essere utilizzati anche i test di Spearman o di Pearson.
- h) **attribuzione di un valore di tendenza a scala puntuale:** alla singola stazione di monitoraggio viene attribuito un determinato valore puntuale di tendenza (m/anno), che può essere stazionario, positivo o negativo. In Figura 10 sono riportati 2 esempi di calcolo della tendenza, rispettivamente crescente o positivo (A) e decrescente o negativo (B) con misure semestrali in un periodo temporale di circa 10 anni;
- i) **attribuzione di un livello di confidenza della tendenza a scala puntuale:** il livello di confidenza (alto, medio, basso) deve essere attribuito alla tendenza calcolata sulla base della completezza delle serie temporali, della qualità e omogeneità dei dati e delle situazioni "borderline".

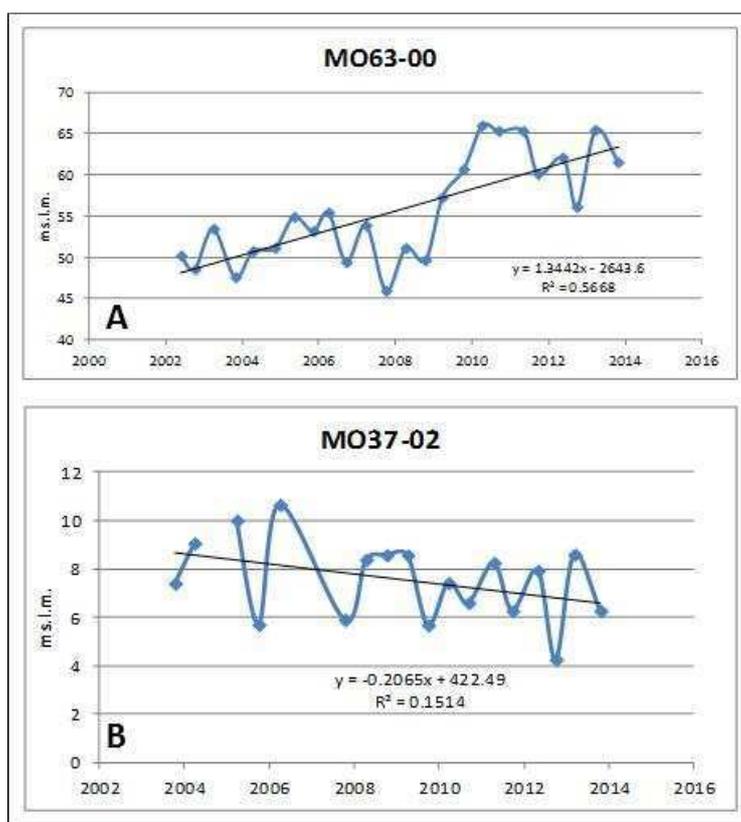


Figura 10 - Analisi delle tendenze dei livelli piezometrici a scala puntuale (da: ARPAE Emilia-Romagna)

Valutazione delle tendenze a scala di corpo idrico:

I valori significativi di tendenza calcolati a scala puntuale (per singolo pozzo o piezometro) devono essere utilizzati per valutare le tendenze a scala di corpo idrico.

Le modalità per il passaggio da valutazioni puntuali a valutazioni alla scala di corpo idrico dipendono da diversi fattori, tra i quali i principali sono:

- modello concettuale dell'acquifero;
- densità areale delle stazioni di monitoraggio;
- entità delle pressioni antropiche espresse sia come prelievi che come urbanizzazione (uso del suolo);
- tipologia di acquifero (libero o confinato; poroso o fessurato, ecc.).

Sulla base dei fattori sopra elencati, che vanno valutati per ciascun corpo idrico o gruppi di corpi idrici, va effettuata la scelta della modalità di assegnazione del valore di tendenza dalla scala puntuale alla scala di corpo idrico.

Le possibili modalità di spazializzazione dei dati sono riconducibili ai seguenti casi:

- 1) attribuzione a ciascuna stazione di monitoraggio di una % dell'area/volume del corpo idrico;
- 2) spazializzazione delle tendenze puntuali considerando i limiti del singolo corpo idrico o gruppi di corpi idrici.

Il primo dei due casi è riferito alle condizioni in cui la rete di monitoraggio non presenta un numero di punti di controllo sufficiente per una spazializzazione significativa dei dati, o nel caso

in cui si disponga di pochi pozzi/piezometri con i quali definire lo stato quantitativo dell'intero corpo idrico.

Una indicazione per la spazializzazione dei dati è l'utilizzo della funzione *Kriging* con calibrazione del variogramma, oppure la funzione standard "*Natural Neighbor*", che non richiede il pretrattamento dei dati e calibrazione, considerando che non estrapola la spazializzazione oltre il dominio dei dati stessi. La spazializzazione va fatta su una maglia le cui dimensioni dipendono dalla densità delle informazioni e dalla dimensione dei corpi idrici. Una maglia con un buon dettaglio regionale potrebbe essere la maglia quadrata di lato 1 km.

Il valore complessivo della tendenza dei livelli a scala di corpo idrico sotterraneo è rappresentato da:

- media pesata, considerando la % di superficie o il volume di corpo idrico, delle tendenze puntuali calcolate per ciascuna stazione di monitoraggio relativa al corpo idrico sotterraneo, nel caso si sia seguito il metodo di attribuzione 1;
- media delle tendenze puntuali di ciascuna maglia derivante dalla spazializzazione entro i limiti del corpo idrico sotterraneo, nel caso si sia seguito il metodo 2.

In base al criterio di attribuzione utilizzato (% di corpo idrico o spazializzazione valori di tendenza), viene attribuito un valore di tendenza dei livelli piezometrici stazionario, positivo o negativo, all'intero corpo idrico o gruppi di corpi idrici. In Figura 11 si riporta un esempio di attribuzione di valori di tendenza dei livelli piezometrici, espressi in m/anno, ai corpi idrici sotterranei, utilizzando la spazializzazione delle tendenze puntuali su una maglia di lato 1 km.

Sulla base di questa attribuzione e in accordo con il processo operativo di valutazione di stato quantitativo (v. Figura 9), ai corpi idrici che presentano una tendenza negativa viene assegnato lo stato quantitativo scarso.

Per i corpi idrici che invece presentano una tendenza dei livelli piezometrici positiva o stazionaria, occorre elaborare l'analisi di bilancio idrico per l'attribuzione dello stato quantitativo buono o scarso.

Va inoltre attribuito un livello di confidenza (alto, medio, basso) del valore di tendenza dei livelli piezometrici riferito all'intero idrico sotterraneo, tenendo conto dei seguenti fattori:

- livello di confidenza prevalente delle tendenze puntuali calcolate per le singole stazioni del corpo idrico;
- stabilità quantitativa del valore di tendenza nel tempo per le singole stazioni;
- valore di tendenza al limite di classe (*borderline*).

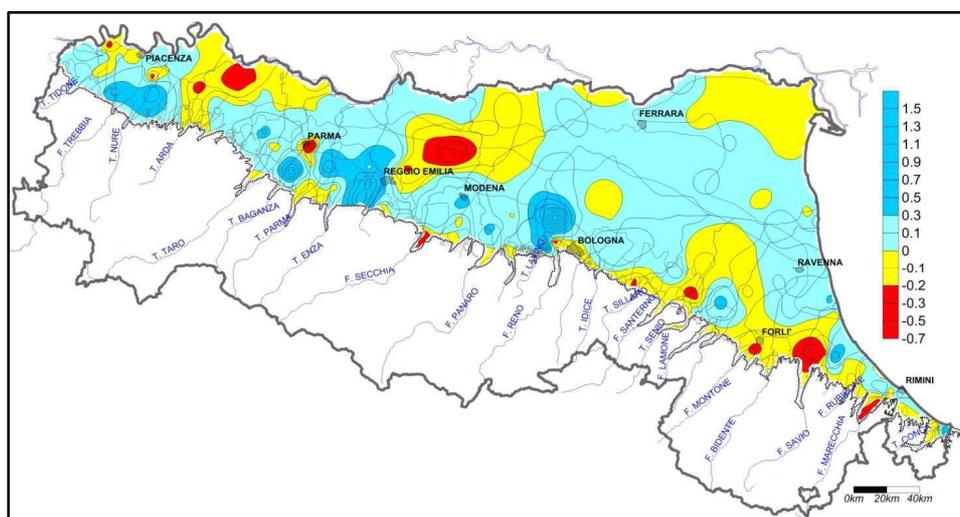


Figura 11 - Analisi delle tendenze dei livelli piezometrici a scala di corpo idrico (da: ARPAE Emilia-Romagna)

6.3 Fase B - Analisi di bilancio idrico

Il test del bilancio idrico si basa sulla valutazione dell'equilibrio tra le risorse idriche disponibili e naturalmente rinnovabili e il loro consumo dovuto ai prelievi (D.lgs. 152/06; D.M. 28 Luglio 2004).

L'articolo 145 (*Equilibrio del bilancio idrico*) del D. Lgs. 152/06 riporta al Comma 1 che "L'autorità di bacino competente definisce ed aggiorna periodicamente il bilancio idrico diretto ad assicurare l'equilibrio fra le disponibilità di risorse reperibili o attivabili nell'area di riferimento ed i fabbisogni per i diversi usi, nel rispetto dei criteri e degli obiettivi di cui all'art. 144 (Tutela e uso delle risorse)".

Qualora il bilancio idrico non fosse disponibile, le valutazioni per effettuare il test finalizzato a definire lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei necessita della disponibilità dei dati di base idrologici e meteo-climatici, tipicamente acquisiti dalle reti di monitoraggio istituzionali (precipitazioni, temperature dell'aria, portate, irradiazione solare, ecc.).

Tali dati pertanto rientrano indirettamente tra quelli necessari alla definizione dello stato quantitativo delle acque sotterranee in base alla WFD.

Come definito nell'Allegato V della WFD, *il buono stato quantitativo di un acquifero è identificato dalla condizione di equilibrio tra i prelievi per estrazione delle acque sotterranee e la ricarica naturale, tale da non intaccare le riserve idriche e mantenere il buono stato ecologico dei corpi idrici superficiali connessi.*

Il bilancio idrico viene quindi condotto tramite il confronto tra i seguenti termini:

- **LTAAR** (*Long Term Annual Average Recharge*): Ricarica naturale su lungo termine degli acquiferi;
- **EFN** (*Ecological Flow Needs*): corrispondenti ai contributi delle acque sotterranee, in termini di portata media su lungo termine, necessari per il buono stato ecologico e chimico-fisico delle acque e degli ecosistemi di superficie;
- **AGR** (*Available Groundwater Resources*): Risorse idriche sotterranee disponibili, pari a LTAAR – EFN;
- **LTAAQ** (*Long-Term Annual Average Recharge*): Prelievi medi dal corpo idrico sotterraneo su lungo termine.

Il bilancio idrico si effettua con il confronto in volume tra le risorse idriche sotterranee disponibili (AGR) e i prelievi di acque sotterranee dal corpo idrico (LTAAQ).

Lo stato quantitativo è *buono* se le risorse idriche sotterranee disponibili, per unità di bilancio, sono, su lungo termine, superiori ai prelievi:

Tabella 1 – Stato quantitativo buono e scarso

STATO QUANTITATIVO ACQUE SOTTERRANEE	
<i>Stato quantitativo buono</i>	$LTAAQ < AGR$
<i>Stato quantitativo scarso</i>	$LTAAQ \geq AGR$

6.3.1 Periodicità del bilancio idrico per la valutazione dello stato quantitativo

Il calcolo di bilancio idrico annuo medio, condotto su un periodo minimo di almeno 6 anni⁵ di osservazioni, o meglio su 15-20 anni, andrebbe condotto alla fine di ciascun ciclo di gestione di bacino, rientrando tra le attività periodiche di aggiornamento, previste dall'art 5 della WFD, di valutazione dello stato dei corpi idrici.

6.4 Indicatori idrologici di bilancio

Gli indicatori di bilancio idrologico proposti allo scopo di uniformare a livello nazionale i risultati delle analisi di bilancio sono riassunti in Tabella 2; essi sono definiti da OCSE/Eurostat nell'ambito della contabilità ambientale (OCSE/Eurostat, 2008) e sono riportati nel sito istituzionale della Commissione Europea [Circabc](#)⁶.

Tabella 2 – Indicatori di bilancio idrologico

INDICATORE (ACQUE INTERNE)	DEFINIZIONE
1 Precipitazioni (<i>Precipitation</i>) (10 ⁶ m ³ / anno)	<p>Volume totale delle precipitazioni atmosferiche. Le precipitazioni sono generalmente misurate nelle reti di monitoraggio idrologiche e meteorologiche istituzionali.</p> <p><i>Total volume of atmospheric wet precipitation (rain, snow, hail...).</i> <i>Precipitation is usually measured by meteorological or hydrological institutes.</i> <i>The water equivalent is requested, which is usually recorded by rain gauges.</i></p>
2 Evapotraspirazione reale (<i>Actual Evapotranspiration</i>) (10 ⁶ m ³ / anno)	<p>Volume totale di evaporazione dal suolo, dalle aree umide e dai corpi idrici superficiali naturali e di traspirazione dalle piante.</p> <p>In accordo con la definizione fornita in Idrologia, l'evapotraspirazione generata dalle attività umane è esclusa, con l'eccezione dell'agricoltura non irrigata e delle attività forestali.</p> <p>L'evapotraspirazione reale viene calcolata usando diversi tipi di modelli matematici, che vanno dai semplici algoritmi (Budyko, Turn Pyke, etc) fino agli schemi che rappresentano il ciclo idrologico nel dettaglio.</p> <p>Si sottolinea il fatto che non devono essere utilizzati i volumi di 'Evapotraspirazione potenziale', che rappresentano i volumi potenziali massimi di evapotraspirazione nelle condizioni di massima disponibilità idrica.</p> <p>L'Evapotraspirazione reale media su lungo termine (<i>average long-term ETR</i>) è l'evapotraspirazione reale misurata su un periodo di almeno 20 anni consecutivi di registrazioni.</p> <p><i>Total volume of evaporation from the ground, wetlands and natural water bodies and transpiration of plants. According to the definition of this concept in Hydrology, the evapotranspiration generated by all human interventions is excluded, except unirrigated agriculture and forestry. The 'actual evapotranspiration' is calculated using different types of mathematical models, ranging from very simple algorithms (Budyko, Turn Pyke, etc) to schemes that represent the hydrological cycle in detail. Please</i></p>

⁵ Il valore di 6 anni è definito come numero minimo di anni nel Documento No 18 delle CIS *Guidance WFD*, allo scopo di tenere conto della naturale variabilità dei dati meteo-climatici e idrologici; altri studi basati sulla rappresentatività statistica dei dati idrologici forniscono valori tra 15 anni (Boni et al., 1993a; ISPRA, 2013) e 20 anni (Huh, 2005; Eurostat, 2008).

⁶ https://circabc.europa.eu/sd/a/25f1f542-7d9e-40bf-8eb1-01e996456005/JQ-INLAND%20WATERS_definitions.pdf

INDICATORE (ACQUE INTERNE)	DEFINIZIONE
	<p><i>do not report potential evapotranspiration which is "the maximum quantity of water capable of being evaporated in a given climate from a continuous stretch of vegetation covering the whole ground and well supplied with water".</i></p> <p>AVERAGE LONG-TERM ACTUAL EVAPOTRANSPIRATION: <i>The average of actual evapotranspiration over a long period, normally 20 consecutive years or more.</i></p>
<p>3 Precipitazione efficace [(3) = (1)-(2)] <i>(Internal Flow)</i> (10⁶ m³ / anno)</p>	<p>Precipitazione efficace; volume totale delle precipitazioni meno l'evaporazione reale (corrisponde ai volumi idrici totali generati all'interno del bacino dalle sole precipitazioni naturali a meno delle perdite per evapotraspirazione reale).</p> <p>Precipitazione efficace $Pe (3) = P (1) - ETR (2)$;</p> <p>La precipitazione efficace può essere calcolata o misurata direttamente, nel caso in cui vengano misurati i deflussi totali presso le sezioni fluviali attrezzate (stazioni idrometriche), con la misura della portata totale (pari alla somma dei volumi di ruscellamento e flusso di base).</p> <p><i>Total volume of river run-off and groundwater generated, in natural conditions, exclusively by precipitation into a territory. The internal flow is equal to precipitation less actual evapotranspiration and can be calculated or measured. If the river run-off and groundwater generation are measured separately, transfers between surface and groundwater should be netted out to avoid double counting.</i></p> <p><i>Should include both surface and underground flows.</i></p>
<p>4 Deflussi totali in entrata dall'esterno; <i>(Actual external Inflow)</i> (10⁶ m³ / anno)</p>	<p>Volume totale dei deflussi superficiali (ruscellamento, <i>runoff</i>) e sotterranei (flusso di base, <i>baseflow</i>) provenienti da territori limitrofi; dato misurato (misure di portata in entrata nel sistema idrogeologico).</p> <p>Il volume medio di lungo termine è riferito ad un periodo di almeno 20 anni di registrazioni.</p> <p><i>Total volume of actual flow of rivers and groundwater, coming from neighbouring territories. Data measured.</i></p> <p>AVERAGE LONG-TERM ACTUAL EXTERNAL INFLOW INTO A TERRITORY: <i>The average of the actual external inflow of rivers and groundwater into a TERRITORY, averaged over a period of at least 20 consecutive years.</i></p>
<p>5 Deflussi totali in uscita verso l'esterno; <i>(Total actual outflow)</i> (10⁶ m³ / anno)</p>	<p>Deflussi totali in uscita dal sistema idrogeologico (o dalla unità di bilancio); include le acque di ruscellamento (<i>runoff</i>) e quelle del flusso di base (<i>baseflow</i>); nel caso di disponibilità di stazioni idrometriche attrezzate per le misure in continuo, corrisponde ai volumi del Deflusso totale registrato in uscita (misurato) dal sistema o bacino, pari alla somma dei volumi di ruscellamento (acque superficiali) e di flusso di base (acque sotterranee).</p> <p><i>Actual outflow of rivers and groundwater into the sea plus actual outflow into neighbouring territories. Data measured.</i></p> <p><i>In order to avoid double-counting when computing regional totals by Eurostat, a breakdown of outflows by neighbouring territory would be very useful. This breakdown should be entered in worksheet "1a_OF" for the data concerning outflow.</i></p>
<p>8 Risorse idriche totali [(8) = (3)+(4)] <i>(Total freshwater resources)</i> (10⁶ m³ / anno)</p>	<p>Risorse idriche totali (8): <i>Precipitazione efficace (3) + Deflussi totali in entrata (4) nel sistema idrogeologico.</i></p> <p><i>Internal flow plus actual external inflow.</i></p>

INDICATORE (ACQUE INTERNE)	DEFINIZIONE
9 Ricarica dell'acquifero [LTAAR] <i>(Recharge into the aquifer)</i> (10 ⁶ m ³ / anno)	Volume totale della ricarica annua che alimenta la zona di saturazione dell'acquifero; corrisponde ai volumi LTAAR. <i>Total volume of water added from outside to the zone of saturation of an Aquifer.</i> <i>(Recharge minus ecological discharge: Recharge less the long-term annual average rate of flow required to achieve ecological quality objectives for associated surface water)</i>
10 Risorse idriche sotterranee disponibili per i prelievi [AGR = LTAAR - EFN] <i>(Groundwater Resources available for annual abstraction)</i> (10 ⁶ m ³ / anno)	Ricarica dell'acquifero meno le portate medie su lungo termine necessarie al raggiungimento degli obiettivi di qualità ecologica per le acque superficiali connesse. Questi volumi idrici sotterranei tengono in conto le restrizioni imposte per i prelievi di risorse idriche sotterranee, tuttavia altre restrizioni basate su criteri tecnico-economici potrebbero essere prese in considerazione in termini di accessibilità, produttività e costo massimo di produzione ritenuto accettabile da parte dei gestori. I volumi massimi teorici delle risorse idriche disponibili per i prelievi corrispondono ai volumi della ricarica dell'acquifero. <i>Recharge less the long-term annual average rate of flow required to achieve ecological quality objectives for associated surface water. It takes account of the ecological restrictions imposed to groundwater exploitability, nevertheless other restrictions based on economic and technical criteria could also be taken into account in terms of accessibility, productivity and maximum production cost deemed acceptable by developers. The theoretical maximum of groundwater available is the recharge.</i>

L'indicatore principale in Tab. 2 è rappresentato dalla ricarica dell'acquifero, che corrisponde alla disponibilità di risorsa rinnovabile utile per i prelievi al netto delle risorse necessarie agli obiettivi di qualità delle acque ed ecosistemi superficiali. Esso corrisponde al parametro LTAAR (*Long Term Annual Average Recharge*) di Figura 9.

Per quanto riguarda il regime dei livelli delle acque sotterranee, il D. Lgs. 30/2009 (Parte B – Stato quantitativo), riportando la definizione di buono stato quantitativo secondo la WFD, precisa inoltre che un “*elemento importante da prendere in considerazione al fine della valutazione di stato è, per i complessi idrogeologici alluvionali, l'andamento nel tempo del livello piezometrico. Nel caso in cui l'andamento piezometrico è positivo o stazionario, lo stato quantitativo è buono*”.

Si sottolinea che tale precisazione fa riferimento esclusivamente ad acquiferi alluvionali di pianura, permeabili per porosità e in particolare ai corpi idrici a falda libera.

Per classificare un corpo idrico in stato quantitativo *buono* sulla base dei trend di livello piezometrico, così come indicato nel citato Decreto 30/09, è necessario disporre di (i) un robusto modello idrogeologico, in base al quale escludere fenomeni di ricarica da parte di corpi idrici adiacenti o in connessione idraulica, (ii) un numero sufficiente di punti di monitoraggio in grado di rappresentare con precisione la geometria della superficie piezometrica, il suo regime idrologico alla scala del corpo idrico e le interazioni con i corpi idrici superficiali, (iii) un numero sufficiente di anni di registrazione dei livelli (ad esempio compreso tra 10-20 anni). I livelli piezometrici, inoltre, non devono essere influenzati da prelievi di acque sotterranee dal corpo idrico in esame o dai corpi idrici adiacenti o in continuità idraulica.

Questa ultima condizione è determinante nella valutazione dello stato quantitativo sulla base delle tendenze dei livelli: è necessario infatti fare riferimento a dati di monitoraggio in condizioni statiche, ovvero esenti da prelievi o da altre alterazioni del regime idrologico in quanto, ad esempio a causa di emungimenti che si protraggono per più anni, i livelli possono risultare stazionari (o positivi) nonostante vi possa essere un bilancio idrico negativo tra risorse idriche effettivamente disponibili e prelievi (es. Irpi-CNR 2013; Preziosi e Romano, 2009).

Una considerazione particolare sulla determinazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee deve essere fatta infine per quelle situazioni locali, riconducibili al caso sopra citato degli acquiferi alluvionali a falda libera e permeabili per porosità, in cui sono identificate peculiari condizioni idrogeologiche quali:

- corpi idrici in acquiferi di ridotte dimensioni e con deflussi medi ben definiti (tramite robusto modello concettuale);
- corpi idrici in acquiferi porosi, omogenei e caratterizzati da un'unica falda freatica;
- sistemi di ricarica della falda ben noti (v. modello idrogeologico concettuale);
- disponibilità di dati freaticometrici in continuo, che permettano di ricostruire nel dettaglio le oscillazioni della falda in relazione al regime degli afflussi;
- disponibilità dei dati pluviometrici riferiti all'area di alimentazione del corpo idrico;

Tali condizioni sono, ad esempio, quelle degli acquiferi vallivi del territorio ligure, in cui sono presenti serbatoi idrogeologici di piccole dimensioni ma molto produttivi che ospitano falde nei depositi alluvionali (prevalentemente sabbiosi, sabbioso-limosi o argillosi, sabbioso-ghiaiosi) delle incisioni vallive prospicienti la costa. In tali acquiferi del territorio ligure come di altri casi analoghi nel territorio nazionale, la disponibilità di un robusto modello concettuale e dei dati in continuo dei livelli di falda, registrati con frequenza oraria, consentono di correlare i livelli freaticometrici con lo stato quantitativo delle acque sotterranee, allo scopo di calcolare quest'ultimo in base ai trend di livello in alternativa al calcolo del bilancio idrogeologico, così come indicato nel D. Lgs. 30/2009, parte B, "Stato quantitativo".

Nel caso specifico degli acquiferi liguri, la conoscenza del modello idrogeologico permette di identificare nel dettaglio il deflusso sotterraneo delle acque, dalla area di alimentazione alle aree di recapito, escludendo scambi idrici con altri serbatoi idrogeologici ed identificando in tal modo una correlazione diretta tra i livelli di falda misurati e lo stato quantitativo ai sensi della WFD.

7. TEST 2 ACQUE SUPERFICIALI CONNESSE

Il concetto di continuità tra le risorse idriche sotterranee e quelle superficiali è alla base di una corretta e sostenibile gestione delle acque alla scala di bacino (Winter *et al.*, 1998).

Le acque superficiali non sussistono senza quelle sotterranee. Queste ne sostengono il deflusso, alimentando la portata dei fiumi, dei laghi e delle sorgenti puntuali.

Nei periodi umidi del ciclo idrologico esse sono a loro volta alimentate dalle acque superficiali.

Sulla base del principio di continuità, la Direttiva Quadro Acque (WFD) e la Direttiva figlia sulle Acque sotterranee (GWD), stabiliscono che se un corpo idrico sotterraneo, a causa di variazioni antropiche dei livelli piezometrici o delle direzioni di flusso delle acque sotterranee, danneggia la qualità o la quantità delle acque superficiali che da esso dipendono, esso è in uno *stato quantitativo scarso* e pertanto vanno intraprese idonee misure per riportare al buono stato quantitativo sia il primo che le seconde.

Il test No. 2 sulle acque superficiali connesse stabilisce che un corpo idrico sotterraneo è in *buono stato quantitativo* se la qualità e la quantità delle acque superficiali connesse sono tali da permettere di raggiungere gli obiettivi di qualità chimica ed ecologica (per tali acque superficiali dipendenti) stabilita dalla WFD all'Articolo 4.

Questo Test è strettamente dipendente dalla identificazione del modello concettuale idrogeologico discusso precedentemente, al fine di individuare le connessioni idrogeologiche tra i corpi idrici di superficie e quelli sotterranei.

La prima fase dell'esecuzione di questo test, pertanto, è rappresentata dalla individuazione dei corpi idrici superficiali connessi.

Questo argomento viene trattato nell'Allegato V di questo documento, con i dettagli operativi e alcuni metodi per l'identificazione della interazione 'acque superficiali – acque sotterranee'.

Per l'esecuzione del test sono richieste informazioni circa lo stato ecologico e chimico delle acque superficiali, come pure i parametri idrologici quantitativi cui sono associati lo stato chimico e quello ecologico: portate, livelli idrometrici e minimo deflusso vitale dei corsi d'acqua.

Il test è strettamente legato a quello analogo relativo allo stato chimico dei corpi idrici superficiali, come mostrato in Figura 8.

Il test è utile, inoltre, a valutare se gli obiettivi di qualità posti dalla Direttiva Quadro Acque, per i corpi idrici superficiali connessi con quello sotterraneo in esame, sono messi a rischio a causa di alterazioni idrologiche su quest'ultimo.

Il test andrebbe condotto su tutti i corpi idrici sotterranei connessi con i corpi superficiali a rischio (sulla base della *Analisi di Rischio* di cui al Cap. 4), individuati in base al modello idrogeologico e sulla base delle interazioni tra acque superficiali e acque sotterranee.

La procedura proposta per il test (European Commission, 2009) è la seguente:

Fase 1 – verifica della capacità da parte del corpo idrico superficiale, in connessione con il corpo idrico sotterraneo, di raggiungere gli obiettivi di qualità imposti dalla WFD;

Fase 2 – (i) identificazione dei superamenti di uno dei valori '*Quality standard*' o di uno dei valori soglia nel corpo idrico sotterraneo rilevato nei punti di monitoraggio principali; (ii) verifica della condizione per cui gli inquinanti possono essere trasferiti al corpo idrico superficiale;

Fase 3 – stima della concentrazione dell'inquinante trasferito al corpo idrico superficiale.

Se il carico di inquinante nel corpo idrico superficiale è significativo (es. la concentrazione di inquinante nelle acque superficiali è superiore al 50% di quella originale nel corpo idrico sotterraneo da cui proviene), allora il corpo idrico sotterraneo è in *stato scarso*.

Lo schema di Figura 12 riporta il flusso operativo per l'esecuzione di questo test.

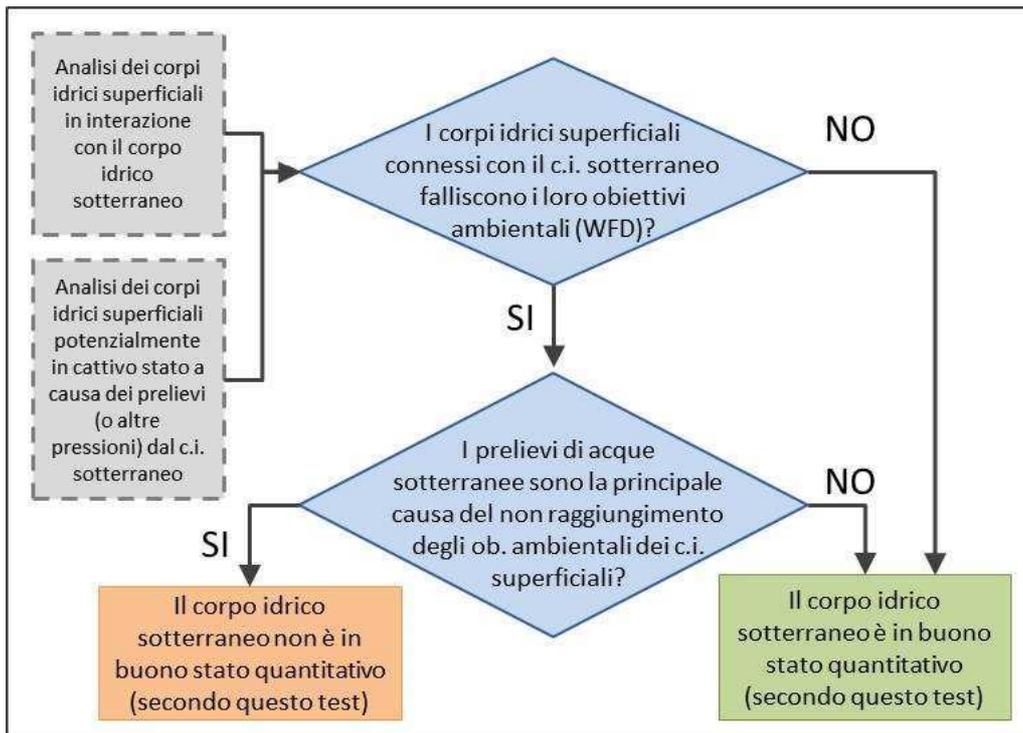


Figura 12 - Test No. 2 Acque superficiali connesse (European Commission, 2009)

8. TEST 3 ECOSISTEMI TERRESTRI DIPENDENTI

In base al Test No. 3 degli *Ecosistemi Terrestri Dipendenti* dal corpo idrico sotterraneo (European Commission 2009; 2010), un corpo idrico sotterraneo è in buono stato quantitativo quando non si verifica un danno a tali ecosistemi dovuto a un'alterazione antropica dei livelli del corpo idrico sotterraneo da cui dipendono (esaurimento o riduzione delle risorse idriche sotterranee, alterazione delle direttrici di flusso sotterraneo, abbassamento del livello di falda, ecc.).

Questo test da un punto di vista idrogeologico è legato a quello relativo ai corpi idrici superficiali (test No. 2), in quanto, in analogia con questo, è il modello concettuale a fornire le informazioni sui luoghi di interazione acque superficiali/acque sotterranee e sul tipo di influenza che un'alterazione idrologica antropica può avere sia sui fiumi e laghi connessi sia sugli ecosistemi terrestri⁷ (European Commission, 2011).

Questo test, come il precedente, richiede che siano determinati i parametri idrologici e ambientali che supportano e mantengono le buone condizioni degli ecosistemi terrestri, quali ad esempio portate (dei fiumi o sorgenti) e livelli idrometrici. Sulla base del modello idrogeologico concettuale, in una prima fase di esecuzione di questo test, vengono identificati gli ecosistemi terrestri dipendenti dal corpo idrico sotterraneo di cui si deve determinare lo stato quantitativo.

L'analisi di rischio, sulla base delle pressioni e dei relativi impatti, identifica su quali ecosistemi superficiali deve essere condotta l'analisi ecologica e dello stato di salute. Solo i siti superficiali a rischio devono essere considerati per l'analisi relativa a questo test, considerando che i siti non a rischio non implicano uno stato quantitativo scarso dei corpi idrici sotterranei ad essi connessi (European Commission, 2009).

Questa è pertanto un'analisi a scala locale delle osservazioni, e ciò è da tenere bene in considerazione nella fase di attribuzione dello stato quantitativo a tutto il corpo idrico.

La procedura di valutazione dello stato quantitativo è la seguente (Figura 13):

Fase 1 - verifica della circostanza in cui l'ecosistema superficiale connesso con il corpo idrico sotterraneo (di cui si sta valutando lo stato) è in uno stato qualitativo compromesso (“*C'è un Ecosistema Superficiale compromesso - o danneggiato - che dipende dal c.i. sotterraneo in esame?*”)

Fase 2 - identificazione dei superamenti di uno dei valori ‘*Quality standard*’ o di uno dei valori soglia nel corpo idrico sotterraneo, presso uno dei punti di monitoraggio principali; verifica della possibilità di contaminazione dal c.i. sotterraneo all'Ecosistema Superficiale connesso (in base al modello concettuale di circolazione delle acque e a verifiche di campo);

Fase 3 - stima quantitativa della concentrazione dell'inquinante trasferito all'ecosistema superficiale e stima dell'impatto; verifica della esistenza di un danno all'ecosistema superficiale.

Se viene rilevato un danno all'ecosistema superficiale dovuto a contaminazione da parte del corpo idrico sotterraneo, allora quest'ultimo è in stato qualitativo *scarso*.

⁷ Common Implementation Strategy for the WFD: “*Technical Report on Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*, Technical document No. 6” EC, 2011

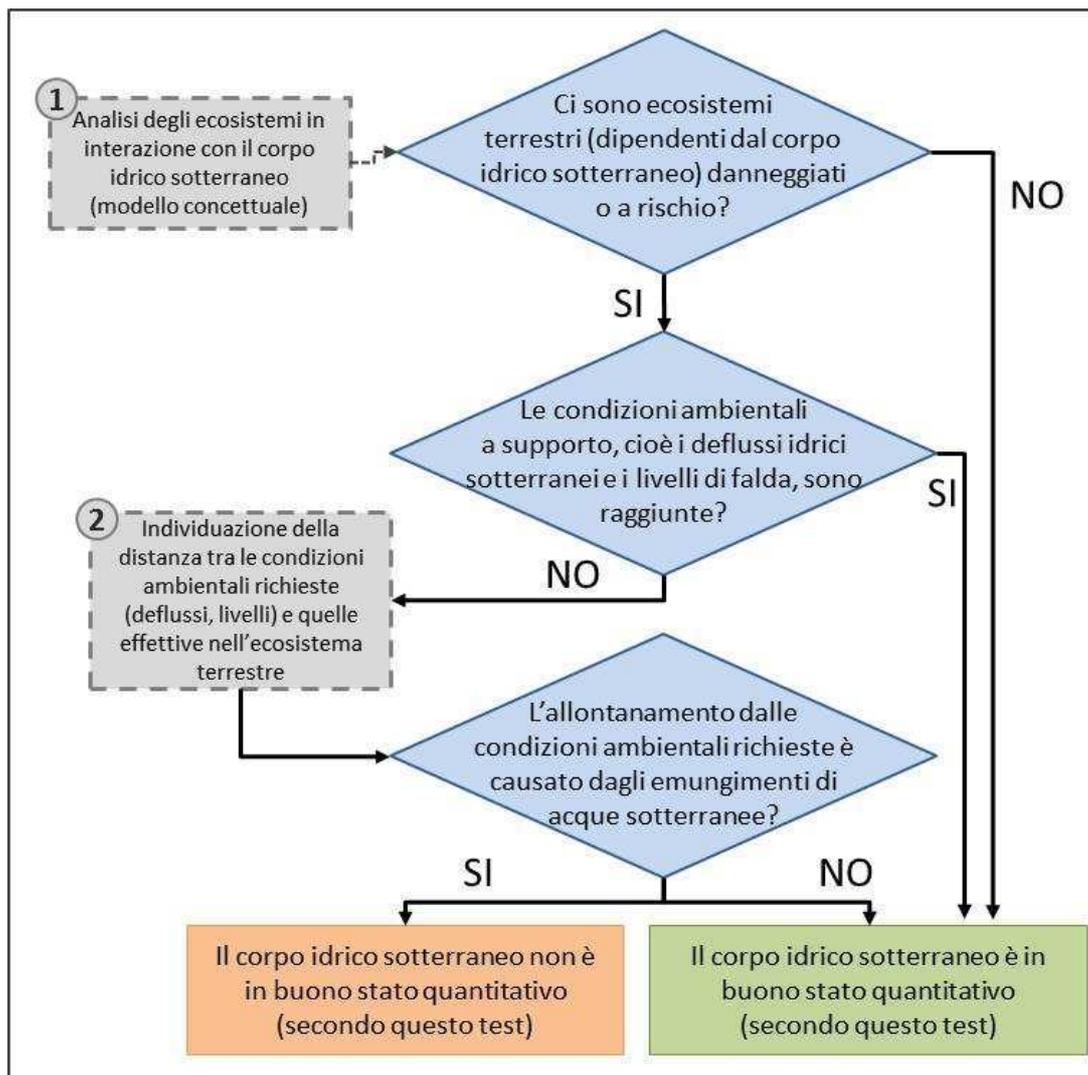


Figura 13 - Test No. 3 Ecosistemi terrestri dipendenti (European Commission, 2009)

9. TEST 4 INTRUSIONE SALINA O DI ALTRO TIPO

In base a questo test (European Commission, 2009), lo stato quantitativo di un corpo idrico sotterraneo è definito buono quando, su lungo periodo, non si verificano intrusioni saline (o di altro tipo) nella falda sotterranea.

Il periodo temporale di lungo termine a cui si fa riferimento è pari almeno a sei anni. Ovviamente, periodi più lunghi di osservazione dei dati consentono di ottenere analisi più rappresentative dei fenomeni e della loro evoluzione nel tempo.

L'intrusione salina o di altro tipo, ai fini di questo test, è intesa come una intrusione di acqua di qualità scadente proveniente da un altro corpo idrico capace di contaminare quello sotterraneo per effetto di variazioni nel deflusso delle acque indotte dai prelievi.

Questo test è strettamente legato a quello per la valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee per effetto della intrusione salina o di altro tipo (Figura 8). Il test prevede il monitoraggio di alcuni parametri chimico-fisici necessari all'individuazione di contaminazione da parte del cuneo salino (o, come detto sopra, di acque di altro tipo di scarsa qualità chimica o di differente chimismo). Il principale parametro è la conducibilità elettrica; altri parametri a supporto possono essere inclusi nel monitoraggio, come ad esempio la concentrazione di cloruri, solfati, sodio, il pH, la temperatura delle acque e gli altri inquinanti che si ritiene possano subire trasporto per effetto dei prelievi idrici e dei quali si è già tenuto conto nel modello concettuale.

Pertanto, ai fini della intrusione salina o di altro tipo, il monitoraggio di un corpo idrico la cui analisi di rischio e il cui modello concettuale indicano una possibile intrusione del cuneo salino nella falda, andrà condotto mediante sia gli indicatori di stato quantitativo (livelli piezometrici; direzioni di flusso sotterranee delle acque; profilo idrogeologico alla scala opportuna del corpo idrico in esame) sia il rilievo della conducibilità elettrica ed eventualmente di altri indicatori tra quelli ritenuti significativi, attraverso profili verticali nei pozzi in cui si registra il fenomeno di intrusione salina.

Se si tratta di intrusione salina, occorre monitorare la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata che consiste in una profilazione in pozzo dei valori chimico-fisici (conducibilità, temperatura, pH) con la profondità. Tali profili andranno ripetuti almeno stagionalmente per un periodo *'di lungo-termine'*, al fine di tenere sotto controllo l'evoluzione del fenomeno e classificare lo stato quantitativo del corpo idrico. Il monitoraggio degli acquiferi costieri e di quelli in cui è possibile che si verifichino fenomeni di intrusione salina avrà un conseguente programma di monitoraggio progettato in modo idoneo rispetto alla scala spaziale (regionale o locale) e temporale (profili stagionali o più frequenti in funzione della velocità di evoluzione dell'intrusione) del fenomeno idrogeologico da controllare.

Come i test precedenti delle acque superficiali, anche questo test è riferito a una scala locale delle osservazioni. Nell'assegnazione dello stato quantitativo a tutto il corpo idrico, in base al test della intrusione salina su un sito specifico, è necessario pertanto che l'area interessata dal fenomeno di intrusione sia pari o superiore almeno al 20% dell'estensione areale dell'intero corpo idrico o porzioni inferiori nel caso ad esempio di aree interessate dal fenomeno e destinate ad approvvigionamento idrico per uso civile.

In Figura 14 si riporta lo schema decisionale del test No. 4 *'Intrusione salina o di altro tipo'*.

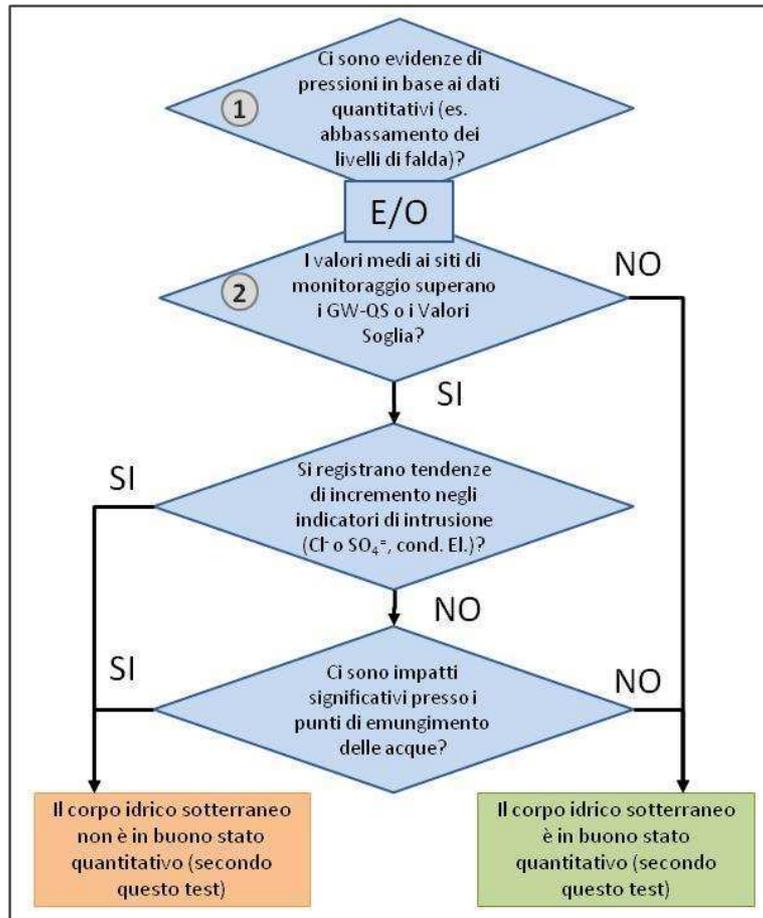


Figura 14 - Test No. 4 Intrusione salina o di altro tipo (European Commission, 2009)

9.1 Acquiferi costieri

Gli acquiferi costieri su cui insistono pressioni significative a causa di prelievi di acque sotterranee dovrebbero essere sottoposti al test dell'intrusione del cuneo salino per la valutazione dello stato quantitativo.

In tali acquiferi il monitoraggio dello stato quantitativo tramite la misura dei livelli piezometrici si deve arricchire con il monitoraggio su ciascuna stazione della rete piezometrica, con periodicità stagionale (ad es. mensile), della Conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Altri indicatori opzionali in aggiunta alla Conducibilità Elettrica, come sopra specificato e in base al caso particolare di intrusione e alle caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero, possono essere aggiunti nei programmi di monitoraggio per specifiche indagini (tali indicatori sono riferiti in particolare alla intrusione salina e non di altro genere):

- pH
- Ione Cl^-
- Ione SO_4^{2-}
- Temperatura dell'acqua ($^{\circ}\text{C}$)
- Ione Na^+
- Altri.

Il monitoraggio della conducibilità elettrica e di altri eventuali indicatori chimico-fisici permette di definire la geometria dell'interfaccia acqua dolce – acqua salata (Figura 15) e le sue oscillazioni nel tempo (v. ad es. De Breuck, 1991).

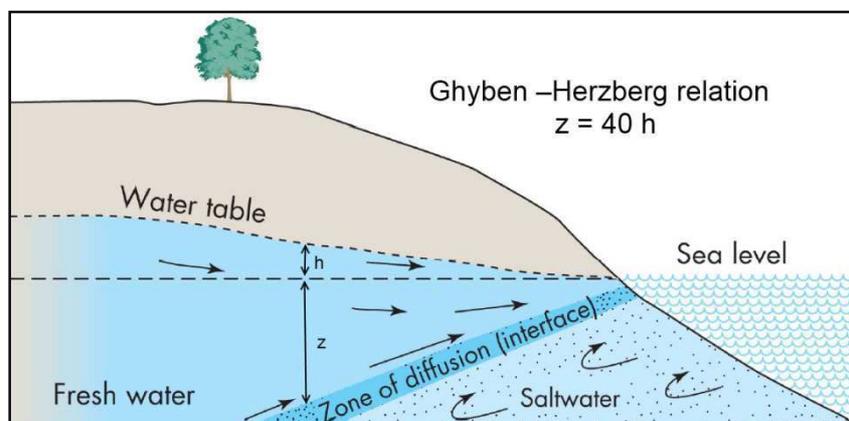


Figura 15 - Relazione di Ghyben-Herzberg dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata

Come è noto, il sovrasfruttamento degli acquiferi costieri provoca il deterioramento quantitativo e l'inquinamento salino della falda idrica, con conseguenze a lungo termine sia sull'utilizzo della risorsa sia sugli ecosistemi connessi, come i sistemi dunali e retro-dunali e delle zone umide costiere.

Tali considerazioni rendono necessario il controllo dei parametri idrologici (livello piezometrico H) e di quelli chimico-fisici associati sopra elencati, con periodicità mensile, tale da permettere misure tempestive di salvaguardia per la protezione dello stato quali-quantitativo delle acque.

In particolare, nei tratti costieri interessati dal fenomeno della intrusione salina, è necessario condurre in pozzi opportunamente selezionati in base alle caratteristiche di rappresentatività della situazione idrogeologica, alle caratteristiche della perforazione e della disponibilità di accesso, profili verticali stagionali di conducibilità elettrica (assieme a profili di temperatura e pH) da confrontare nel corso del tempo (ad es. su un ciclo pluriennale di osservazioni). Tale monitoraggio dovrà consentire di monitorare l'evoluzione della geometria dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata in funzione dell'andamento della ricarica naturale e dei prelievi di acque sotterranee.

L'analisi della intrusione salina nelle falde costiere è possibile mediante altri metodi di analisi, quali in particolare le *indagini geofisiche*, in grado di fornire informazioni di dettaglio con profili accurati della geometria dell'interfaccia; altre indagini con metodi *geochimici* ed *isotopici* sono tipicamente associate alle indagini idrogeologiche e geofisiche.

I profili di conducibilità elettrica andranno condotti preferibilmente sia in periodo di massimo esaurimento delle risorse idriche sotterranee sia in periodo di massima ricarica, al fine di stimare l'escursione annua dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata e l'andamento annuo in relazione ai prelievi.

Si precisa che l'intrusione salina o di altro tipo accertata dal monitoraggio, per definire lo *stato quantitativo scarso* del corpo idrico sotterraneo, deve persistere per un periodo definito di *'lungo termine'*, pari almeno a sei anni di osservazioni nel corpo idrico.

9.2 Link a casi studio di monitoraggio del cuneo salino

Si riportano di seguito alcuni riferimenti a documenti che riportano casi studio di monitoraggio e misure di protezione da fenomeni di intrusione salina in acquiferi costieri:

L. Tosi *et al.* “[Intrusione Salina](http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/9304/1/intrusione_salina.pdf)”, ISMAR - Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Venezia (http://www.earth-prints.org/bitstream/2122/9304/1/intrusione_salina.pdf);

Emilia-Romagna: L’acquifero freatico costiero della regione Emilia-Romagna: modello geologico e stato di salinizzazione. Il geologo dell’Emilia-Romagna, 2010, 39. http://www.geologiemiariomagna.it/rivista/2010-39_Bonzi_Severi.pdf

Emilia-Romagna: Saltwater intrusion in coastal aquifers: A primary case study along the Adriatic Coast investigated within a probabilistic framework. Water, 2013, 5, 1830-1847. <http://www.mdpi.com/2073-4441/5/4/1830>

Veneto: Analisi numerica dell’intrusione del cuneo salino alla foce del fiume Adige con il modello FVShock (Tesi di laurea): http://tesi.cab.unipd.it/43703/1/Tesi_Manuel_Bogoni_1019894.pdf

Sardegna, Sicilia, Puglia: -INEA - Istituto Nazionale di Economia Agraria (oggi CREA) Valutazione del rischio di salinizzazione dei suoli e di intrusione marina nelle aree costiere delle regioni meridionali in relazione agli usi irrigui (2010): http://rps.entecra.it/pages/ResearchData/data/progetti/7_ALLEGATO_Azione4_Salinizzazione_leggero01.pdf

Lazio: Intrusione salina nel Delta del Fiume Tevere. Geologia, idrologia e idrogeologia del settore romano della piana costiera (2007): Giornale di Geologia Applicata 5 (2007) <http://www.aigaa.org/AIGA/public/GGA.2007-05.0-02-0171.pdf>

Lazio: Effetti ambientali del sovrasfruttamento degli acquiferi della Pianura Pontina (Aquifer Vulnerability and Risk, 2005): 2nd International Workshop: <http://geoingegneria.dicea.uniroma1.it/website/people/mrossi/personal/lavori/parma.pdf>

Marche: Progetto Life Salt (2009-2011), Fiume Esino [www.lifesalt.it](http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_IT_000497_LAYMAN_IT.pdf); http://ec.europa.eu/environment/life/project/Projects/index.cfm?fuseaction=home.showFile&rep=file&fil=LIFE07_ENV_IT_000497_LAYMAN_IT.pdf

Sicilia: Intrusione salina nell’acquifero di Petrosino, Sicilia http://www2.ogs.trieste.it/gngts/gngts/convegniprecedenti/2009/presentazioni/3.1/0830_Martorana_Martorana-GNGTS2009.pdf.

**SEZIONE 2 - MONITORAGGIO DELLO STATO
QUANTITATIVO**

10. MONITORAGGIO QUANTITATIVO E INDICATORI IDROLOGICI

Il monitoraggio dello stato quantitativo prevede di sottoporre a controllo i corpi idrici sotterranei o i gruppi di corpi idrici, così come definito dal D. Lgs. 30/09.

Il monitoraggio deve essere effettuato attraverso la misura in continuo di alcuni indicatori scelti come rappresentativi in funzione del tipo di acquifero e degli scopi del monitoraggio stesso.

Le reti e i programmi di monitoraggio (densità dei punti, frequenza di misura) sono funzione del modello idrogeologico concettuale, delle pressioni presenti sul territorio e dell'*Analisi di Rischio* condotta all'inizio di ogni ciclo sessennale di gestione di bacino (v. Cap. 4). I risultati del monitoraggio vengono inoltre utilizzati per l'*Analisi di stato* condotta al termine del ciclo di gestione di bacino o distretto e per la verifica della efficacia delle misure messe in atto.

I risultati del monitoraggio sono necessari per la validazione e l'affinamento del modello idrogeologico concettuale, in un processo circolare di continuo miglioramento delle conoscenze sulla base dei nuovi dati acquisiti.

Gli obiettivi dei programmi di monitoraggio sono elencati nella tabella seguente, tratta dalla CIS *Guidance* N. 15 sul monitoraggio delle acque sotterranee (European Commission, 2007):

Tabella 3 - Obiettivi delle reti di monitoraggio quantitativo

OBIETTIVI DEL MONITORAGGIO QUANTITATIVO
<i>Supporto e validazione all'analisi di rischio</i>
<i>Analisi di stato: classificazione dello stato dei corpi idrici a rischio</i>
<i>Analisi di stato: conferma che i corpi idrici non a rischio sono in buono stato</i>
<i>Identificazione dei fenomeni di intrusione salina o di altro tipo</i>
<i>Monitoraggio dei corpi idrici transfrontalieri</i>
<i>Verifica della efficacia dei programmi di misure</i>

In relazione allo stato complessivo del corpo idrico sotterraneo, i programmi e le reti di monitoraggio devono fornire gli elementi di base per le seguenti analisi:

- calcolo o stima della *Ricarica degli acquiferi* e del *Bilancio idrico*;
- individuazione e monitoraggio della interazione tra le acque superficiali e quelle sotterranee;
- calcolo o stima delle *portate e dei deflussi sotterranei* da cui dipende lo stato di qualità degli ecosistemi superficiali connessi con le acque sotterranee;
- monitoraggio dei parametri chimico-fisici per valutare, mappare e controllare i fenomeni di intrusione salina o di altro tipo nelle acque dolci sotterranee.

Il monitoraggio viene condotto attraverso una rete di punti di controllo, rappresentati sia da pozzi e piezometri sia da sorgenti localizzate e lineari lungo i corsi d'acqua che drenano le acque sotterranee.

Il monitoraggio pertanto comprende la misura di parametri idrologici, meteo-climatici e chimico-fisici.

Il Decreto Legislativo 30/09 specifica che la rete di monitoraggio quantitativo è "*volta a rilevare una stima affidabile dello stato di tutti i corpi idrici o gruppi di corpi idrici sotterranei, compresa la stima delle risorse idriche sotterranee disponibili*".

I principali parametri raccolti dalla rete di monitoraggio quantitativo delle acque sotterranee sono i livelli delle falde e le portate delle sorgenti. A questi parametri si possono aggiungere parametri di altre reti idrologiche e meteo-climatiche utili per elaborare il calcolo del bilancio idrologico: le precipitazioni, la temperatura dell'aria, i livelli idrometrici registrati presso le sezioni fluviali attrezzate e presso le principali sorgenti localizzate e le misure di portata effettuate per la correlazione tra i livelli idrometrici e le relative portate liquide (Tabella 4).

Tabella 4 - Parametri idrologici e chimico-fisici della rete di monitoraggio quantitativo

PARAMETRI IDROLOGICI, CLIMATICI E CHIMICO-FISICI	UNITÀ DI MISURA	INDICATORI IDROLOGICI DERIVATI DAI DATI DI BASE	FREQUENZA DI MONITORAGGIO
Livello delle falde	H (m s.m.)	Livello piezometrico	Mensile; Giornaliera; In continuo (se disponibili le stazioni automatiche)
Portate sorgenti	Q (l/s)	Deflusso idrico sotterraneo	In continuo (se disponibili le stazioni automatiche) Giornaliera; Mensile;
Livelli idrometrici presso sezioni fluviali attrezzate e sorgenti	H (m s.m.)	Deflussi totali; Ruscaldamento, Flusso di base; Deflusso minimo vitale⁸	Giornaliera; In continuo (se disponibili le stazioni automatiche)
Portate (nelle sezioni fluviali e allo sbocco delle sorgenti)	Q (m ³ /s)	Deflussi totali; Ruscaldamento, Flusso di base; Deflusso minimo vitale; Interazione fiume/c.i. sotterraneo	In funzione della necessità di elaborare la curva di correlazione portate/altezze idrometriche; Stagionale o mensile per l'analisi delle interazioni acque superficiali/acque sotterranee.
<i>Per la stima della Ricarica degli acquiferi (LTAAR) e delle risorse idriche sotterranee disponibili (AGR):</i>			
Precipitazioni	P (mm)	Evapotraspirazione reale, Precipitazione efficace, Infiltrazione efficace; Ricarica degli acquiferi	Giornaliera
Temperatura dell'aria	T max, T min (°C)	Evapotraspirazione potenziale, Evapotraspirazione reale	Giornaliera

⁸ Per il calcolo del deflusso minimo vitale si vedano le metodologie proposte (metodi regionali e metodi sperimentali): il riferimento normativo è il D.M. 28 luglio 2004 'Linea guida per la predisposizione del bilancio idrico di bacino, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del minimo deflusso vitale'.

PARAMETRI IDROLOGICI, CLIMATICI E CHIMICO-FISICI	UNITÀ DI MISURA	INDICATORI IDROLOGICI DERIVATI DAI DATI DI BASE	FREQUENZA DI MONITORAGGIO
Prelievi (*)	Q (m ³ /s; m ³ /anno)	Analisi di bilancio idrico	Annua (volumi totali annui); Frequenza differente (es. mensile, stagionale) in funzione di casi studio specifici (es. fenomeni di intrusione salina o di altro tipo).
<i>Per il monitoraggio dei fenomeni di intrusione salina e di altro tipo:</i>			
Conducibilità elettrica	µS/cm	Monitoraggio della interfaccia acqua dolce/acqua salata	In funzione del fenomeno da monitorare
Eventuali altri indicatori chimico-fisici ritenuti utili per il monitoraggio della intrusione salina o di altro tipo	pH T (°C) Cl ⁻ SO ₄ ⁼ altri	Monitoraggio della interfaccia acqua dolce/acqua contaminata	In funzione del fenomeno da monitorare
<i>Per il monitoraggio degli ecosistemi terrestri dipendenti</i>			
Monitoraggio ecologico		Indicatori ecologici	In funzione del fenomeno da monitorare

(*) La Direttiva Quadro Acque (WFD, 2000/60/CE) all' Art. 11 prevede che l' autorità competente alla redazione del Piano di Gestione di ciascun Distretto Idrografico predisponga un programma di misure volto al raggiungimento degli obiettivi ambientali di cui all' Art. 4 della direttiva stessa.

Tale “*programma di misure*” (WFD, Art. 11), distinto dai “*programmi di monitoraggio*” dello stato delle acque (WFD, Art. 8) ivi compreso il monitoraggio dello stato quantitativo delle acque sotterranee, prevede tra le misure di base (cioè quelle minime che dovrebbero essere messe in atto) le “*misure di controllo dell' estrazione delle acque superficiali e sotterranee e dell' arginamento delle acque dolci superficiali, compresi la compilazione di uno o più registri delle estrazioni...*” (WFD, Art. 11, comma 3, e).

Pertanto, in linea con quanto previsto dalla WFD, è possibile inserire il monitoraggio dei prelievi idrici tra tali ‘*misure*’ di controllo previste dall' Art. 11 della WFD.

Il flusso informativo dei dati sui prelievi idrici da ciascun corpo idrico pertinente all' ente gestore o al soggetto titolare della concessione, andrebbe opportunamente specificato nel Piano di Gestione di Distretto Idrografico, al fine di assicurare il corretto monitoraggio dei dati e trasferimento delle informazioni.

Sulla base di queste considerazioni, i dati relativi ai prelievi dai corpi idrici sotterranei, necessari per l' analisi dello stato quantitativo, possono quindi rientrare nel programma di misure di controllo ai sensi dell' Art. 11 della WFD.

10.1 Distribuzione spaziale della rete di monitoraggio

Non è possibile fornire un valore assoluto della densità dei nodi della rete di monitoraggio quantitativo (n. punti di monitoraggio/km²) idonei a rappresentare le condizioni idrogeologiche del corpo idrico.

Il numero dei punti di monitoraggio dipende infatti dal tipo di acquifero, dalla sua estensione e dall'assetto geologico e geomorfologico, oltre che dalla disponibilità di punti d'acqua (pozzi/piezometri/sorgenti) idonei per effettuare le misure.

Nelle aree montuose, ad esempio, il numero di pozzi/piezometri per le prospezioni idrogeologiche è nettamente inferiore rispetto a quello delle perforazioni presenti nelle aree di pianura e alluvionali e il monitoraggio quantitativo viene preferenzialmente effettuato tramite la misura delle portate liquide in uscita dal sistema idrogeologico o dal bacino (Preziosi & Romano, 2009).

In generale, gli acquiferi di pianura sono quelli più soggetti a pressioni antropiche e pertanto sono quelli che necessitano di un monitoraggio più fitto di punti di controllo ai fini della valutazione dello stato quantitativo (Farina *et al.*, 2014).

Per quanto riguarda il sito di monitoraggio da includere nei programmi, il principio da seguire dovrebbe essere quello della "rappresentatività" del sito scelto rispetto al numero totale di stazioni della rete, ovvero della capacità del singolo punto o del gruppo di punti di essere rappresentativi dell'intero corpo idrico o di porzioni estese di questo.

Così, nel caso di reti con pochi punti di monitoraggio, il criterio è quello di selezionare pozzi/piezometri (o sorgenti puntuali oppure sezioni fluviali per la misura di portata) che abbiano i requisiti di *rappresentatività* del corpo idrico.

10.2 Periodicità del monitoraggio

Anche nel caso della frequenza del monitoraggio, sebbene non sia possibile fissare un valore assoluto per tutti i corpi idrici e per tutte le circostanze (che dipendono dal tipo di acquifero, dall'uso del suolo, dalle infrastrutture e dalle pressioni presenti ecc.), si fissano comunque dei criteri di base in ogni caso adattabili e modificabili in funzione delle necessità di controllo specifiche.

Lo scopo è quello di uniformare i metodi di raccolta dei dati, le reti presenti sul territorio e rendere inoltre confrontabili i risultati che derivano dal monitoraggio all'interno di ciascun Distretto Idrografico o Regione.

La periodicità delle misure presso i punti della rete dipende dall'obiettivo del monitoraggio (trend dei livelli piezometrici, fenomeni di intrusione salina o di altro tipo, stima delle risorse idriche disponibili, ad es. precipitazioni, temperature dell'aria, ecc.).

Essa inoltre dipende dal modello concettuale elaborato, dal tipo di acquifero e dal tipo di indicatore (livelli, portate).

Ovviamente, parametri con una variabilità inter-annuale o stagionale elevata vanno monitorati con una frequenza adeguata, ad es. mensile o giornaliera.

Per quanto riguarda i livelli piezometrici, ad esempio, indipendentemente dal tipo di acquifero, una periodicità mensile è indicata e sufficiente per gli scopi del monitoraggio di tipo quantitativo.

Per quanto riguarda le portate, la frequenza giornaliera è quella minima auspicata (European Commission 2007).

Uno dei fattori che condiziona la scelta della frequenza di monitoraggio è la disponibilità di stazioni attrezzate con strumentazione automatica, in grado di fornire un monitoraggio in continuo dei dati.

Il monitoraggio mensile dei livelli freaticometrici nei pozzi e piezometri, ad esempio, permette l'elaborazione degli idrogrammi mensili dei livelli piezometrici, necessari alla analisi dei *trend* così come mostrato nei paragrafi successivi (Par. 11).

Tale valore mensile dei livelli potrà derivare sia da una singola misura istantanea sia dalla media di più misure da rilevamenti automatici.

Sui corpi idrici nei quali non esistano piezometri attrezzati per le misure di livello in continuo, si dovrebbe prevedere una frequenza almeno stagionale dei rilievi per ciascun pozzo rappresentativo (almeno 4 misure/anno, ripetute con periodicità stagionale), privilegiando, piuttosto che due o quattro misure all'anno effettuate su un gran numero di pozzi, un programma di misure basato su un minor numero di punti rappresentativi con misure almeno mensili. Questa scelta va fatta sulla base del modello concettuale che dovrebbe contenere almeno la variabilità (minimo e massimo) dei livelli in un periodo temporale rappresentativo per ciascun corpo idrico sotterraneo.

Nel caso di monitoraggio dei corpi idrici sotterranei effettuato tramite la misura dei deflussi (sia presso le sorgenti localizzate sia presso le sorgenti lineari, ossia dei contributi di acque sotterranee - o flusso di base - ai corsi d'acqua), si auspica di disporre di stazioni attrezzate per le misure in continuo.

Le moderne tecnologie consentono di attrezzare le sezioni fluviali con stazioni di misura in continuo dei livelli idrometrici. Questi poi devono essere trasformati in valori di portata attraverso la costruzione delle curve di taratura livelli idrometrici/portate (Figura 16) per la quale sono necessarie periodiche misure di portata in alveo (v. ad es. WMO, 2010 "*Manual on Stream Gauging*"; Buchanan & Somers, 1969).

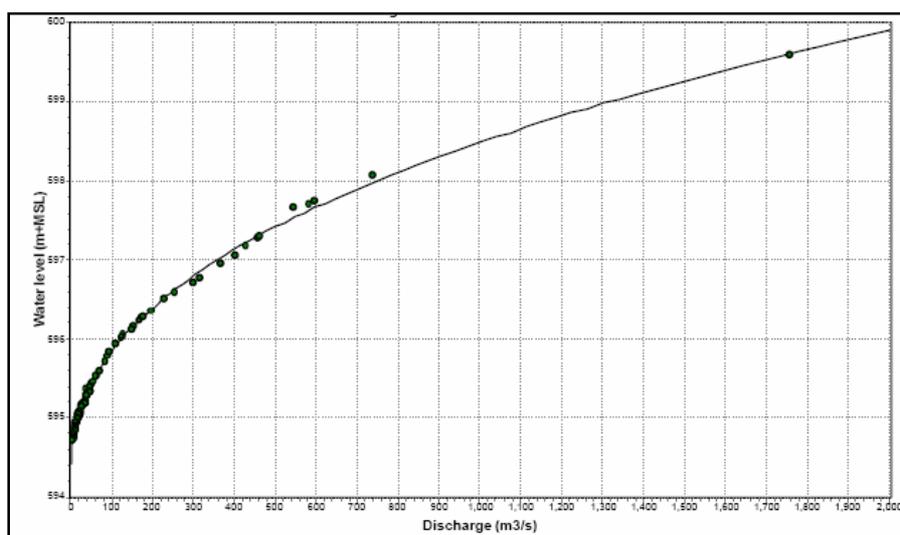


Figura 16 - Esempio di grafico portate/livelli idrometrici (da Braca, 2008)

In alternativa, nelle sezioni non attrezzate con idrometrografi in continuo, il programma di monitoraggio dovrà prevedere una misura di portata almeno stagionale, con l'obiettivo di disporre a regime di misure mensili.

Nel peggiore dei casi, i dati di cui è necessario disporre sono le misure di portata in periodo di esaurimento delle risorse, per avere le informazioni quantitative sui volumi del flusso di base.

La necessità di disporre, sia per i livelli idrometrici sia per le portate, di misure mensili è legata alla possibilità di effettuare le analisi statistiche dei dati mostrate nei successivi Capitoli 11 e 12.

Per la descrizione dei programmi di monitoraggio in funzione del tipo di acquifero, si fa riferimento nel seguito alle due seguenti macro categorie:

- **Acquiferi alluvionali e nei materiali porosi** (acquiferi nelle formazioni geologiche caratterizzate da permeabilità per porosità; acquiferi nelle conoidi e nei depositi clastici: ghiaie, sabbie, limi, argille);

-
- **Acquiferi nelle rocce fratturate e fessurate e nei sistemi carsici** (acquiferi nelle formazioni rocciose caratterizzati da permeabilità secondaria, per fessurazione e carsismo, es.: acquiferi nelle rocce carbonatiche, nelle idrostrutture carsiche, acquiferi nelle rocce cristalline e nelle vulcaniti fratturate, ecc.)

Il monitoraggio quantitativo, in definitiva, ha la finalità sia di consentire l'*Analisi di stato* alla fine di ciascun ciclo di gestione di bacino, con periodicità sessennale, sia di controllare le variazioni dello stato nel tempo e l'efficacia dei programmi di misure, nel corso del successivo ciclo sessennale di gestione.

11. MONITORAGGIO DEGLI ACQUIFERI ALLUVIONALI

Il monitoraggio quantitativo va programmato in funzione della tipologia del complesso idrogeologico o dell'acquifero, come riportato in Tabella 5 e così come indicato nella normativa nazionale (D. Lgs. 30/09).

Il monitoraggio va programmato anche in funzione della tipologia di indicatore necessario (livello piezometrico, portata, parametri meteo-climatici, ecc.).

Tabella 5 – *Complessi idrogeologici accorpati (da: Mouton et al., 1982⁹, in D. Lgs. 30/09)*

SIGLA	COMPLESSI IDROGEOLOGICI
DQ	<i>Alluvioni delle depressioni quaternarie</i>
AV	<i>Alluvioni vallive</i>
CA	<i>Calcari</i>
VU	<i>Vulcaniti</i>
DET	<i>Formazioni detritiche degli altopiani plio-quaternari</i>
LOC	<i>Acquiferi locali</i>
STE	<i>Formazioni sterili</i>

Come detto in precedenza, nel presente documento si fa riferimento alle due tipologie di monitoraggio per tipo di acquifero:

- (i) monitoraggio negli acquiferi alluvionali s.l. o permeabili per porosità (DQ; AV; DET; VU; LOC);
- (ii) monitoraggio negli acquiferi permeabili per fessurazione e carsismo (CA; VU; LOC).

Negli acquiferi alluvionali s.l., l'indicatore di base dello stato quantitativo è rappresentato dal **livello piezometrico**; subordinatamente può essere adottata la portata di sorgenti e corsi d'acqua che drenano le acque sotterranee, qualora siano disponibili i dati.

11.1 Monitoraggio tramite misura del Livello piezometrico (H)

Ai fini dell'uso del livello piezometrico quale indicatore dello stato quantitativo è necessario poter distinguere l'impatto causato dai prelievi da quello causato dalle variazioni naturali della ricarica degli acquiferi per cause climatiche.

Questa individuazione delle diverse cause della variazione dei livelli non è sempre possibile a causa soprattutto della frammentarietà e incertezza dei dati riguardanti i prelievi.

Tuttavia, è in ogni caso necessario utilizzare l'indicatore del livello H, indipendentemente dalla origine naturale o antropica della sua oscillazione, mediante il confronto tra la situazione

⁹ Mouton et. al, 1982

http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/groundwatercd/PDFs%5Cstudio%20sulle%20risorse%20-%20Italia.pdf

idrologica attuale e una condizione naturale di confronto (o di *riferimento*) su lungo periodo, relativa ai livelli della falda idrica nel passato ritenuti non disturbati da una data pressione.

Il livello piezometrico in idrologia è definito dalla quota (elevazione al di sopra del livello del mare) del livello dell'acqua nel sottosuolo (H, m s.l.m.; Castany, 1982).

Questo è misurato in una rete di piezometri il cui numero varia, come detto, in funzione del modello concettuale dell'acquifero, della sua estensione areale e della presenza e vulnerabilità a determinate pressioni (es. fonti di inquinanti, campi pozzi, vulnerabilità ad intrusione salina negli acquiferi alluvionali costieri, ecc.).

I punti della rete sono rappresentati dai piezometri (o pozzi) scelti in base alle caratteristiche di rappresentatività della perforazione:

- il piezometro deve interessare l'acquifero in esame e deve escludere le falde superficiali sospese;
- il livello della falda deve fare riferimento a condizioni idrodinamiche indisturbate da altri pozzi in emungimento;
- deve poter essere possibile, ad es. mediante campionatore, prelevare campioni per le analisi chimico-fisiche delle acque a differenti profondità (i nodi della *rete quantitativa* possono infatti coincidere con le stazioni della *rete qualitativa*);
- la perforazione deve essere corredata dalle informazioni sulla stratigrafia del sondaggio;
- dev'essere disponibile una serie storica di registrazione dei livelli.

I pozzi con tali caratteristiche e con la disponibilità di serie storiche dei dati di almeno 10 anni di registrazioni rientrano nel programma di monitoraggio quantitativo.

Il valore minimo di almeno 10 anni è dato dalla necessità di considerare l'effetto dei periodi climatici pluriennali aridi e umidi (Du *et al.* 2012; Bordi *et al.*, 2004; Fischer *et al.*, 2013) che incidono sulla naturale ricarica dell'acquifero.

11.1.1 Livello piezometrico di riferimento

Allo scopo di confrontare le condizioni idrodinamiche attuali con la *condizione 'naturale' di riferimento*, per ciascun piezometro di cui si disponga di una serie storica dei dati relativa ad almeno 10 anni di osservazioni, va calcolata la naturale fluttuazione dei livelli nell'anno medio su lungo termine.

Con il termine "naturale fluttuazione" si intende l'oscillazione dei livelli compresa tra un minimo ed un massimo stagionale in base alla ricarica dell'acquifero, non influenzata dalle pressioni attuali che impattano sull'acquifero e che causano alterazione idrologica, compromettendo o alterando lo stato quantitativo.

Allo scopo di confrontare le condizioni idrodinamiche di periodi non troppo distanti temporalmente dall'attuale, si suggerisce di effettuare l'elaborazione del periodo annuo medio di riferimento non oltre 15-20 anni dal presente. Tuttavia, dove le pressioni sono presenti da un maggior numero di anni, le condizioni di riferimento si devono riferire al periodo precedente la nascita di tali pressioni.

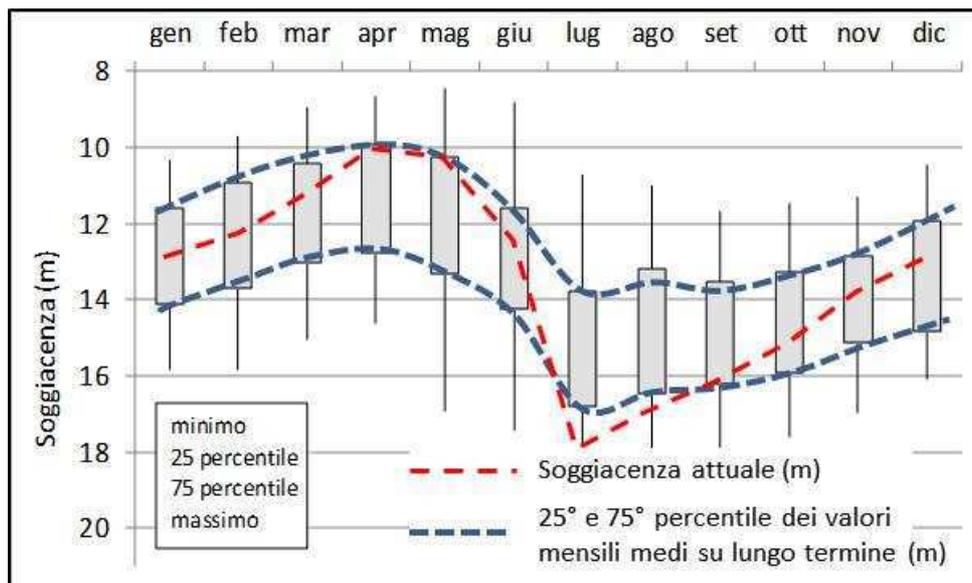


Figura 17 - Idrogramma mensile medio dei livelli piezometrici di riferimento (espressi in m di soggiacenza). Il diagramma è stato realizzato con i dati registrati in continuo (frequenza oraria) in un pozzo della rete di monitoraggio regionale dell'Emilia-Romagna, nel periodo 2007-2015

Il livello piezometrico di riferimento, per ciascun piezometro che disponga di dati storici, è rappresentato dal *range* di fluttuazione idrometrica compreso tra il 25° e il 75° percentile dei valori mensili sul lungo termine, come mostrato in modo esemplificativo in Figura 17.

Le curve costruite interpolando i valori del 25° e il 75° percentile dei dati mensili di soggiacenza definiscono una fascia di fluttuazione che, per gli scopi del monitoraggio quantitativo, può essere considerata la naturale oscillazione annua media dell'acquifero in quel dato nodo della rete.

Escursioni del livello piezometrico attuale al di sotto della fascia di naturale oscillazione stagionale della falda su lungo termine pongono il corpo idrico sotterraneo in una condizione di 'attenzione' dal punto di vista dello stato quantitativo, e potrebbero suggerire di incrementare la frequenza di monitoraggio o di intraprendere misure per la salvaguardia delle risorse.

In generale, valori dell'escursione del livello piezometrico al di sotto del 15-30% della naturale oscillazione stagionale sono da considerarsi condizioni critiche per lo stato quantitativo di monitoraggio del corpo idrico.

Questa proposta di elaborazione dei dati di monitoraggio dipende dalla consistenza dei dati disponibili (lunghezza e completezza della serie dei dati). Se il periodo di osservazione è minore a 10 anni si dovrebbero prendere in considerazione soglie di escursione al di sotto del livello piezometrico 'naturale' più ampie di quelle sopra suggerite.

11.1.2 Periodicità delle misure

La periodicità delle misure di livello di falda (H) nella rete di pozzi e piezometri dovrebbe essere almeno mensile, al fine di permettere l'elaborazione dei dati rappresentata nel paragrafo precedente in Figura 17.

Laddove non si possa effettuare un monitoraggio mensile su tutti i punti della rete freaticometrica, andranno di conseguenza selezionati un numero inferiore di pozzi e piezometri rappresentativi dell'intero corpo idrico o di porzioni di questo, scelti sulla base del modello concettuale e del tipo di acquifero.

Il monitoraggio può essere condotto in continuo, se la stazione di rilevamento è attrezzata, oppure con rilevamento manuale.

Se sono disponibili i valori giornalieri di livello, il valore medio mensile rappresenta la media dei valori giornalieri.

L'idrogramma di riferimento su lungo periodo andrebbe aggiornato ogni anno in base alla disponibilità dei dati più recenti della serie di registrazioni.

Nel caso in cui nel corpo idrico siano assenti pozzi attrezzati per le misure automatiche in continuo, la frequenza minima di monitoraggio dovrebbe essere stagionale (4 misure all'anno). Come detto all'inizio del Capitolo 10, laddove sia possibile e su un numero anche minimo di piezometri rappresentativi delle condizioni idrogeologiche dell'acquifero, si consiglia di disporre almeno di una misura mensile.

Nella peggiore delle condizioni, ad esempio nel caso di pozzi per i quali si disponga solo di due misure/anno (di cui la prima in periodo di ricarica e la seconda nel periodo di massimo esaurimento delle risorse), l'idrogramma dei livelli di falda di Figura 17 diventa analogo a quello di Figura 18. In questa analisi semestrale sono riportati i valori delle due misure annue e la fascia di oscillazione dei livelli misurati nel passato presenta solo un valore minimo e uno massimo.

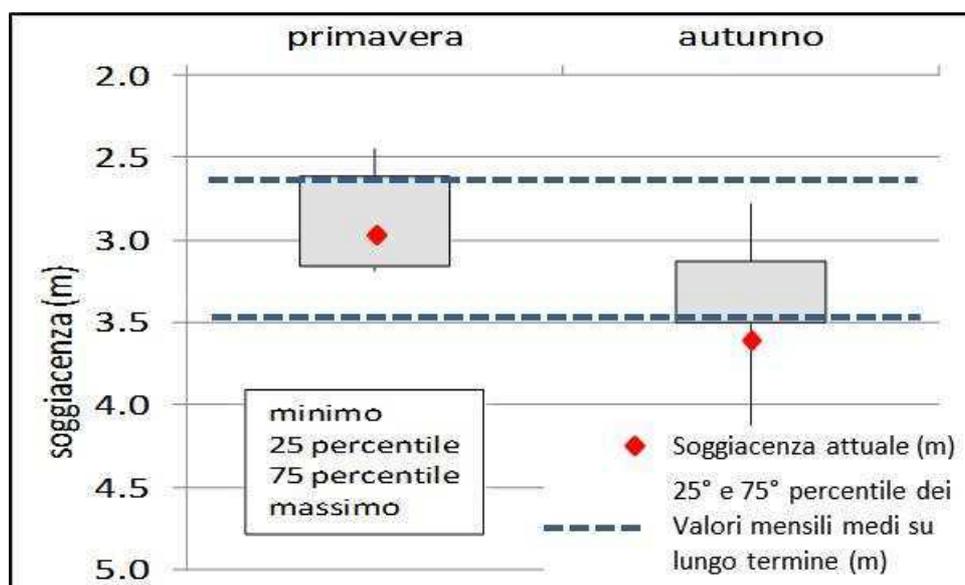


Figura 18 - Idrogramma semestrale dei livelli piezometrici di riferimento (espressi in m di soggiacenza). Il diagramma è stato realizzato con i dati misurati in manuale con frequenza semestrale (primavera e autunno) in un pozzo della rete di monitoraggio regionale dell'Emilia-Romagna, nel periodo 2001-2015

11.1.3 Risultati del monitoraggio

I risultati del monitoraggio devono essere rappresentati nell'idrogramma mensile medio dei livelli piezometrici. I dati da rappresentare sono (Figura 17):

- Minimo (del valore mensile medio su lungo periodo);
- 25° percentile (del valore mensile medio su lungo periodo);
- 75° percentile (del valore mensile medio su lungo periodo);
- Massimo (del valore mensile medio su lungo periodo);

I valori del 25° e 75° percentile identificano sull'idrogramma la fascia di *fluttuazione* naturale dell'acquifero all'interno della quale i valori attuali del livello di falda sono considerati 'normali' ai fini del monitoraggio quantitativo.

I risultati di tale analisi permettono sia di valutare eventuali misure necessarie alla salvaguardia delle risorse idriche sotterranee contro il sovra-sfruttamento dell'acquifero sia di adeguare i programmi di monitoraggio alle necessità di un controllo più accurato sulla dinamica della variazione idrologica.

I piezometri attrezzati con sensori di rilevamento in continuo forniscono dati (orari, giornalieri, ecc.) di grande interesse e dettaglio che possono essere utilizzati per gli approfondimenti necessari nel caso di corpi idrici i cui livelli di falda risultano al di sotto di quelli medi su lungo termine.

11.1.4 Analisi dei trend

Oltre all'idrogramma mensile e a quello mensile medio su lungo termine, i valori di livello piezometrico forniscono una indicazione dei trend pluriennali di variazione del regime idrologico della falda. In questo caso i grafici H/tempo (anni) forniscono indicazioni utili all'analisi delle condizioni di criticità del corpo idrico classificato in stato quantitativo scarso.

L'analisi dei livelli mediante il metodo dei trend è illustrata nella sezione dedicata al test del bilancio idrico, a cui si rimanda (v. Par.6.2).

11.1.5 Scala spaziale

L'indicatore H livello piezometrico fornisce due tipi di informazioni a scale spaziali differenti:

- 1) **scala locale:** se usato come informazione puntuale, fornisce indicazioni alla scala di sito, relativamente all'area nel quale è ubicata la perforazione;
- 2) **scala del corpo idrico:** se interpolato con gli altri piezometri della rete, ad es. mediante spazializzazione dei dati, contribuisce a fornire indicazioni alla scala di corpo idrico.

In questo ultimo caso possono essere realizzate le mappe dell'acquifero con l'ubicazione dei nodi della rete di monitoraggio e l'indicazione del valore [mensile o annuale] del livello di falda attuale e della sua posizione rispetto al *range* di fluttuazione su lungo termine desunto dai dati storici.

Sulla cartografia idrogeologica potranno quindi essere riportati i simboli riportati in Figura 19, relativi al livello attuale di falda rispetto a quello di riferimento, per ciascun nodo della rete:

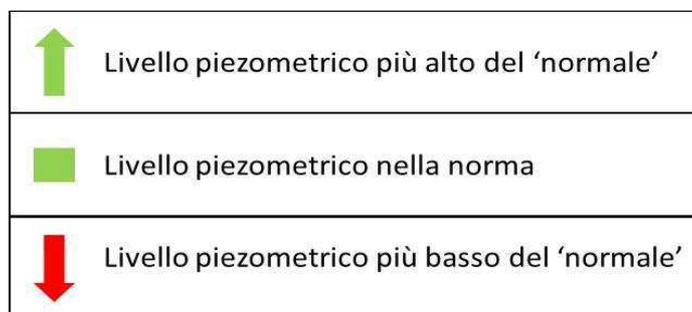


Figura 19 - Simbologia proposta per l'indicatore (H) di livello piezometrico

- “Livello piezometrico più alto del normale”: il valore H attuale è al di sopra del *range* di fluttuazione piezometrico di riferimento (>75° percentile);
- “Livello piezometrico nella norma”: il valore H attuale è compreso nel *range* di fluttuazione di riferimento (tra il 75° percentile e il 25° percentile);;
- “Livello piezometrico più basso del 'normale' (<25° percentile): il valore H attuale è al di sotto del *range* di fluttuazione naturale per oltre il 15-30% della differenza tra il valore mensile medio più alto (75° percentile) e il valore mensile medio più basso (25° percentile) della fascia di riferimento;

In caso di “livello piezometrico più basso del normale”, l'acquifero viene classificato in una condizione di attenzione dal punto di vista quantitativo ed eventualmente sottoposto a maggiori frequenze di misure o ad analisi specifiche.

La spazializzazione dei dati di monitoraggio dei livelli permette inoltre la rappresentazione cartografica dei trend di variazione, come mostrato ad esempio nella Figura 20:

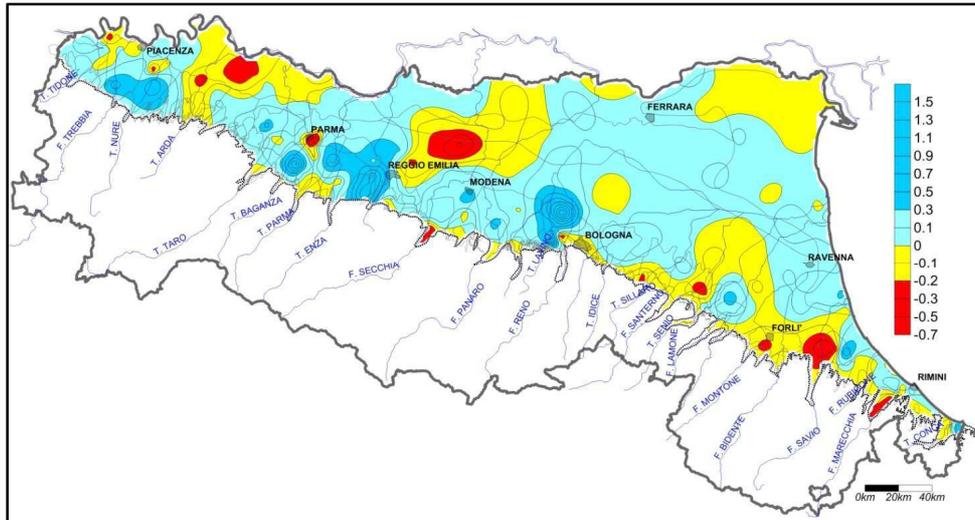


Figura 20 - Carta dei trend annui dei livelli piezometrici in Emilia Romagna (ARPAE Emilia-Romagna)

Un esempio di presentazione dei dati di monitoraggio dei livelli è costituito dalla carta *Eaufrance* (Agenzia pubblica di informazione francese sull'acqua) relativa ai livelli di falda mensili della rete di monitoraggio francese (Figura 21).

Nella carta dei livelli di falda, per ciascun piezometro della rete, si riportano due informazioni:

- 1) **L'evoluzione più recente** (riferita all'ultimo mese), sulla base della differenza del valore di livello del mese attuale (in figura: Ottobre 2015) e quello del mese precedente: il nodo della rete viene indicato come "in crescita", "stabile", "in diminuzione";
- 2) **Livello di falda:** in base al confronto con il *range* di fluttuazione del periodo di lungo termine (10 anni), analogamente a quanto mostrato in Figura 17 e proposto in questo documento; ciascun nodo della rete viene classificato come "più alto del normale", "normale", "più basso del normale" (se il livello scende al di sotto del 5% del *range* di fluttuazione naturale).

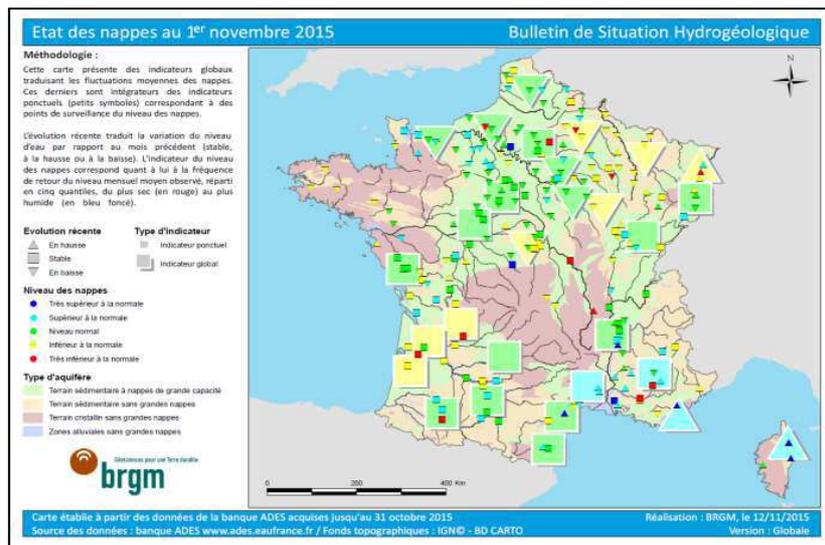


Figura 21 - Carta dei livelli piezometrici mensili del territorio nazionale francese¹⁰

¹⁰ <http://www.eaufrance.fr/docs/bsh/2015/11/nappes.php>

12. MONITORAGGIO DEGLI ACQUIFERI FRATTURATI E FESSURATI E DEI SISTEMI CARSIICI

Il monitoraggio dello stato quantitativo dei corpi idrici degli acquiferi fratturati e dei sistemi carsici può essere effettuato mediante:

- controllo del “livello piezometrico” di un set rappresentativo di pozzi e piezometri, attestati nella falda carsica basale e accuratamente scelti in base ai criteri di rappresentatività della perforazione;
- monitoraggio in continuo delle portate delle sorgenti in uscita dal sistema idrogeologico; l’analisi dei dati di deflusso, ai fini del monitoraggio quantitativo, può essere effettuata con la metodologia dell’Indice di Alterazione del Regime Idrologico (IARI), costruito con l’analisi dell’alterazione idrologica basata sul confronto tra un periodo di “riferimento” precedente a determinate pressioni e il periodo più recente o attuale, così come mostrato nel successivo paragrafo 12 e dettagliato in modo esaustivo nel manuale ISPRA “*Implementazione della Direttiva 2000/60/CE. Analisi e valutazione degli aspetti idromorfologici. Versione 1.1.*” (ISPRA, 2011)¹¹.

Poiché la circolazione delle acque sotterranee negli acquiferi permeabili per fessurazione e carsismo è estremamente frazionata e irregolare, a differenza di quella nei mezzi porosi, la scelta dei piezometri rappresentativi è decisiva ai fini dei risultati del monitoraggio e della possibilità di estendere i risultati all’intero corpo idrico.

In particolare, i pozzi e piezometri rappresentativi devono essere attestati nella falda di base dell’acquifero, escludendo l’acquifero locale epicarsico (Klimchouk, 2004) e non devono essere influenzati da emungimenti nelle aree limitrofe (ovvero il pozzo non deve essere compreso nel raggio di influenza di perforazioni in emungimento).

Il numero di pozzi con caratteristiche tali da rientrare nelle reti di monitoraggio nei sistemi fratturati e carsici è generalmente molto basso.

12.1 Monitoraggio dello stato quantitativo tramite i deflussi

Il monitoraggio quantitativo degli acquiferi nei sistemi fessurati e carsici e degli acquiferi cristallini può essere effettuato tramite lo studio delle condizioni al contorno, e in particolare tramite la misura dei deflussi in uscita dalle unità di bilancio e tramite l’analisi di bilancio idrologico (vedi ad es. Preziosi & Romano, 2009).

In questo caso i deflussi totali attuali saranno confrontati con quelli relativi a un periodo di riferimento, in analogia a quanto descritto in precedenza per l’analisi dei livelli.

La metodologia IARI è stata sviluppata da ISPRA (2011) a partire dal metodo IHA (Indicators of Hydrologic Alteration, Richter *et al.*, 1996; Richter *et al.*, 1998¹²).

Il metodo è basato sul confronto tra le condizioni idrologiche di un corso d’acqua (o di una sorgente localizzata) prima e dopo l’impatto di una determinata pressione che causa un’alterazione idrologica.

La porzione di territorio a cui l’analisi si riferisce è quella sottesa dalla sezione di misura dei deflussi nel caso di un fiume o dall’area di alimentazione idrogeologica nel caso di una sorgente localizzata. Pertanto, nel caso dell’utilizzo dei dati di portata, deve essere chiara l’area idrogeologica sottesa dalla sezione di misura in quanto ad essa saranno riferiti i risultati.

¹¹ <http://www.isprambiente.gov.it/contentfiles/00010100/10147-analisi-e-valutazione-degli-aspetti-idromorfologici-agosto-2011.pdf/view>

¹² <http://conserveonline.org/workspaces/iha>

Nel metodo IARI le condizioni idrologiche “pre-impatto” sono le “*condizioni naturali di riferimento*” con cui si confrontano le condizioni idrologiche attuali, o post-impatto, in analogia a quanto evidenziato per l’indicatore ‘Livello piezometrico H’ visto al capitolo 11.

Le condizioni idrologiche di riferimento devono essere definite a partire da una serie storica di dati dei deflussi che si possa considerare “naturale”. Le portate sono quelle giornaliere registrate presso una data sezione fluviale o una data sorgente (come detto, in questo caso l’analisi fa riferimento al serbatoio idrogeologico che alimenta la sorgente e ai corpi idrici sotterranei in esso compresi).

Si tralascia in questa sede il tema relativo alla trasformazione dei dati di livello idrometrico di una sezione fluviale attrezzata, che rappresentano i dati grezzi registrati, con quelli di portata che dai primi vengono desunti tramite le opportune metodologie (WMO, 2010).

Per l’applicazione della metodologia IARI, la serie storica dei dati di portata di riferimento deve essere pari ad almeno 20 anni di registrazioni giornaliere continue (Huh *et al.*, 2005). Le condizioni attuali sono rappresentate invece dalle registrazioni di portata dell’anno più recente (o post-impatto), oppure da una serie di dati, pari ai cinque anni successivi all’impatto sul corpo idrico. Pertanto, l’indice di alterazione e le considerazioni sullo stato quantitativo delle acque sotterranee sono riferite o al singolo anno o al quinquennio più recente successivo ad un dato impatto. La scelta del periodo post impatto da considerare dipende dalla disponibilità dei dati.

La metodologia IARI, a cui si rimanda per i dettagli metodologici, fornisce i criteri per la stima delle condizioni di riferimento anche in assenza di dati o con serie storiche incomplete, ad esempio in caso di serie di dati inferiori ai 20 anni di registrazioni.

La metodologia consiste nella implementazione delle seguenti due fasi:

1. Analisi storica per individuare la serie dei dati di portata da usare come “*riferimento*” delle condizioni non alterate dello stato quantitativo (ad esempio il periodo precedente la costruzione di impianti di derivazione o di captazione delle acque, derivazioni, sbarramenti, ecc.); sulla base di questa analisi possono essere identificate:
 - (1) Nessuna pressione (o pressioni trascurabili);
 - (2) Pressioni significative.

Nel caso di pressioni trascurabili il periodo di riferimento è quello relativo ai 20 anni precedenti il periodo per i quali si intende valutare lo stato quantitativo; nel caso siano presenti pressioni, il periodo di riferimento deve essere precedente al loro insorgere.

2. Valutazione dell’alterazione idrologica tramite l’applicazione della metodologia IARI per il calcolo dell’indice di alterazione idrologica.

L'applicazione del metodo IARI fornisce il calcolo dei 33 indicatori idrologici mostrati in Tabella 6.

Tabella 6 – *Elenco dei 33 Indicatori idrologici IHA*

INDICATORI DELL'ALTERAZIONE IDROLOGICA (Richter *et al.*, 1996)

- 1-12 – *Magnitude of monthly discharge*
- 13 – *Annual minima, 1-day mean*
- 14 – *Annual minima, 3-day means*
- 15 – *Annual minima, 7-day means*
- 16 – *Annual minima, 30-day means*
- 17 – *Annual minima, 90-day means*
- 18 – *Number of zero-flow days*
- 19 – *Base flow index: 7-day minimum flow/mean flow for year*
- 20 – *Annual maxima, 1-day mean*
- 21 – *Annual maxima, 3-day means*
- 22 – *Annual maxima, 7-day means*
- 23 – *Annual maxima, 30-day means*
- 24 – *Annual maxima, 90-day means*
- 25 – *Qp2: 2 year return period peak discharge*
- 26 – *Qp10: 10 year return period peak discharge*
- 27 – *Julian date of each annual 1-day maximum*
- 28 – *Julian date of each annual 1-day minimum*
- 29 – *Number of low pulses within each water year*
- 30 – *Number of high pulses within each water year*
- 31 – *Rise rates: mean or median of all positive differences between consecutive daily values*
- 32 – *Fall rates: mean or median of all negative differences between consecutive daily values*
- 33 – *Number of hydrologic reversals*

Il calcolo degli indicatori e i grafici mostrati nel testo sono stati effettuati tramite il software IHA™ disponibile nel sito web *Conservation Gateway*¹³ (Figura 22).

13

<https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/IHA-Software-Download.aspx>



Figura 22 - Il portale Conservation Gateway

Per ciascuno dei 33 indicatori di Tabella 6, il software di calcolo IHATM elabora i valori del 25° e del 75° percentile dei valori mensili medi delle condizioni di riferimento (su almeno 20 anni di registrazioni di portata “pre-impatto”), e la mediana degli analoghi valori per il periodo più recente, post-impatto, della durata di 5 anni (oppure di un singolo anno).

La valutazione dell’alterazione idrologica delle portate con il metodo IARI consiste pertanto nel calcolo del 25° (Q₁) e del 75° percentile (Q₃) della portata mensile media delle condizioni di riferimento. Queste definiscono il *range* di fluttuazione naturale dei deflussi in uscita dal sistema (Figura 23).

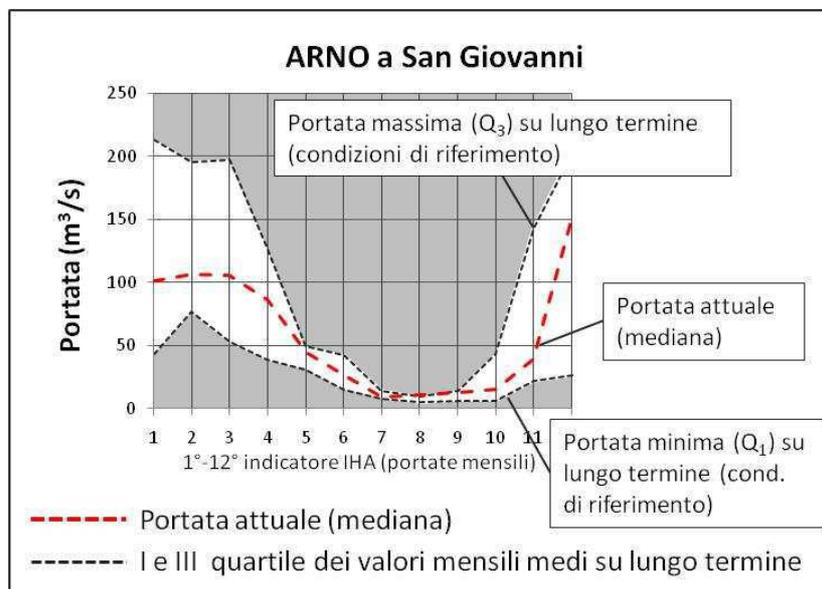


Figura 23 - Fiume Arno a San Giovanni; Indicatori IARI (dati reali: Annali Idrologici SIMN e Regione Toscana)

Il confronto tra la mediana delle portate mensili degli ultimi 5 anni (“Portata attuale mediana”) o dell’ultimo anno, rappresentata in tratteggio in Figura 23, rispetto al *range* di oscillazione delle condizioni di riferimento (primo e terzo quartile, Q₁ e Q₃), fornisce la stima dell’alterazione idrologica.

La Figura 23 mostra l’analisi dei deflussi del Fiume Arno a San Giovanni (il grafico riporta i primi 12 indicatori idrologici di Tabella 6). Il confronto è stato fatto tra il periodo di riferimento

1960-1976 e il periodo più recente 2005-2010. Come si vede, il grafico non evidenzia criticità dello stato quantitativo per il bacino idrogeologico sotteso dalla sezione in esame. La portata attuale, in tratteggio, è infatti compresa all'interno del *range* di naturale fluttuazione mensile.

Come risultato di questa analisi, analogamente all'analisi dei livelli piezometrici, il confronto tra la condizione idrologica di riferimento e la condizione attuale permette di rilevare le condizioni di 'attenzione' dello stato quantitativo del corpo idrico sotterraneo.

In Figura 24 si riporta l'elaborazione dei 33 indicatori IARI fatta per il fiume Adda alla stazione idrometrica di Lavello, posta a quota 197 m s.l.m., che sottende un bacino idrografico di 4.572 Km².

L'analisi preliminare della serie storica completa delle portate, dal 1950 al 2006, ha suggerito di confrontare il periodo più recente 2002-2006 (5 anni) con la serie di riferimento 1952-1971 (20 anni), relativa a condizioni non disturbate dalle recenti opere di captazione e di derivazione delle acque sia superficiali sia sotterranee.

Il risultato della elaborazione mostra il *range* di fluttuazione degli indicatori nel periodo storico e la mediana di questi per il periodo attuale 2002-2006, in tratteggio nero.

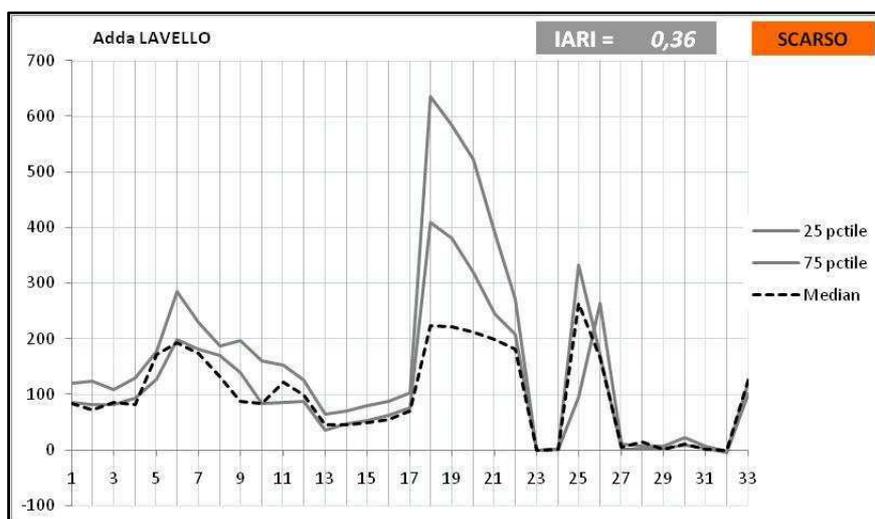


Figura 24 - Adda a Lavello. Indicatori IARI

I primi 12 indicatori rappresentano l'idrogramma dei valori mensili medi di portata, da gennaio a dicembre. Ai fini della valutazione dello stato quantitativo è, infatti, di interesse il solo grafico relativo ai primi 12 indicatori IHA, riportato in Figura 25, corrispondenti ai valori mensili medi da gennaio a dicembre dell'anno medio di riferimento e del periodo più recente di 5 anni.

Il periodo di riferimento è rappresentato dalla fascia di naturale fluttuazione dei livelli mensili medi (25° e 75° percentile). Il periodo più recente 2002-2006 è rappresentato dal valore mediano (linea tratteggiata nera).

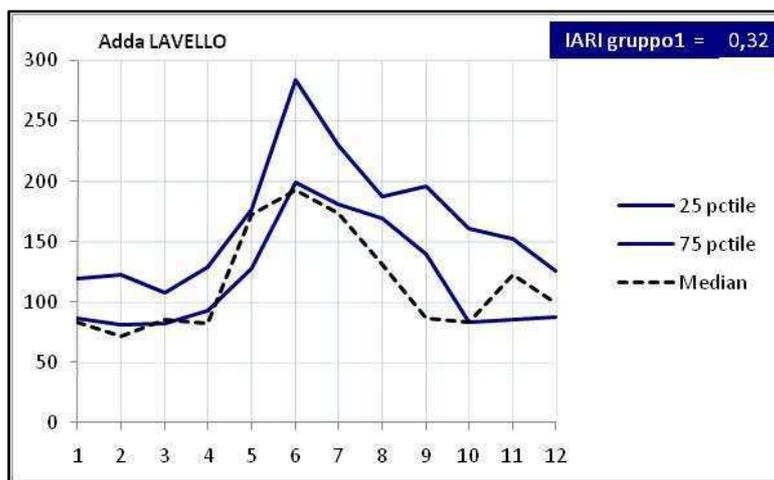


Figura 25 - Adda a Lavello. Idrogramma mensile medio dei primi 12 indicatori IHA

Dal confronto tra la fascia di oscillazione naturale del periodo di riferimento con la mediana delle portate attuali, si nota come i valori estivi di portata (luglio, agosto, settembre) siano al di sotto di quelli minimi delle condizioni “normali”. Quest’alterazione idrologica rispetto alle condizioni di riferimento naturali pone il corpo idrico sotteso dalla sezione di misura delle portate in una condizione di ‘attenzione’ dello stato quantitativo. In tale circostanza possono essere presi in considerazione sia ulteriori approfondimenti sulle pressioni che provocano il depauperamento delle risorse sia l’eventuale adattamento del programma di monitoraggio per il controllo del fenomeno.

Un altro esempio di elaborazione dei deflussi con la metodologia IARI è riferito al Fiume Belice in Sicilia, presso l’omonima stazione alla quota di 58 m s.l.m, con bacino sotteso di 807 Km².

Il confronto tra i deflussi di riferimento e quelli attuali è stato effettuato per i periodi 1963-1980 (scelta condizionata dalla mancanza di dati continui) e 1983-1994 (5 anni totali, a causa della frammentarietà dei dati).

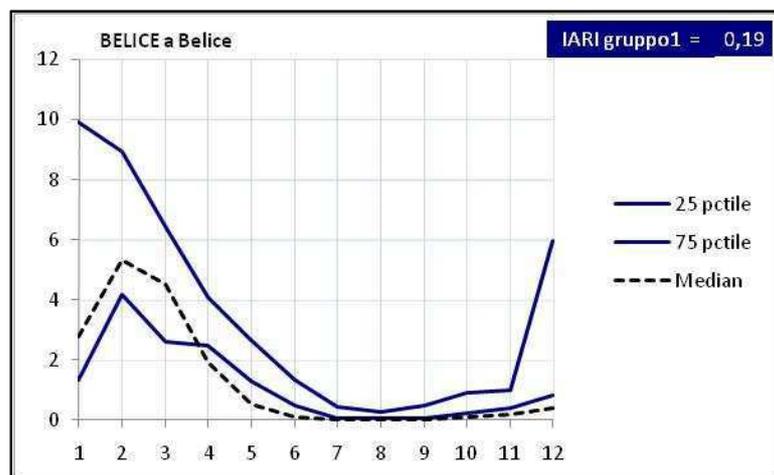


Figura 26 - Fiume Belice. Idrogramma mensile medio dei primi 12 indicatori IHA

Dall’idrogramma di Figura 26 si vede come, rispetto al periodo di riferimento 1963-1980, la portata nel periodo estivo più recente si esaurisca, determinando condizioni idrologiche di intermittenza. Si è passati cioè da un regime idrologico perenne ad un regime intermittente a causa delle pressioni sul bacino idrogeologico sotteso (Bussetini *et al.*, 2014).

Anche in questo caso l’esame dei deflussi porta ad evidenziare una condizione di ‘attenzione’ dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei sottesi dalla sezione fluviale in esame.

SEZIONE 3 - ALLEGATI

ALLEGATO I – Inquadramento normativo

La normativa cui si fa riferimento in questo documento riguarda le disposizioni europee e nazionali in materia di gestione e monitoraggio delle risorse idriche, sia superficiali sia sotterranee:

Direttiva Europea 2000/60/CE, (WFD), riguardante il quadro delle azioni comunitarie in materia di acque superficiali e sotterranee; (recepita dal D. Lgs. 152/2006)

La Direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE ha lo scopo di armonizzare gli interventi degli stati membri sulle politiche di gestione delle acque superficiali e sotterranee, nonché di definire criteri, principi e metodi comuni per la gestione dei piani di bacino.

Lo scopo di base è, in particolare, quello di monitorare e migliorare lo stato delle acque, sia per garantirne un utilizzo sostenibile da parte dell'uomo sia per assicurare il buono stato degli ecosistemi superficiali (fiumi, laghi, aree umide) connessi ai corpi idrici sotterranei.

La Direttiva ha posto l'obiettivo del raggiungimento del buono stato delle acque superficiali e sotterranee entro il 22.12.2015. Entro tale data ogni stato membro dovrà aver individuato e cartografato i corpi idrici superficiali e sotterranei, caratterizzato i bacini e i distretti idrografici, censito le pressioni e gli impatti sui bacini, predisposto reti e piani di monitoraggio delle acque per definirne lo stato (qualitativo e quantitativo).

Decreto Ministeriale del 28 luglio 2004 (linee guida per il calcolo del bilancio idrico)

Linee guida per la predisposizione del bilancio idrico alla scala di bacino, comprensive dei criteri per il censimento delle utilizzazioni in atto e per la definizione del minimo deflusso vitale, di cui agli articoli 95 e 96 del D.Lgs 152/06.

Direttiva Europea 2006/118/CE (GWD), riguardante la protezione qualitativa delle acque sotterranee (recepita dal D. Lgs. 30/09).

La Direttiva quadro sulle acque sotterranee 2006/118/CE, figlia della Direttiva quadro 2000/60/CE, istituisce misure specifiche per prevenire l'inquinamento e il deterioramento delle acque sotterranee. Essa ha come obiettivo quello del raggiungimento del buono stato qualitativo dei corpi idrici sotterranei, di definire *standard* di qualità e valori soglia delle sostanze inquinanti nelle acque e di definire inoltre i programmi di monitoraggio.

Decreto Legislativo 152/06 (Testo unico ambientale)

Il D. L. 152/06 prevede, tra le altre cose, che le Autorità di bacino competenti definiscano il bilancio idrico (dei corpi idrici, o gruppi di corpi idrici o acquiferi), per la verifica dell'equilibrio tra le risorse idriche disponibili nel territorio e i fabbisogni idrici.

Decreto Legislativo 30/09 (recepimento e attuazione della Direttiva Europea n. 2006/118/CE sulla protezione delle acque sotterranee)

Il D. Lgs. 30/09, riportando il punto 2 dell'Allegato V della Direttiva Quadro sulle Acque (European Commission, 2000), stabilisce che il buono stato quantitativo è raggiunto quando (Allegato 3, parte B – Stato quantitativo) il livello o la portata delle acque nel corpo sotterraneo è tale che la media annua dell'estrazione a lungo termine non esaurisca le risorse idriche sotterranee disponibili.

Ne consegue che il livello delle acque sotterranee non subisce alterazioni antropiche tali da:

- (i) impedire il conseguimento degli obiettivi ecologici per le acque superficiali connesse (*nota: occorre quindi individuare con criteri idrogeologici le acque superficiali connesse a ciascun corpo idrico sotterraneo; v. Par. 10.1 e 10.2*),

-
- (ii) comportare il deterioramento della qualità (chimico-fisica) delle acque;
 - (iii) danneggiare gli ecosistemi terrestri dipendenti dal corpo idrico sotterraneo;
 - (iv) causare fenomeni di intrusione salina e di altro tipo nelle acque dolci.

Da tali definizioni, in accordo con la Direttiva Quadro Acque, si stabilisce lo stretto legame tra le pressioni su un corpo idrico sotterraneo (i prelievi) e le dirette conseguenze sia su quest'ultimo, a causa di un depauperamento delle risorse idriche quando i prelievi sono superiori in volume a queste, sia sui corpi idrici superficiali connessi a quello sotterraneo che subiscono un degrado qualitativo ed ecologico.

In entrambi i casi, ovvero sia nel caso di (i) prelievi superiori alle risorse disponibili sia nel caso di (ii) danni alle acque superficiali a causa di riduzione dei livelli piezometrici (anche quando le risorse siano superiori ai prelievi), il corpo idrico sotterraneo è definito, ai sensi della normativa, in stato quantitativo scarso.

In aggiunta, si considera in stato scarso, indipendentemente dal bilancio idrico ricarica/prelievi, il corpo idrico la cui variazione antropica dei livelli di falda e le variazioni indotte nel deflusso sotterraneo delle acque, provocano fenomeni di intrusione salina o di altro tipo, come nel caso di contaminazioni da livelli acquiferi profondi e a differente chimismo rispetto a quelli superficiali indotti dal pompaggio.

Individuazione degli acquiferi:

Il Decreto 30/09 indica i criteri per poter identificare gli acquiferi partendo dai complessi idrogeologici. Viene definito l'acquifero come *“uno o più strati sotterranei di roccia o altri strati geologici di permeabilità sufficiente da consentire un flusso significativo di acque sotterranee o l'estrazione di quantità significative di acque sotterranee”*. Con quantità significative di acqua sotterranea si intende la possibilità di prelevare almeno 10 m³/giorno (corrispondente ad una portata media di 0,11 l/s), ovvero con un flusso di acqua sotterranea prelevabile sufficiente per 50 persone (Articolo 1, Comma 1 e Allegato 1).

In definitiva, gli acquiferi di limitata entità o caratterizzati da condizioni locali di circolazione delle acque (acquiferi superficiali, orizzonti di circolazione locale) non sono considerati rilevanti e sono esclusi dalla valutazione di stato.

Modello concettuale delle acque sotterranee

Il Decreto prevede una fase conoscitiva in cui si deve ricostruire il *“modello idrogeologico”* a scala di corpo idrico, con *“particolare riferimento ai rapporti di eventuale intercomunicazione tra i diversi acquiferi e tra le acque superficiali e le acque sotterranee”*.

È prevista pertanto la ricostruzione della geometria dei principali acquiferi o corpi idrici, delle relazioni tra corpi idrici superficiali e sotterranei, per giungere alla definizione di un modello concettuale, rappresentato da *“una schematizzazione idrogeologica semplificata del sottosuolo e una prima parametrizzazione degli acquiferi”*.

Tale modello risulta di rilevante importanza ai fini della istituzione di un programma di monitoraggio economicamente efficace e in grado di fornire risultati attendibili circa l'intero stato di salute quantitativa del corpo idrico sotterraneo (o gruppo di corpi idrici o acquifero). Viene precisato, inoltre, che devono essere descritte le proprietà fisiche di base degli acquiferi, quali i meccanismi di ricarica della falda sotterranea e i rapporti con le acque superficiali. Con il termine *“meccanismi di ricarica”* si intende in effetti la definizione quantitativa dei tre parametri di base per la descrizione di un acquifero: (i) **area di ricarica** (ovvero la superficie del territorio sulla quale precipitano le acque meteoriche che andranno ad alimentare, attraverso i percorsi sotterranei, la falda acquifera), (ii) **limiti di permeabilità** che definiscono i confini dell'acquifero; (iii) **punti di recapito delle acque**, ovvero le sorgenti puntuali e quelle lineari rappresentate dai fiumi che drenano le strutture idrogeologiche (idrostrutture). Questi tre elementi e la loro rappresentazione su carta, ad un dettaglio adeguato o almeno alla scala di 1:100.000, come prevede la normativa, rappresentano la prima definizione del 'modello concettuale dell'acquifero *ex lege*.

In sintesi, la norma prevede che gli enti preposti definiscano su base geologica il modello idrogeologico dei corpi idrici sotterranei, con particolare attenzione alla individuazione delle interazioni tra i corpi idrici sotterranei e superficiali.

Decreto Ministeriale n. 260/10 (criteri tecnici per la classificazione dello stato dei corpi idrici)

Il Decreto N. 260/10 pubblica alcuni allegati già riportati nel Decreto 30/09, confermando in sostanza quanto già riportato in precedenza sul calcolo dello stato quantitativo delle acque sotterranee.

ALLEGATO II – Bilancio idrico

13. CALCOLO DEL BILANCIO IDRICO

Il presente Allegato riporta un esempio di calcolo del bilancio idrico, parte integrante del relativo test di analisi dello stato quantitativo. Le metodologie per il calcolo degli indicatori idrologici (Ricarica dell'acquifero, Risorse sotterranee disponibili, Evapotraspirazione reale, ecc) sono varie e dipendono, oltre che dalla tipologia di acquifero e dai dati di base a disposizione, dalla scelta degli esperti.

La valutazione dello stato quantitativo dell'acquifero sulla base del bilancio risorse/prelievi si sviluppa attraverso tre fasi proposte di seguito descritte (v. Par. 6.3):

1. Calcolo delle risorse idriche disponibili (**AGR**)
($AGR = \text{Ricarica dell'acquifero } LTAAR^{14} - \text{Environmental Flow Needs } EFN$);
2. Calcolo dei prelievi (**LTAAQ**¹⁵);
3. Bilancio prelievi/ricarica;

13.1 FASE 1 – calcolo della ricarica media dell'acquifero

La prima fase della valutazione dello stato quantitativo consiste nel calcolo della ricarica *annua media*¹⁶ dell'acquifero (o del corpo idrico se coincidente con l'acquifero) su lungo termine, pari ad almeno 6 anni di registrazioni (European Commission, 2009).

Questo consente di ottenere il valore di riferimento dei volumi idrici che alimentano l'acquifero, corrispondenti ai volumi teorici estraibili dal serbatoio sotterraneo.

Ai volumi teorici della ricarica vanno successivamente sottratti quelli necessari al mantenimento del buono stato ecologico dei sistemi idrici superficiali connessi, identificabili secondo la normativa nazionale con i volumi di Deflusso minimo vitale (*D.M. 28 Luglio 2004*) ed indicati nei documenti europei dei gruppi di lavoro sulla WFD con il termine *Environmental Flow Needs* (EFN).

La differenza tra volumi di ricarica e i volumi di EFN rappresenta i quantitativi effettivamente estraibili dai sistemi idrogeologici, senza compromissione del loro naturale equilibrio idrodinamico, idrochimico e idrobiologico.

Il volume della ricarica dell'acquifero si ricava dalla *Infiltrazione efficace* (Ie) di ciascun acquifero o corpo idrico, e si calcola dalla equazione generale del bilancio:

$$Ie = P - (ET + R) \pm \Delta V$$

in cui:

- Ie = Volume annuo medio di Infiltrazione efficace (volumi idrici, m³/anno);
P = Volume annuo medio di afflusso meteorico (Precipitazioni, m³/anno);

¹⁴ LTAAR Long Term Annual Average groundwater Recharge (CIS Guidance Document No. 18);

¹⁵ LTAAQ: Long Term Annual Average groundwater abstraction (CIS Guidance Document No. 18);

¹⁶ Si fa riferimento a un valore **“annuo medio”** per indicare il valore di un indicatore idrologico (es. la ricarica dell'acquifero) ottenuto dalla media su più anni di misure, ad esempio 20 nel caso del volume della ricarica di acque sotterranee; mentre si fa riferimento al valore **“medio annuo”** per indicare invece il dato relativo ad un singolo anno, ottenuto come media dei valori mensili o giornalieri, come ad esempio i prelievi idrici riferiti ad un dato anno ottenuti dalla media dei volumi mensili.

ET = Volume annuo medio di Evapotraspirazione reale (m³/anno);
R = Volume annuo medio di Ruscellamento (Deflusso superficiale) in uscita dal sistema idrogeologico (acquifero o corpo idrico) (m³/anno);
ΔV = differenza tra i volumi in ingresso o in uscita dalla unità di bilancio nel periodo di riferimento.

Tutti i valori sono espressi in volumi idrici annui: m³/anno o in milioni di m³/anno.

La ricarica dell'acquifero è uno degli indicatori fondamentali per l'analisi delle risorse idriche. Nella terminologia diffusa a livello comunitario esso corrisponde alla "Recharge into the Aquifer" mostrato ad esempio nell'estratto delle tabelle OCSE/Eurostat del bilancio idrico dei paesi dell'Unione Europea di Tabella 7.

La Ricarica degli acquiferi è così definita: "Total volume of water added from outside to the zone of saturation of an aquifer" (OCSE/Eurostat, 2008).

La "Ricarica disponibile per i prelievi" è invece così definita:

"Recharge [into the aquifer] less the long-term [20 anni] annual average rate of flow required to achieve ecological quality objectives for associated surface water. It takes account of the ecological restrictions imposed to groundwater exploitability, nevertheless other restrictions based on economic and technical criteria could also be taken into account in terms of accessibility, productivity and maximum production cost deemed acceptable by developers. The theoretical maximum of groundwater available is the recharge" (OCSE/Eurostat, 2008).

Tabella 7 - Tabella degli indicatori idrologici (fonte Eurostat, 2008¹⁷)

INLAND WATERS	TABLE 1: Fresh water resources (a)		
Territory: _____	Contact: _____		
(10 ⁶ m ³)	Definition DCM page	Decision tree DCM page	Best practices DCM page
Precipitation (1)	30	34	35
Actual evapotranspiration (2)	30	34	35
Internal Flow (b) (3)	30	34	35
Actual external inflow (4)	30	34	35
Total actual outflow (5)	31	34	35
of which: into the sea (6)	31	34	35
of which: into neighbouring territories (7)	31	34	35
TOTAL FRESH WATER RESOURCES (8) [(3)+(4)]	31	34	35
Recharge into the Aquifer (9)	31	34	36
Groundwater available for annual abstraction (c) (10)	32	34	37
Fresh water resources 95 per cent time (11)	32	34	37

Nei successivi paragrafi viene mostrata una metodologia non vincolante per il calcolo dei parametri di base del bilancio idrico.

¹⁷ http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/coded_files/OECD_ESTAT_JQ_Manual_version_2_21.pdf

13.1.1 Calcolo indiretto della Infiltrazione efficace

Il volume [$P - (ET + R)$] della equazione generale di bilancio corrisponde alla precipitazione efficace ed equivale al deflusso idrico globale presunto D_p (v. Celico, 1988). Si tratta di un volume *presunto* in quanto ricavato indirettamente a partire dagli afflussi meteorici e non dalle misure dirette di portata di fiumi e sorgenti.

Da questo volume di deflusso totale presunto è possibile ricavare il volume di *Infiltrazione efficace* (anch'essa *presunta*) tramite il coefficiente di infiltrazione potenziale (c.i.p.) (Celico, 1988).

Tale coefficiente, definito per le differenti tipologie di acquifero, consente di ricavare indirettamente la percentuale di acqua che si infila nel sottosuolo (Tabella 8) rispetto al volume di acqua di precipitazione efficace [$P - (ET + R)$]:

$$c.i.p. = \frac{Ie}{Dp} \times 100$$

Tabella 8 - Coefficiente di infiltrazione potenziale (da: Celico, 1988)

COMPLESSI IDROGEOLOGICI	C.I.P. %DP	COMPLESSI IDROGEOLOGICI	C.I.P. %DP
calcari	90 ÷ 100	lave	90 ÷ 100
calcari dolomitici	70 ÷ 90	depositi piroclastici	50 ÷ 70
dolomie	50 ÷ 70	piroclastiti e lave	70 ÷ 90
calcari marnosi	30 ÷ 50	rocce intrusive	15 ÷ 35
detriti grossolani	80 ÷ 90	rocce metamorfiche	5 ÷ 20
depositi alluvionali	80 ÷ 100	sabbie	80 ÷ 90
depositi argilloso-marnoso -arenacei	5 ÷ 25	sabbie argillose	30 ÷ 50

13.1.2 Calcolo diretto della Infiltrazione efficace

La conoscenza diretta dei valori di portata in uscita dai sistemi idrogeologici e la scomposizione del deflusso totale nelle componenti infiltrazione efficace e ruscellamento, effettuata tramite le metodologie più opportune, permette invece il calcolo diretto della ricarica dell'acquifero.

Tra le metodologie di scomposizione Infiltrazione/ruscellamento si suggerisce, ad esempio, quella basata sul calcolo delle "portate mensili caratteristiche" (Boni *et al.*, 1993b) effettuato a partire dall'idrogramma mensile medio su lungo periodo (su almeno 20 anni di registrazioni): la metodologia è illustrata in sintesi nel paragrafo seguente.

13.1.3 Scomposizione dell'idrogramma in flusso di base e ruscellamento

Dall'idrogramma mensile medio riferito alle portate giornaliere di una data sezione fluviale, di cui si disponga di una serie storica di almeno 20 anni, vengono calcolate le seguenti quattro portate mensili caratteristiche (Boni *et al.* 1993b¹⁸):

1. Linea 1 - media delle portate mensili
2. Linea 2 - media delle portate giornaliere minime (portata di magra ordinaria);
3. Linea 3 - minima delle portate mensili;
4. Linea 4 - minima delle portate giornaliere;

¹⁸ <http://www.idrogeologiaquantitativa.it/wordpress/?p=549&lang=it;>
<http://www.idrogeologiaquantitativa.it/wordpress/?p=545&lang=it>

I quattro valori mensili caratteristici permettono di ottenere l'idrogramma rappresentato in Figura 27, nel quale vengono individuate le componenti in volume del deflusso totale del corso d'acqua:

A. Ruscellamento;

B. Ruscellamento + Flusso di base: rappresenta un “**campo indeterminato**” di volumi idrici che non possono essere riferibili con certezza al flusso di base o al ruscellamento. Questi volumi vengono di volta in volta assegnati al flusso di base nei periodi aridi, nei mesi privi di precipitazioni, o al ruscellamento, nei periodi umidi in presenza di precipitazioni meteoriche;

C. Flusso di base, rappresenta i contributi in acque sotterranee alla portata del fiume;

D. Flusso di base minimo: rappresenta il flusso di base annuo minimo registrato nella serie storica, e definisce quindi le più severe condizioni di magra a cui il bacino idrogeologico è soggetto. Esso rappresenta le risorse idriche disponibili in una valutazione più cautelativa dei volumi disponibili per i prelievi.

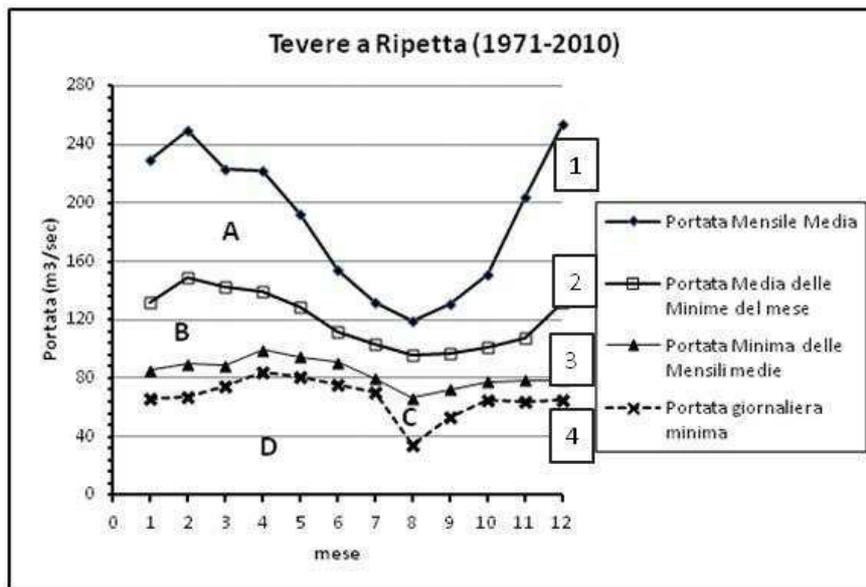


Figura 27 - Portate mensili caratteristiche del Tevere a Roma (dati: Annali idrologici SIMN e Regione Lazio)

Come sopra sottolineato, la condizione necessaria per l'applicazione del metodo è di disporre di almeno 20 anni di registrazioni giornaliere della portata in uscita dal sistema idrologico.

13.1.4 Risultato della fase 1

Il risultato della fase 1 è rappresentato dalla carta dei corpi idrici sotterranei in cui si riporta il valore medio (valore annuo medio su lungo periodo) della ricarica naturale espressa in $10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, desunta dal valore della infiltrazione efficace calcolata dal bilancio idrologico.

Un esempio di tale cartografia è riportato in Figura 28 (da Benedikt Toussaint: “*German experience in assessment of groundwater quantitative status*”¹⁹).

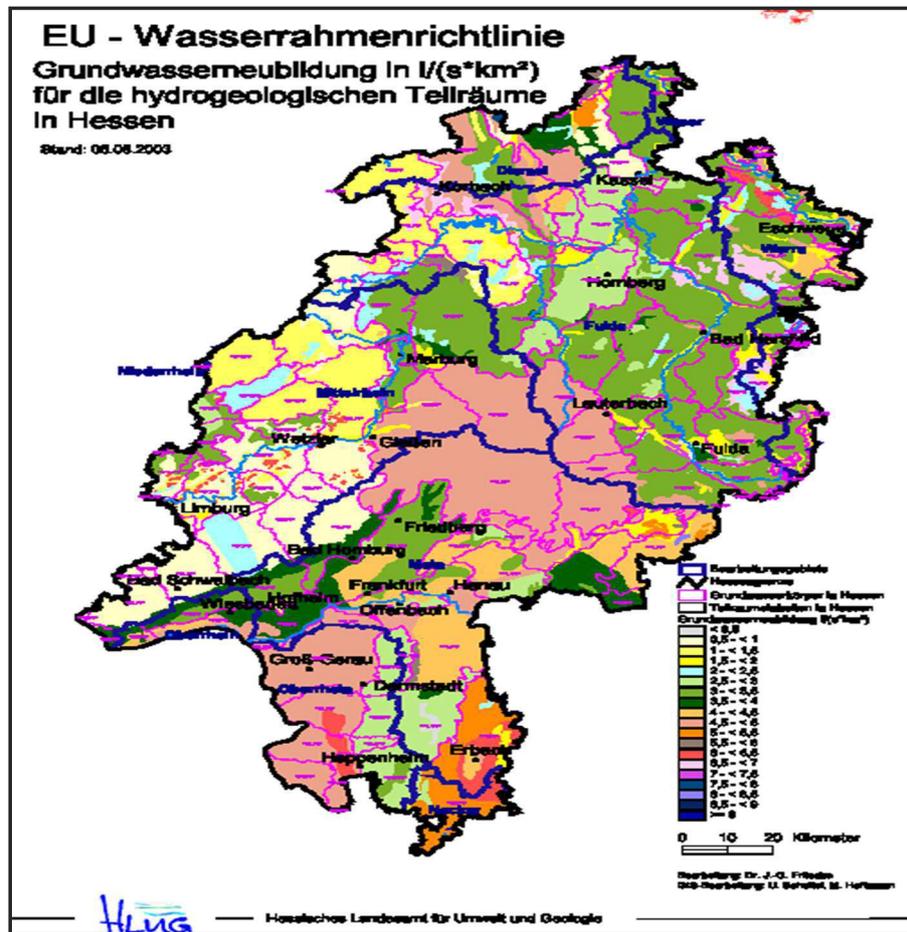


Figura 28 - Carta dei volumi di Infiltrazione efficace per Corpo idrico sotterraneo (fonte: Eionet²⁰)

¹⁹ http://nfp-si.eionet.europa.eu:8980/Public/irc/eionet-circle/javna/library?l=/starej_e/9-10ix_groundwater/circumstancesppt/EN_1.0_&a=d.

²⁰ <http://nfp-si.eionet.europa.eu:8980/Public/irc/eionet-circle/javna>

13.2 FASE 2 – calcolo dei prelievi idrici

La successiva fase nella definizione dello stato quantitativo è rappresentata dal calcolo dei prelievi per i vari usi.

I prelievi idrici vengono desunti dalle banche dati delle autorità competenti e devono fare riferimento a ciascun corpo idrico o acquifero considerato, per il quale sia stato calcolato anche il valore di Infiltrazione efficace.

Il dato relativo ai volumi estratti per corpo idrico fa riferimento all'anno per il quale si intende valutare lo stato quantitativo. Questo volume annuo sarà confrontato con il valore delle risorse idriche disponibili come mostrato nella successiva Fase 3.

In caso di indisponibilità o frammentarietà dei dati, il metodo prevede la stima dei prelievi sulla base delle concessioni rilasciate dalle autorità competenti.

In questo caso si suppone che il valore stimato (ricavato dalle concessioni rilasciate) sia il valore massimo estraibile dal corpo idrico/acquifero in esame, e rappresenta pertanto la situazione più critica di sfruttamento delle risorse.

L'ipotesi che viene fatta, in mancanza di ulteriori informazioni, è che il volume totale dei prelievi effettivi e non conosciuto, sia inferiore o uguale a quello delle concessioni rilasciate.

Si sottolinea che il volume annuo dei prelievi o delle concessioni deve essere riferibile al corpo idrico o acquifero per il quale si intende calcolare/stimare lo stato quantitativo.

13.2.1 Risultato della fase 2

In analogia con la carta della Infiltrazione efficace per Corpo idrico, il risultato della Fase 2 è rappresentato dalla carta dei volumi idrici annui dei prelievi / concessioni (in funzione dei dati disponibili) per corpo idrico o acquifero, in $10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$, relativi all'anno per il quale viene riferita la valutazione dello stato quantitativo.

13.3 FASE 3 – Bilancio tra risorse disponibili e prelievi

La Fase 3 è quella in cui si effettua il bilancio tra le entrate (risorse disponibili) e le uscite (prelievi) dal corpo idrico o dall'acquifero in studio.

Lo stato quantitativo viene definito come il rapporto in volume tra il totale annuo dei prelievi (**LTAAQ**) o delle concessioni relative al periodo annuo medio e le risorse idriche disponibili nell'area in esame (**AGR**) per lo stesso periodo di lungo termine, pari almeno a 6 anni di registrazioni o, in accordo con la definizione internazionale di *Long term annual average*, 20 (Figura 29):

dove:

LTAAQ = *Long Term Annual Average Abstraction*; Prelievi idrici per uso potabile, agricolo, industriale;

AGR = *Available Groundwater Resources*, pari alla Ricarica dell'acquifero (LTAAR) meno i contributi di acque sotterranee (EFN) necessari al buono stato ecologico e chimico-fisico dei corpi idrici ed ecosistemi superficiali.

Le risorse idriche sotterranee disponibili sono identificate con i volumi idrici di infiltrazione efficace **I_e**, desumibili dai termini dell'equazione di bilancio, come mostrato in precedenza al Par. 13:

$$I_e = P - (ET + R) \pm \Delta V$$

In base alla definizione di stato quantitativo riportata al Cap. 5, il “buono” stato quantitativo è quello in cui:

$$I_e \text{ (m}^3\text{/anno)} - \text{EFN (m}^3\text{/anno)} > \text{LTAAQ (m}^3\text{/anno)}$$

$$[I_e - \text{EFN} = P - E_T - R - (Q_{\text{out}} + Q_{\text{in}}) > \text{Prelievi}]$$

	$\frac{\text{LTAAQ}}{\text{AGR}} < 1$	BUONO
	$\frac{\text{LTAAQ}}{\text{AGR}} \geq 1$	SCARSO

Figura 29 - Stato quantitativo buono e scarso

13.3.1 Risultato della fase 3

In analogia con le carte di Infiltrazione efficace e dei prelievi per Corpo idrico sotterraneo, il risultato della Fase 3 è rappresentato dalla carta dello stato quantitativo per corpo idrico o acquifero, espresso come rapporto percentuale tra i prelievi e le risorse disponibili riferite all'anno medio su lungo termine.

13.4 Corpi idrici a rischio o in stato quantitativo scarso

Le informazioni sui corpi idrici desunte dalle analisi di bilancio sono informazioni di tipo quantitativo. Esse forniscono (sebbene con l'approssimazione propria dei metodi di calcolo impiegati) i valori dei volumi idrici prelevati e i valori di quelli disponibili in base alla potenzialità dei sistemi idrogeologici.

Esse sono pertanto informazioni essenziali a supporto delle analisi delle pressioni e degli impatti, per la pianificazione alla scala di bacino e per la programmazione delle misure necessarie al ripristino del buono stato quantitativo dei corpi idrici, tramite ad esempio la revisione o regolazione dei prelievi e delle concessioni.

Nel caso di corpo idrico classificato in *scarso* stato quantitativo a seguito dell'analisi di bilancio ricarica/prelievi, il programma di monitoraggio potrà essere implementato relativamente sia alla scala spaziale sia a quella temporale, ad esempio con una maggiore frequenza di monitoraggio, al fine di controllare l'evoluzione dello stato quantitativo nel successivo ciclo di gestione di bacino.

ALLEGATO III – Bilancio idrico in Friuli Venezia Giulia

14. BILANCIO IDRICO IN FRIULI VENEZIA GIULIA²¹

14.1 Precipitazione (P)

14.1.1 Distribuzione delle precipitazioni e delle temperature

Per l'analisi di bilancio idrico della Regione Friuli Venezia Giulia sono stati utilizzati i dati giornalieri di 109 stazioni pluviometriche e 46 stazioni termometriche regionali, dell'Unità Operativa Idrografica della Regione (già del Min.LL.PP.) e di ARPA Osmer, registrati nel periodo 1971-2008. Gli eventuali dati mancanti sono stati ricostruiti con tecniche di regressione lineari (*Stepwise* o multiregressioni) già utilizzate nella compilazione dell'atlante Climatico del Friuli Venezia Giulia (Cicogna *et al.* 2008a).

Per poter eseguire il bilancio idrico a scala territoriale i dati pluviometrici e termometrici giornalieri sono stati spazializzati sulla griglia di 50 m sovrapponibile al *Digital Elevation Model* (DEM). Per le piogge sono stati utilizzati algoritmi interpolanti del tipo *Natural Neighbor*, mentre per le temperature sono stati utilizzati i gradienti altimetrici sperimentali ottenuti dalla correlazione tra i dati termometrici giornalieri e la quota delle stazioni. (Cicogna *et al.* 2008b, Golden Software Inc., 2000).

14.1.2 Neve: accumulo e scioglimento

Nei bacini montani è necessario descrivere adeguatamente il processo di accumulo e scioglimento della neve al fine di ottenere una modellazione realistica dei processi idrologici. Innanzitutto è necessario classificare la precipitazione (P) come pioggia (P_p) oppure come neve (P_n). A tal fine si è usato il criterio seguente, basato sulla temperatura media dell'aria (U.S. Army Corps of Engineers, 1956):

$$\begin{aligned} \text{se } T_{mean} > T_1 & \quad P_p = P \\ \text{se } T_2 < T_{mean} < T_1 & \quad P_p = P \cdot \frac{T_{mean} - T_2}{T_1 - T_2} \\ \text{se } T_{mean} < T_2 & \quad P_n = P \end{aligned}$$

dove:

T_{mean} = temperatura media giornaliera dell'aria[°C];

T_1 = temperatura soglia dell'aria sopra la quale tutta la precipitazione è piovosa (assunta pari a 3°C);

T_2 = temperatura soglia dell'aria sotto la quale tutta la precipitazione è nevosa (assunta pari a -1°C)

Il processo di accumulo e scioglimento della neve viene invece descritto mediante la seguente formula:

²¹ Tratto dall'Accordo per lo studio sugli acquiferi regionali tra il Servizio Idraulica della Direzione Centrale Ambiente e Lavori Pubblici della Regione Friuli Venezia Giulia (<http://www.regione.fvg.it>) e i dipartimenti di Geoscienze e di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università degli Studi di Trieste, 2010

$$SNO_t = SNO_{t-1} + P_{n,t} - SNO_{m,t}$$

dove:

SNO = accumulo di acqua equivalente a neve;

$SNO_{m,t}$ = quantitativo di neve sciolta il giorno t.

$$SNO_{m,t} = b_{m,t} \cdot sno_{cov} \cdot \left[\frac{T_{snow} + T_{max}}{2} - T_{m,t} \right]$$

$b_{m,t}$ = fattore di scioglimento giornaliero (assunto pari a 4.5 mm H₂O/day-°C);

sno_{cov} = coefficiente di uniformità dell'accumulo di neve (assunto pari a 1: si ipotizza cioè una copertura nevosa uniforme su tutta la cella);

T_{max} = temperatura media giornaliera [°C];

$T_{m,t}$ = temperatura di soglia sopra la quale avviene lo scioglimento della neve;

$$T_{snow,t} = T_{snow,t-1} \cdot (1 - \lambda_{snow}) + T_{mean} \cdot \lambda_{snow}$$

λ_{snow} = fattore di ritardo (assunto pari a 0.1)

Dunque, quando la temperatura media risulta inferiore a T_2 tutta la precipitazione è classificata come neve e il quantitativo di acqua equivalente alla precipitazione nevosa viene aggiunto all'accumulo di neve; viceversa all'aumentare della temperatura si innesca il fenomeno dello scioglimento che va a sommarsi alle eventuali precipitazioni giornaliere.

14.2 Evapotraspirazione reale (Et)

14.2.1 Evapotraspirazione di riferimento

L'evapotraspirazione di riferimento (ET_0) viene definita come: evapotraspirazione da una superficie a prato, alta 8-15 cm, uniforme e completamente ombreggiante il terreno, non sottoposta a *stress* idrico (Doorenbos e Pruitt, 1977). Più in particolare, l'evapotraspirazione di riferimento è la stima della quantità di acqua dispersa, attraverso i processi di evaporazione del suolo e di traspirazione delle piante, da un prato di ampia estensione, in cui i processi di crescita e produzione non sono limitati dalla disponibilità idrica o da altri fattori di *stress*. L'evapotraspirazione potenziale o di riferimento è quindi un parametro tipicamente climatico in quanto esprime la tendenza a traspirare di una determinata superficie vegetale e per questo motivo è determinata in funzione di soli parametri climatici.

Per il calcolo dell'evapotraspirazione potenziale è stata utilizzata la formula di Hargreaves, consigliata nel quaderno 56 della FAO (Food and Agriculture Organization, 2006) "*Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements*", nel caso in cui si abbia a disposizione il solo dato di temperatura:

$$ET_0 = c(T_{mean} + 17.8)(T_{max} - T_{min})^{0.5} R_a$$

dove:

T_{mean} = temperatura media giornaliera [°C];

T_{min} = temperatura minima giornaliera [°C];

T_{\max} = temperatura media giornaliera [$^{\circ}\text{C}$];

R_a = radiazione solare extraterrestre [mm/day]

c = costante empirica di calibrazione che adatta l'equazione di Hargreaves alla situazione specifica del territorio sotto osservazione.

Nella formulazione originaria tale parametro è uguale a 0.0023; uno studio su 78 stazioni in Regione Veneto (R. Carobin, 2008, Tesi di laurea²²) ha portato ad un nuovo valore pari a 0.00197.

14.2.2 Evapotraspirazione colturale

Per la determinazione dell'evapotraspirazione colturale, indicata comunemente ET_c , si è operato con il cosiddetto approccio a "due fasi" (*two-step approach*). All'evapotraspirazione di riferimento, una volta calcolata, è stato applicato un coefficiente colturale (K_c) che ingloba e sintetizza tutti gli effetti sull'evapotraspirazione legati alle caratteristiche morfo-fisiologiche delle diverse specie, alla fase fenologica, al grado di copertura del suolo, che le rendono differenti dalla coltura di riferimento. Il risultato del calcolo è rappresentato perciò dal semplice prodotto dei due termini, per un dato intervallo di tempo, vale a dire:

$$ET_c = k_c \times ET_0$$

I valori calcolati con tale metodo devono intendersi come consumi massimi possibili per piante coltivate su superfici ampie, indenni da parassiti ed in condizioni ottimali di fertilità e disponibilità idrica. Il coefficiente K_c è stato valutato per ciascuna classe di uso del suolo del Moland e per ogni decade dell'anno.

14.3 Deflusso superficiale (R)

14.3.1 Descrizione della metodologia adottata

Il calcolo della componente di ruscellamento superficiale è stato effettuato mediante l'utilizzo della metodologia del *Curve Number* (CN) modificata da Williams et al. (2000). La tecnica del CN è stata messa a punto nel 1972 dal *Soil Conservation Service* degli Stati Uniti d'America (USDA, 1972) e nasce per lo studio dei deflussi di piena; successivamente, nel 2000, Williams ha proposto una modifica alla metodologia per adattarla alle analisi a lungo termine e quindi alla definizione del bilancio idrologico.

Nella figura seguente si schematizza il processo logico seguito dal metodo CN modificato per arrivare al calcolo del deflusso superficiale:

²² <http://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agrometeo/file-e-llegati/documenti/irrigazione/Tesi%20Carobin.pdf>

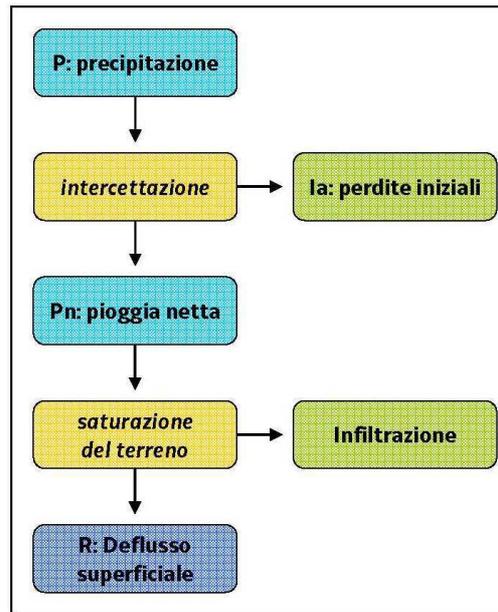


Figura 30 - Schema per il calcolo del deflusso superficiale

L'equazione su cui si basa la metodologia del *Curve Number* è la seguente:

$$R_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{(P_t - I_a + S_t)}$$

dove:

P_t = precipitazione giornaliera;

I_a = perdite iniziali cioè la frazione di precipitazione intercettata dalla vegetazione, che bagna il terreno e riempie le cavità superficiali, ecc. Il deflusso superficiale si forma solo quando la precipitazione giornaliera risulta superiore alla frazione intercettata. I_a è solitamente assunto pari a $0.2S_t$;

S_t = coefficiente di ritenzione. Tale parametro dipende dalla tipologia di suolo e dalla sua saturazione, dall'uso del suolo e dalla pendenza.

Nella metodologia originale S si definisce come:

$$S = 25.4 \cdot \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

dove CN è appunto il *Curve Number*, un parametro che descrive l'attitudine di un territorio a produrre deflusso superficiale; varia da 0 a 100: più alto è il suo valore e maggiore sarà il deflusso prodotto a parità di precipitazione.

La metodologia proposta da Williams prevede una modifica al calcolo del parametro di ritenzione ponendolo variabile tra 0 (terreno saturo) e S_{max} (terreno secco) e dipendente dall'evapotraspirazione potenziale del giorno ($ET_{0,t}$) e della pioggia (P_{t-1}) e dello scorrimento superficiale (R_{t-1}) del giorno precedente:

$$S_t = S_{t-1} + ET_{0,t} \exp\left(\frac{-BS_{t-1}}{S_{\max}}\right) - P_{t-1} + R_{t-1}$$

$$S_{\max} = 25.4 \left(\frac{1000}{CN(I)} - 10 \right)$$

$$S_{t=0} = 25.4 \left(\frac{1000}{CN(II)} - 10 \right)$$

dove:

B = coefficiente di svuotamento: tale parametro varia teoricamente tra 0 e 2, ma alcune tarature effettuate in letteratura hanno dimostrato che, in pratica, l'intervallo di variazione è compreso tra 0.5 e 1.5;

CN(II) = *curve number* calcolato in condizioni di saturazione del terreno normale. Si ricava da apposite tabelle create dal Soil Conservation Service;

CN(I) = *curve number* calcolato in condizioni di terreno asciutto:

$$CN(I) = CN(II) - \frac{20(100 - CN(II))}{(100 - CN(II)) + \exp[2.533 - 0.0636(100 - CN(II))]}$$

Nella fase di calibrazione dei risultati del modello si è visto che i limiti imposti da Williams per la variazione del coefficiente di ritenzione non sono accettabili in quanto $S = 0$ implica $CN=100$ e quindi un valore caratteristico di superfici completamente impermeabili (es. asfalto) comportando una sovrastima della componente di ruscellamento. Pertanto il limite inferiore di S_t è stato assunto pari a $S(CN(III))$.

Un'ulteriore correzione al parametro di ritenzione è stato effettuato nell'ipotesi di suolo ghiacciato (assunto quando la $T_{\text{mean}} \delta - 1$):

$$S_{\text{frozen}} = S_{\max} [1 - \exp(-0.000862S)]$$

14.3.2 Calcolo del parametro CN(II)

Seguendo la metodologia messa a punto dal *Soil Conservation Service* è stato determinato il parametro CN(II) per tutto il territorio regionale, combinando con l'ausilio del GIS i seguenti strati informativi sulla base di una griglia 50 x 50 m:

1. Carta dei gruppi idrogeologici

In mancanza di informazioni omogenee su tutto il territorio regionale sulla permeabilità, si è deciso di ricavare tale strato informativo dalla carta geo-litologica utilizzando la tabella di conversione gruppi idrogeologici – litologia fornita dal progetto Catchrisk, opportunamente modificata tenendo conto delle conclusioni dello studio “*Studies for the realization of the hydrogeological map of Friuli Venezia Giulia*” (Cucchi *et al.* 2000). In Tabella 9 si riporta la definizione di gruppo idrogeologico secondo il *Soil Conservation Service* (SCS), mentre in Figura 31 è riprodotta la carta dei gruppi idrogeologici derivati dalla carta geolitologica.

Tabella 9 – Definizione di gruppo idrogeologico secondo il SCS

GRUPPO IDROGEOLOGICO	DEFINIZIONE SECONDO SCS
A	<i>Permeabilità alta, bassa capacità di deflusso, suoli con elevata capacità di infiltrazione anche se completamente saturi, sabbie o ghiaie profonde ben drenate, notevole conducibilità idraulica</i>
B	<i>Permeabilità medio – alta, suoli con moderata capacità di infiltrazione se saturi, discretamente drenati e profondi, tessitura medio – grossolana, conducibilità idrica media</i>
C	<i>Permeabilità medio – bassa, suoli con bassa capacità di infiltrazione se saturi, uno strato impedisce la percolazione verticale, suoli con tessitura medio fine e bassa capacità di infiltrazione, conducibilità idrica bassa</i>
D	<i>Permeabilità bassa, capacità di deflusso elevata, suoli con capacità di infiltrazione ridottissima in condizioni di saturazione, suoli ricchi di argilla rigonfianti, suoli con strato argilloso superficiale, suoli poco profondi su substrato impermeabile, conducibilità idrica estremamente bassa</i>

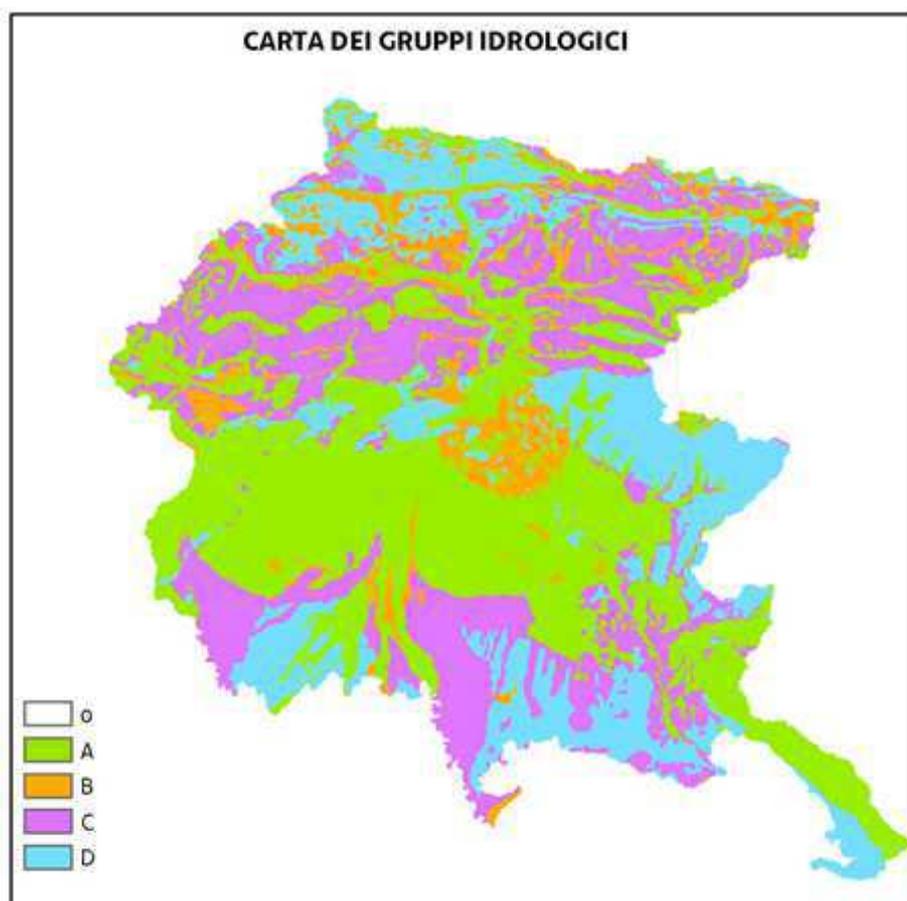


Figura 31 – Carta dei gruppi idrogeologici

2. Carta dell'uso del suolo

L'informazione dell'uso del suolo è stata ricavata dal Moland opportunamente riclassificato, come riportato in Figura 32.

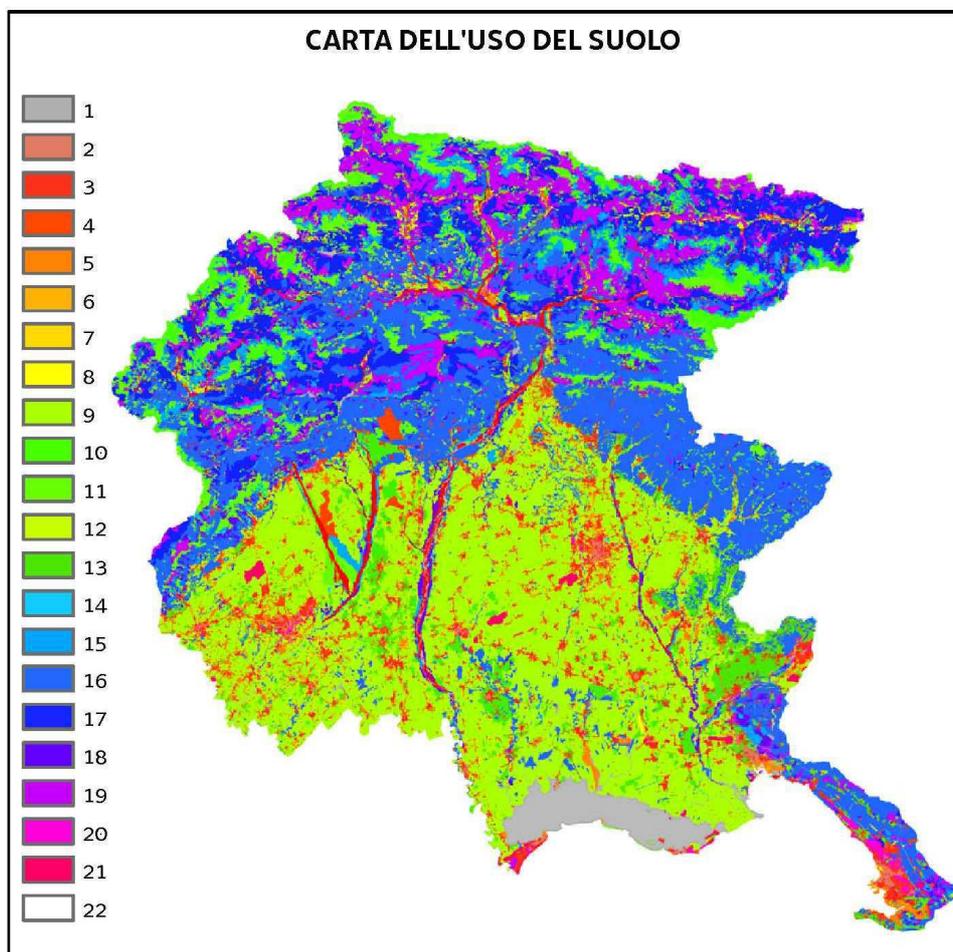


Figura 32 - *Carta dell'uso del suolo*

A ciascuna classe della riclassificazione Moland e per ogni gruppo idrogeologico, corrisponde un diverso valore di *Curve Number* (Tabella 10).

Tabella 10 – *CN per tipo di uso del suolo*

CLASSE USO SUOLO	GRUPPO_IDR	CNA	CNB	CNC	CND
1	<i>Superfici d'acqua</i>	99	99	99	99
2	<i>Urbano continuo (impermeabile >80%)</i>	89	92	94	95
3	<i>Urbano discontinuo (impermeabile 50%-80%)</i>	77	85	90	92

CLASSE USO SUOLO	GRUPPO_IDR	CNA	CNB	CNC	CND
4	<i>Urbano discontinuo e rado (impermeabile 10-50%)</i>	57	72	81	86
5	<i>Aree industriali</i>	81	88	91	93
6	<i>Aree commerciali</i>	89	92	94	95
7	<i>Strade e parcheggi</i>	98	98	98	98
8	<i>Ferrovie</i>	72	82	87	89
9	<i>Seminativi in aree non irrigue</i>	62	71	78	81
10	<i>Rocce nude, rupi, affioramenti</i>	80	87	93	96
11	<i>Prati d'alta quota</i>	37	50	68	75
12	<i>Prati stabili</i>	49	69	79	84
13	<i>Superfici coltivate</i>	62	71	78	81
14	<i>Terreni abbandonati</i>	68	79	86	89
15	<i>Brughiere e Cespuglieti</i>	45	66	77	83
16	<i>Boschi di latifoglie</i>	45	66	77	83
17	<i>Boschi misti</i>	36	60	73	79
18	<i>Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione</i>	36	60	73	79
19	<i>Boschi di Conifere</i>	30	55	70	77
20	<i>Aree verdi urbane</i>	39	61	74	80
21	<i>Aree sportive e ricreative, luoghi di culto, cimiteri</i>	49	69	79	84
22	<i>Spiagge, dune, sabbie</i>	44	51	55	58

3. Carta delle pendenze

Tale informazione è stata ricavata dal DEM a 40 m del territorio regionale.

La relazione che corregge il parametro CN(II) sulla base della pendenza (*slope*) è la seguente (Williams, 1995):

$$CN(II)_s = \frac{(CN(III) - CN(II))}{3} \cdot [1 - 2 \exp(-1386 \cdot slope)] + CN(II)$$

dove:

CN(III) = curve number calcolato in condizioni di terreno saturo:

$$CN(III) = CN(II) \cdot \exp[0.00673(100 - CN(II))]$$

La formula si applica per pendenze superiori al 5%

Per concludere, infine, si riporta in Figura 33 la carta del parametro CN(II) ricavata dalla combinazione delle tre carte sopra descritte. Valori bassi di tale parametro si possono notare in corrispondenza delle aree carsiche della Regione dove è maggiore la componente di infiltrazione nel sottosuolo rispetto a quella di deflusso superficiali. Riportano viceversa una più marcata attitudine a generare deflussi superficiali quei territori o molto urbanizzati (ad esempio l'area della città di Udine) o caratterizzati da litologie semi-impermeabili come ad esempio il *flysch* delle Prealpi Giulie.

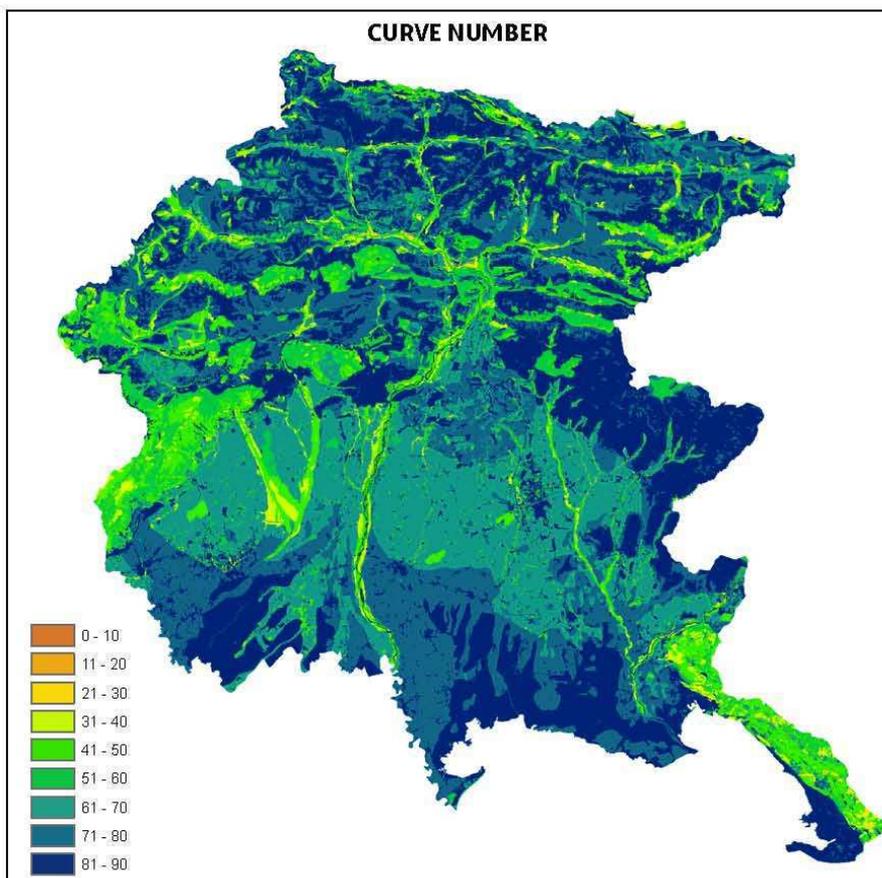


Figura 33 - Carta del parametro CN(II)

Dall'analisi svolta risulta che il parametro CN(II) sia distribuito come mostrato in Figura 34.

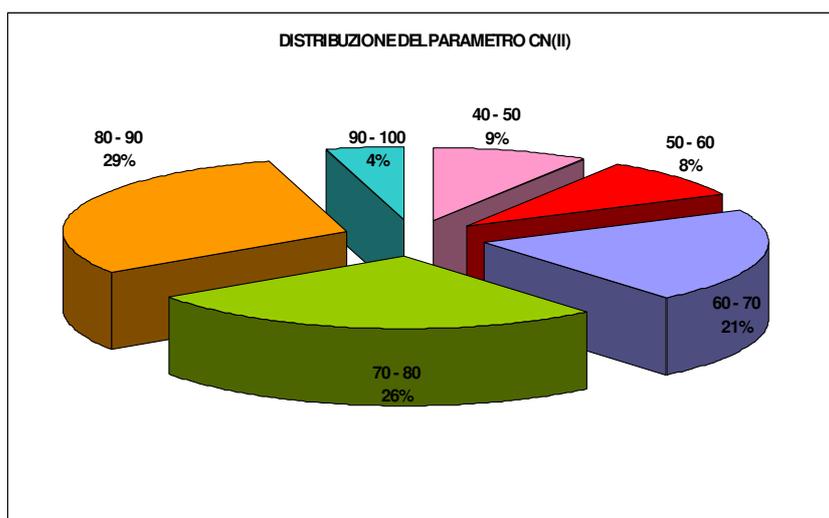


Figura 34 - Distribuzione del parametro CN(II)

14.4 Infiltrazione (I)

Tale componente è stata calcolata per differenza:

$$I = P - Etc - R$$

Come illustrato precedentemente la componente di afflusso (P) è giornaliera come anche le componenti di ruscellamento superficiale (R) ed evapotraspirazione colturale (Etc); tuttavia, poiché, per mancanza di conoscenze omogenee su tutto il territorio regionale delle caratteristiche dei suoli, non è stato possibile valutare l'effetto "serbatoio" che ciascun suolo ha nei confronti dell'acqua che si infiltra, la componente infiltrazione è stata calcolata su base decadale.

Risolvendo l'equazione su base giornaliera risulterebbe infatti che nei (molti) giorni con precipitazioni scarse o nulle la componente I sarebbe inferiore a zero in considerazione che, seppur variabile nel corso dell'anno, l'evapotraspirazione è comunque sempre positiva. Risolvendo invece l'equazione su base decadale si simula, seppur in maniera molto approssimativa, la capacità che ha il suolo di trattenere parte dell'acqua che si infiltra e di utilizzarla in seguito per i fabbisogni della vegetazione. Chiaramente quando il calcolo decadale dell'infiltrazione risulta negativo si assume che non ci sia percolazione nel terreno.

ALLEGATO IV – Trend dei livelli piezometrici in Emilia-Romagna

15. CORPI IDRICI SOTTERRANEI IN EMILIA-ROMAGNA

In Emilia-Romagna sono stati identificati e caratterizzati i seguenti tipi di corpi idrici sotterranei, ai fini della definizione dello stato chimico e quantitativo (Regione Emilia-Romagna, 2010):

- montani
- freatici di pianura
- conoidi alluvionali libere e confinate (superiori e inferiori)
- pianure alluvionali (superiori e inferiori)

Nelle seguenti Figure 35-37 si riporta la rappresentazione cartografica dei corpi idrici sotterranei identificati che in totale sono 145. Nella zona di pianura sono stati identificati corpi idrici sovrapposti su 3 livelli con la profondità: dal freatico più superficiale, di spessore medio di circa 10 m, ai confinati superiori a quelli inferiori, che raggiungono una profondità massima di circa 600 m. Maggiori dettagli e approfondimenti sono disponibili negli allegati alla Delibera di Giunta Regionale dell'Emilia-Romagna n. 350 (2010).

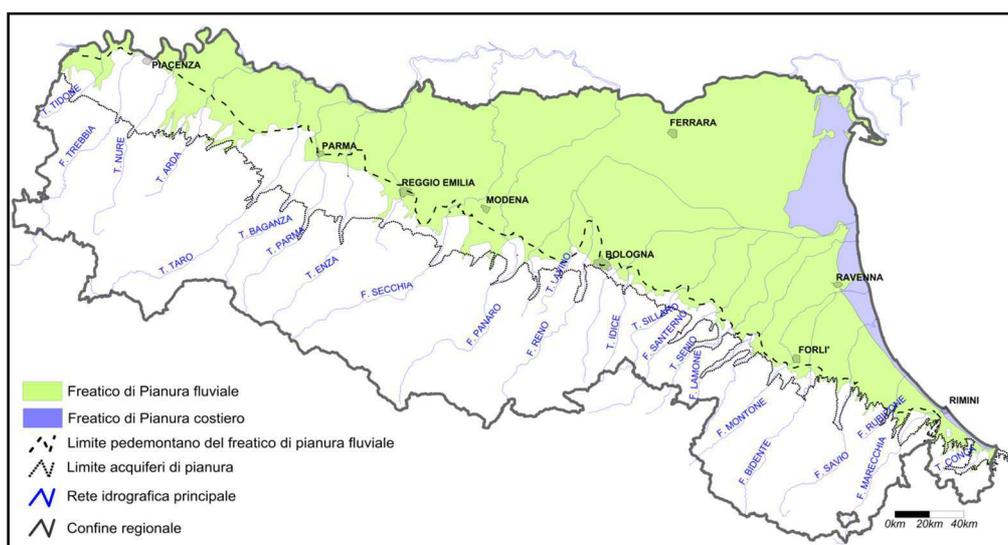


Figura 35 - Corpi idrici sotterranei freatici di pianura

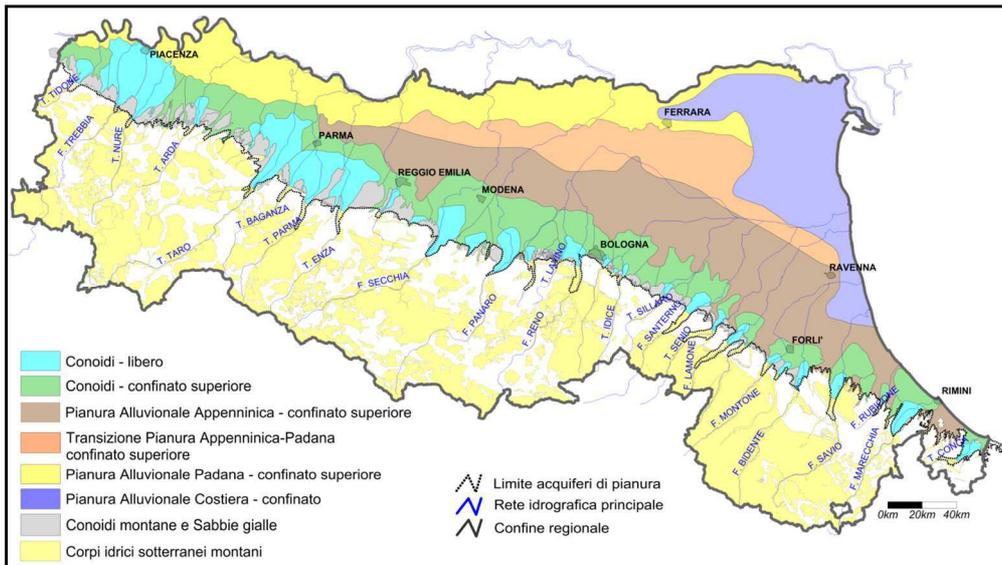


Figura 36 - Corpi idrici sotterranei di montagna, di pianura liberi e confinati superiori (acquiferi A1 e A2)

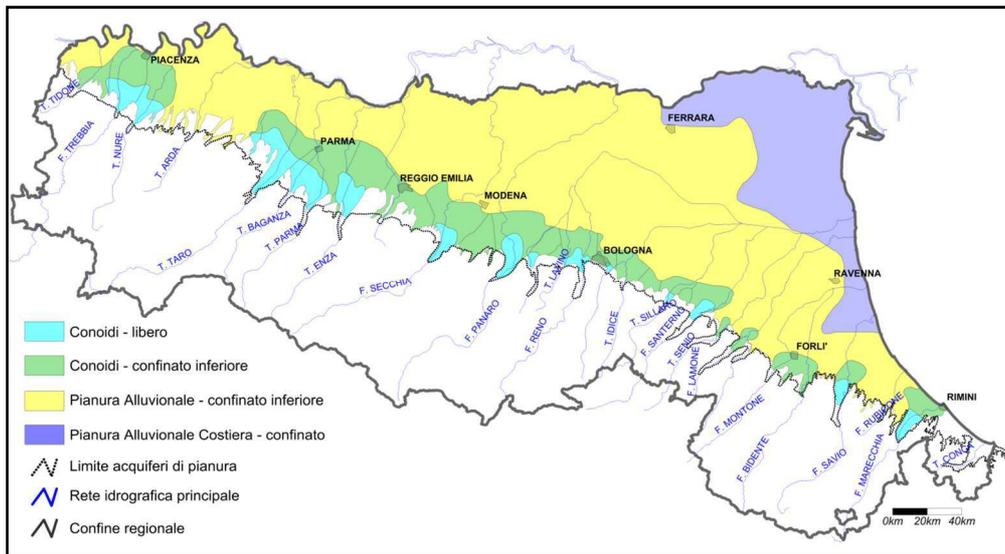


Figura 37 - Corpi idrici sotterranei di pianura confinati inferiori (acquiferi A3, A4, B e C)

In Figura 38 si riporta, inoltre, una sezione idrogeologica SO-NE della pianura emiliano-romagnola, indicativamente tracciata da Modena verso il fiume Po, che evidenzia i rapporti laterali e verticali degli acquiferi individuati ai sensi della Direttiva 2000/60/CE.

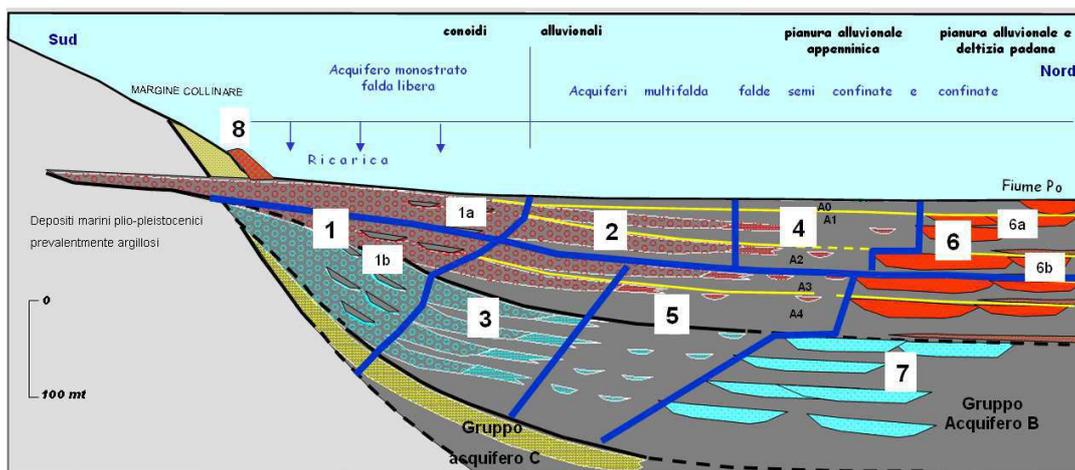


Figura 38 - Sezione geologica schematica di sottosuolo della pianura emiliano-romagnola con indicazione degli acquiferi individuati ai sensi della Direttiva 2000/60/CE

In Figura 38 le formazioni geologiche alluvionali indicate con i numeri da 1 a 8 sono le seguenti:

- 1: Conoidi alluvionali “amalgamate” – acquifero libero;
- 2: Conoidi alluvionali “multistrato”- acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2);
- 3: Conoidi alluvionali “multistrato”- acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
- 4: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2)
- 5: Pianura alluvionale appenninica - acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
- 6: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati superiori (acquiferi A1 ed A2, 6a e 6b)
- 7: Pianura alluvionale e deltizia padana - acquiferi confinati inferiori (acquiferi A3 - C)
- 8: Conoidi alluvionali pedemontane

15.1 Risultati del monitoraggio quantitativo 2010-2012

Nelle Figure 39 - 43 è riportata la rappresentazione cartografica degli esiti del monitoraggio quantitativo condotto nel periodo 2010-2012 sui corpi idrici sotterranei identificati al paragrafo precedente (Regione Emilia-Romagna, 2015).

Mentre nei corpi idrici freatici di pianura e montani si è scelta una rappresentazione puntuale dei valori di livello piezometrico e di portata, considerando la bassa densità di punti e la recente istituzione del monitoraggio in questi corpi idrici, negli acquiferi di pianura più profondi è stato possibile effettuare una spazializzazione dei dati di livello piezometrico e di soggiacenza, sia dei corpi idrici confinati superiori che di quelli confinati inferiori.

L'andamento, con gradienti piezometrici più elevati nelle zone delle conoidi emiliane rispetto a quelle romagnole, è interrotto dalla conoide Reno-Lavino (Bologna), che presenta in prossimità del margine appenninico valori di piezometria negativi, anche nella porzione libera di conoide, raggiungendo valori fino a -10 m. La depressione piezometrica nella conoide Reno-Lavino si amplia arealmente con la profondità, ovvero negli acquiferi liberi e confinati inferiori. Ciò costituisce l'impatto, ancora oggi molto evidente, prodotto dai consistenti prelievi effettuati nel passato quando i prelievi superavano la capacità di ricarica. Approfondimenti relativi all'evoluzione temporale dei livelli piezometrici della pianura dell'Emilia-Romagna sono disponibili in Farina *et al.* (2014).

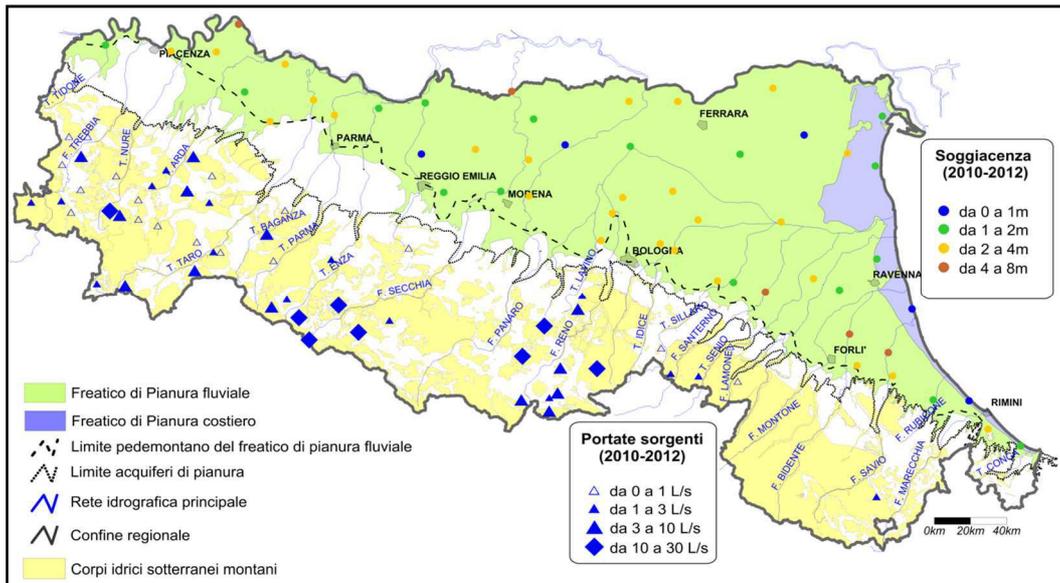


Figura 39 - Soggiacenza media nei corpi idrici freatici di pianura e portata media delle sorgenti montane (2010-2012).

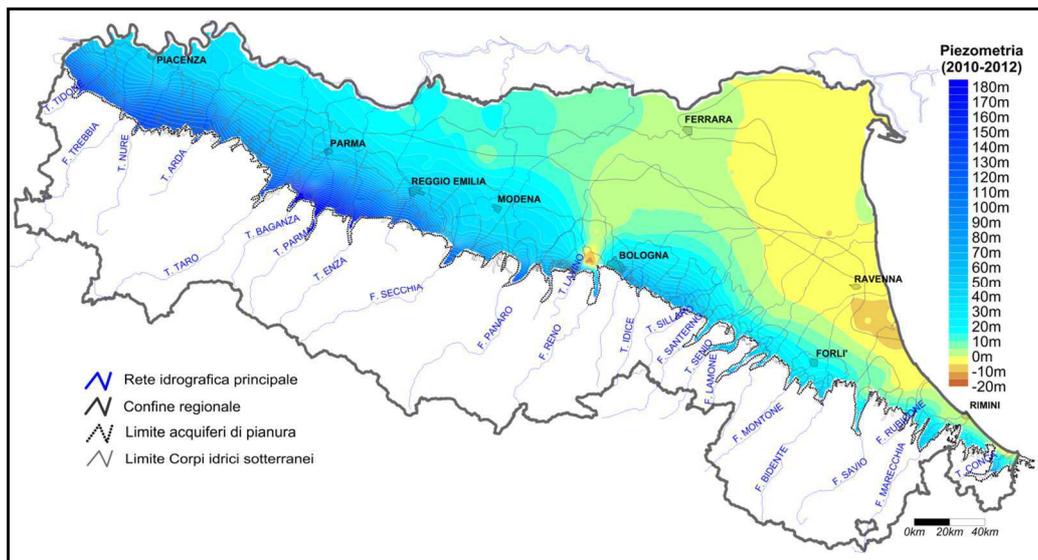


Figura 40 - Piezometria media nei corpi idrici liberi e confinati superiori (2010-2012)

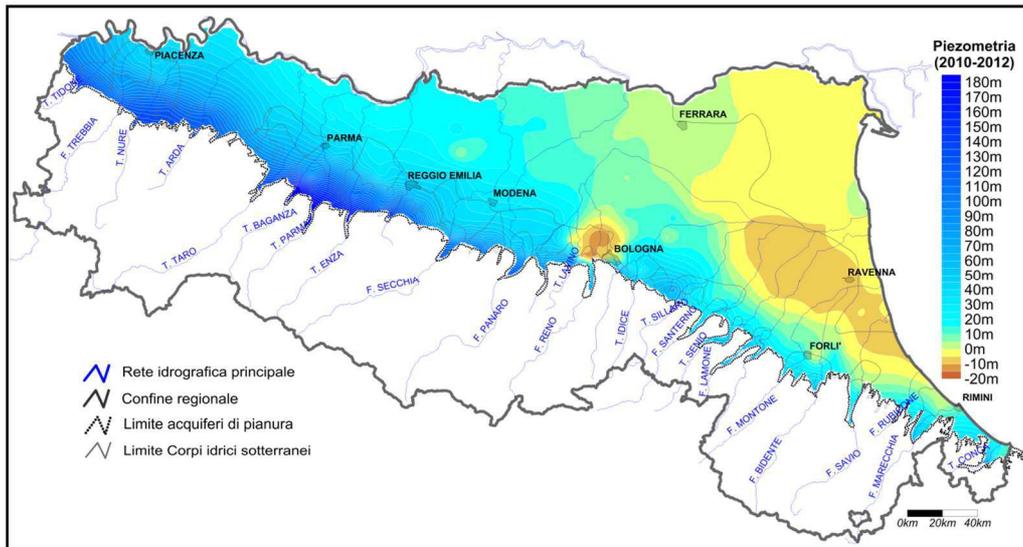


Figura 41 - Piezometria media nei corpi idrici liberi e confinati inferiori (2010-2012)

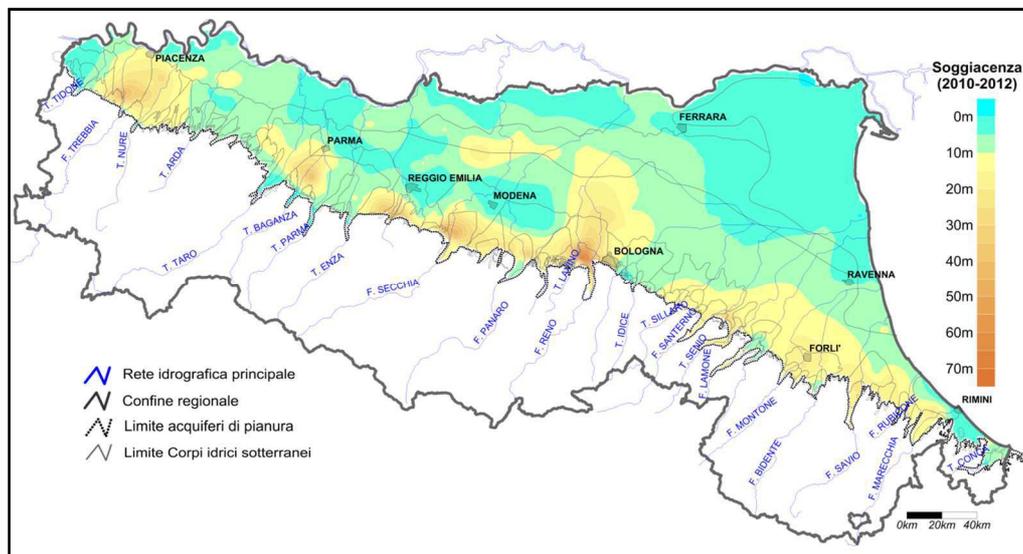


Figura 42 - Soggiacenza media nei corpi idrici liberi e confinati superiori (2010-2012)

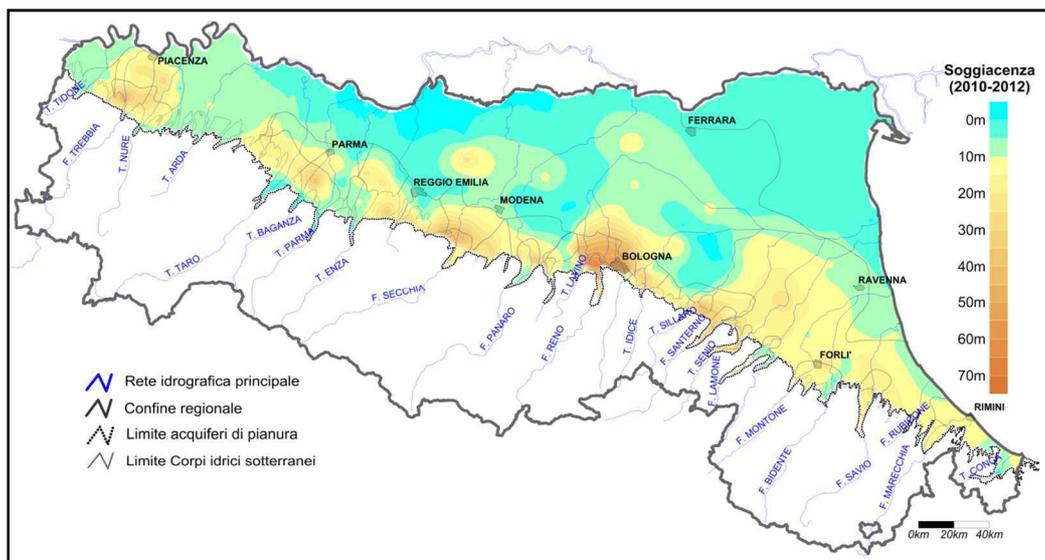


Figura 43 - Soggiacenza media nei corpi idrici liberi e confinati inferiori (2010-2012)

15.2 Sintesi dello stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei 2010-2013 (SQUAS)

In Figura 44 è mostrata la percentuale dei corpi idrici in stato quantitativo *buono* e in stato *scarso*, sulla base della analisi dei trend di livello piezometrico, come mostrato di seguito, dei 145 corpi idrici sotterranei totali identificati in Regione Emilia-Romagna. In Tabella 11 si riporta il dettaglio dello stato quantitativo (SQUAS) per tipologia di corpo idrico sotterraneo.

Nelle figure 45 – 47 è rappresentato cartograficamente lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei montani, freatici di pianura e profondi (superiori e inferiori) di pianura.

Risultano in “buono” stato quantitativo i corpi idrici collinari e montani, di fondovalle, freatici, delle conoidi alluvionali appenniniche, nella porzione emiliana del territorio, e quelli profondi di pianura alluvionale. Questi ultimi rappresentano oltre il 70% della superficie totale di pianura.

In stato quantitativo “scarso”, ovvero a rischio di non raggiungere gli obiettivi fissati dalla normativa, si trovano diversi corpi idrici di conoide alluvionale appenninica, da Modena a Rimini, nelle zone dove si concentrano importanti prelievi acquedottistici, industriali e irrigui, in associazione ad una limitata capacità di ricarica/stoccaggio dei corpi idrici sotterranei medesimi. Tra le diverse porzioni di conoide (libero, confinato superiore e confinato inferiore), la criticità risulta presentarsi in funzione del contesto idrogeologico, della dimensione del corpo idrico e dell’entità dei prelievi, coinvolgendo alcune parti delle conoidi e non altre, evidenziando a scala regionale fenomenologie in atto diversificate e di diversa entità circa il regime di ricarica e di prelievo.

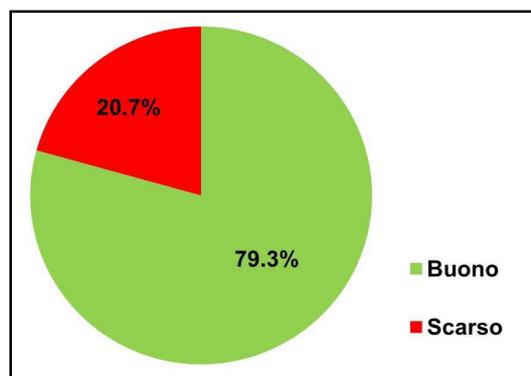


Figura 44 - Stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei 2010-2012 (percentuale sul totale)

Tabella 11 – Stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei distinto per tipologia di corpo idrico (2010-2012)

TIPOLOGIA CORPO IDRICO SOTTERRANEO	SQUAS BUONO		SQUAS SCARSO		TOTALE CORPI IDRICI
	Numero corpi idrici	% corpi idrici sul totale	Numero corpi idrici	% corpi idrici sul totale	
<i>Conoidi alluvionali</i>	58	65.9	30	34.1	88
<i>Pianure alluvionali</i>	5	100	0	0	5
<i>Freatici di pianura</i>	2	100	0	0	2
<i>Depositi fondovalle</i>	1	100	0	0	1
<i>Montani</i>	49	100	0	0	49
Totale	115	79.3	30	20.7	145

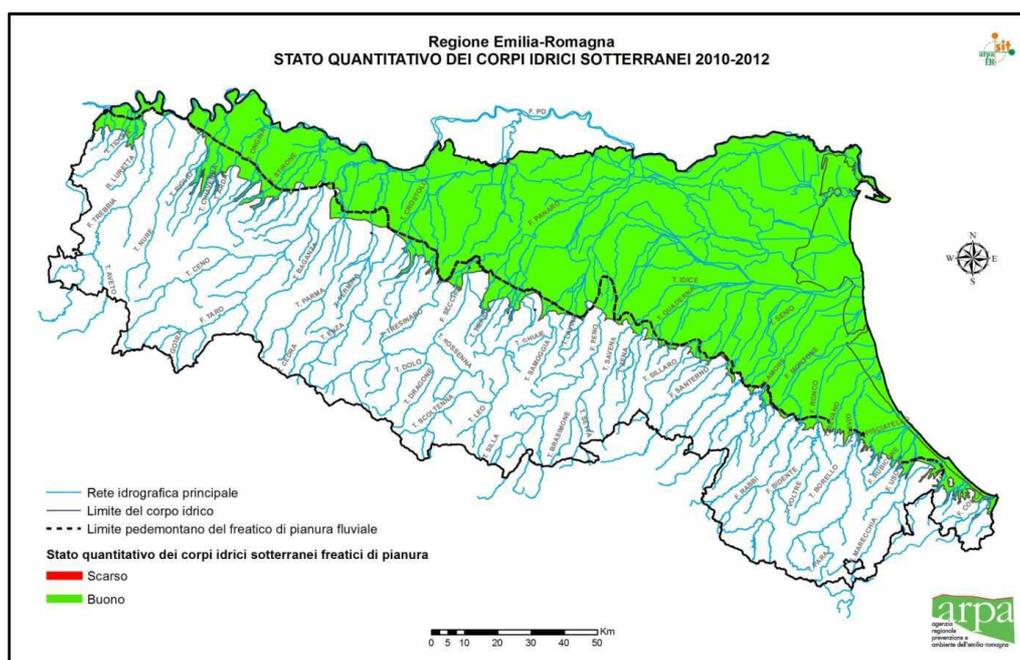


Figura 45 - Stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei freatici di pianura (2010-2012)

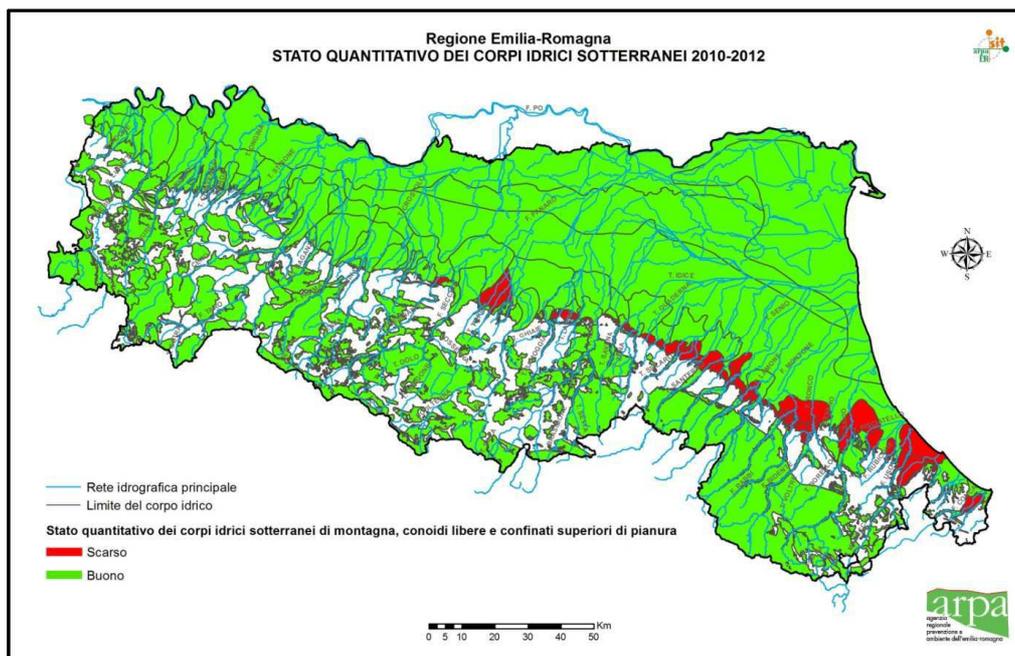


Figura 46 - Stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei montani, conoidi libere e confinati superiori di pianura (2010-2012)

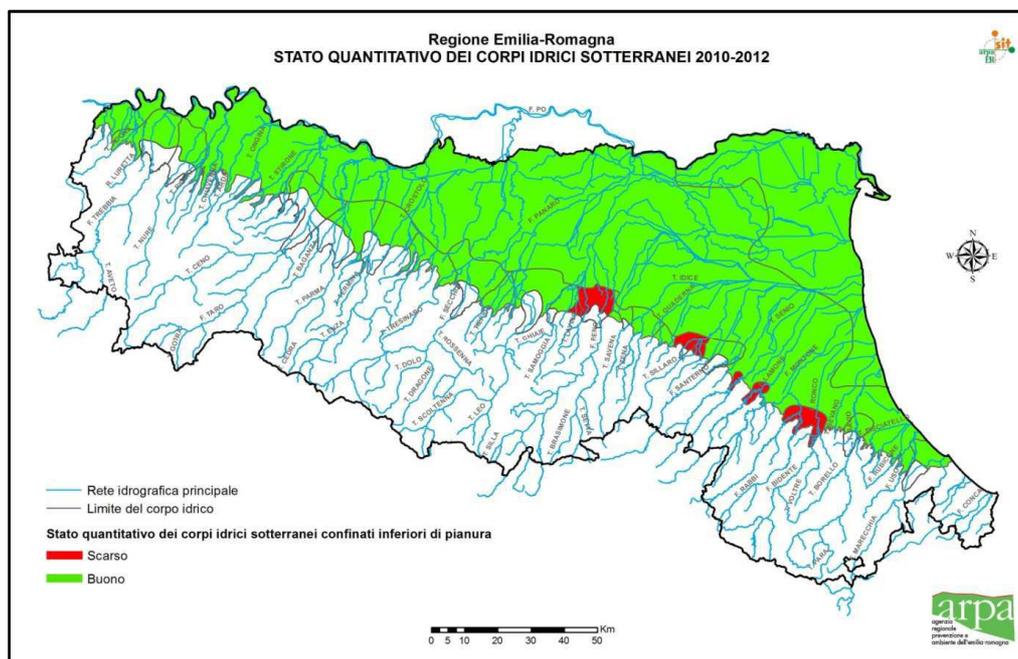


Figura 47 - Stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei confinati inferiori di pianura (2010-2012)

15.3 Metodologia di valutazione delle tendenze dei livelli sul lungo periodo

La metodologia adottata per la valutazione delle tendenze medie dei livelli di falda su lungo periodo alla scala di corpo idrico, a partire dai dati puntuali di monitoraggio sui singoli pozzi e piezometri della rete di monitoraggio, è simile a quella presentata al Paragrafo 6.2, in particolare è stata seguita la procedura di seguito illustrata:

- Per ciascuna stazione di monitoraggio sono state verificate le misure disponibili dal 2002 al 2012, al fine di ottenere 2 misure per ciascun anno in modo da caratterizzare in primavera il massimo livello e in autunno il minimo livello. Le misure automatiche sono state utilizzate al fine di individuare i 2 valori – massimo e minimo annuo – della falda per integrare o correggere quanto disponibile come misure manuali;
- per ciascuna stazione di monitoraggio è stato calcolato il trend della piezometria espresso in metri/anno. Per fare questo calcolo sono stati utilizzati i dati presenti per ciascuna stazione di monitoraggio per un arco temporale di almeno 5 anni e per ciascun anno possibilmente 2 misure, ottenendo quindi un set minimo di 10 dati. Il valore di trend della piezometria è stato ottenuto come coefficiente angolare della retta di regressione dei dati di piezometria plottati sull'asse dell'ordinata e in ascissa la relativa data di misura espressa come decimali di anno. Alla stazione è stato attribuito lo stato “buono” per valori di trend positivi o uguali a zero e lo stato scarso per valori negativi, come suggerito dal D. Lgs. 30/09;
- il valore di trend della piezometria calcolato per ciascuna stazione è stato poi spazializzato con la funzione standard “*Natural Neighbor*”, su una griglia con maglie quadrate di lato 1 km, sia per i corpi idrici confinati superiori che per quelli confinati inferiori. Le stazioni attribuite alle porzioni di conoide con acquifero libero sono state utilizzate in entrambe le elaborazioni;
- sono stati poi attribuiti i valori di trend per ogni cella a ciascun corpo idrico;
- è stata elaborata la media di tutti i valori di trend della piezometria attribuiti a ciascun corpo idrico sotterraneo;
- è stato attribuito il valore di “buono” stato quantitativo ai corpi idrici che presentano la media del trend della piezometria maggiore o uguale a zero;
- è stato attribuito infine un livello di confidenza tenendo conto della stabilità del trend nel tempo e delle situazioni *borderline*

Nelle Figure 48 e 49 sono rappresentati i trend dei livelli di piezometria relativi agli acquiferi liberi e quelli confinati superiori e inferiori di pianura, dove le zone gialle e rosse rappresentano valori negativi e le zone azzurre e blu valori positivi o tendenze stazionarie su lungo periodo.

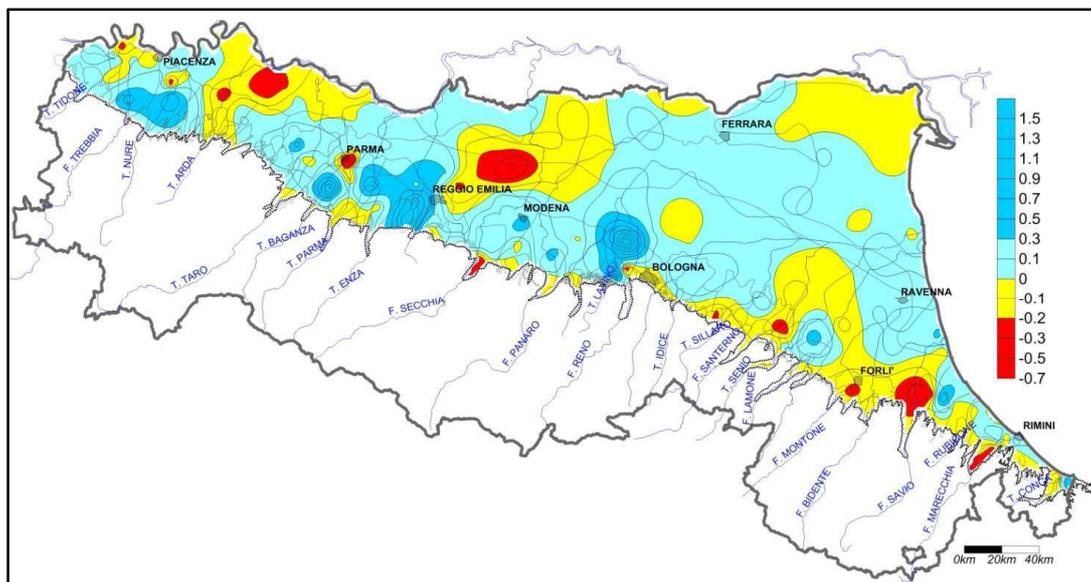


Figura 48 - Tendenze dei livelli di falda nei corpi idrici liberi e confinati superiori

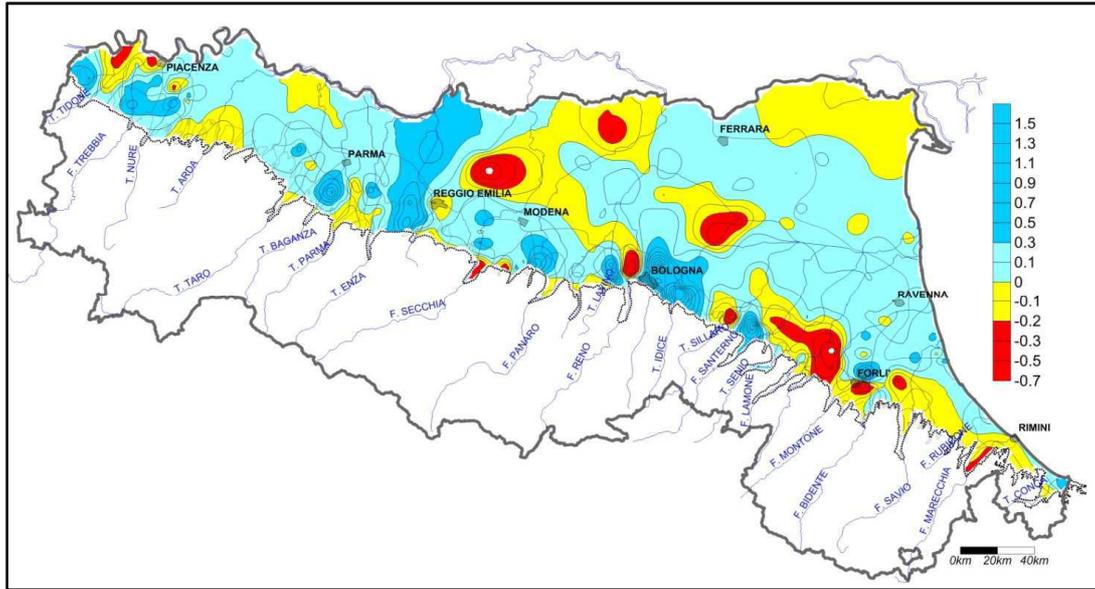


Figura 49 - Tendenze dei livelli di falda nei corpi idrici liberi e confinati inferiori

ALLEGATO V – Interazione acque superficiali - acque sotterranee

16. INTERAZIONE CORPI IDRICI SOTTERRANEI-SUPERFICIALI

L'interazione tra le acque sotterranee e quelle superficiali è definita come la continuità idraulica, chimico-fisica e biologica tra il corpo idrico di superficie e quello sotterraneo che lo alimenta e lo sostiene (Rosenberry and LaBaugh, 2008).

L'interazione tra i corpi idrici superficiali e quelli sotterranei tra loro connessi varia nello spazio e nel tempo.

Nello spazio l'interazione varia lungo il corso longitudinale del fiume, da monte verso valle, in funzione dei rapporti geometrici tra la quota di *talweg* del corso d'acqua rispetto a quella del livello di base (Figura 50); l'interazione varia anche in senso trasversale rispetto all'asta fluviale, in funzione dell'assetto geomorfologico e della geometria della superficie piezometrica (Figura 51).

Nel tempo, l'interazione varia con il variare del regime degli afflussi e del regime idrologico, come mostrato nei profili 1 (*fase di ricarica*) e 2 (*fase di esaurimento delle risorse idriche immagazzinate*) di Figura 50.

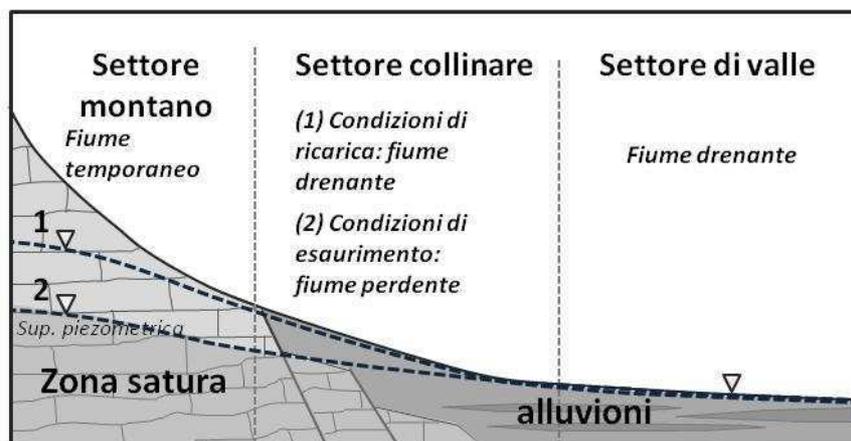


Figura 50 - Interazione acquifero-fiume lungo il profilo longitudinale del corso d'acqua

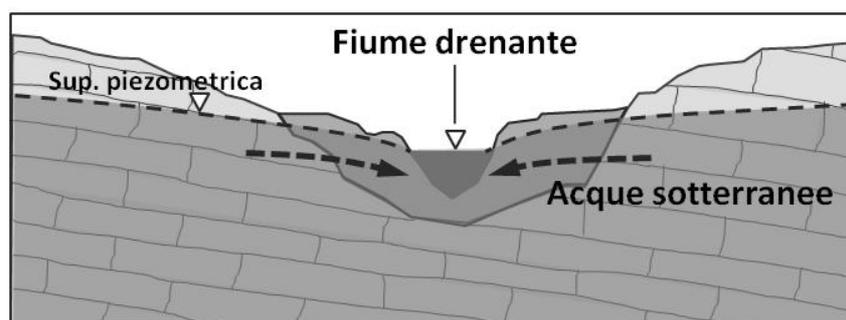


Figura 51 - Interazione acquifero-fiume lungo una sezione trasversale al corso d'acqua

16.1 Misura dell'interazione acque sotterranee - acque superficiali

Poiché l'interazione tra corpi idrici sotterranei e superficiali è rappresentata della dinamica delle relazioni nello spazio e nel tempo, la sua misura è condizionata dalla scala spaziale di osservazione (scala locale o di sito, scala di tratto fluviale, scala di bacino idrografico).

La misura dell'interazione acque superficiali-acque sotterranee può essere di tipo *diretto*, attraverso il rilevamento delle grandezze fisiche dei corpi idrici (livelli piezometrici, portate, misure tramite traccianti o indicatori chimico-fisici) e delle loro variazioni nel tempo, oppure *indiretto*, attraverso l'analisi dell'idrogramma del corso d'acqua o della sorgente localizzata o attraverso l'analisi del bilancio idrologico.

16.1.1 Misure dirette dell'interazione acquifero - fiume

Misure di portata (scala di bacino e di versante)

Alla scala di bacino o di versante, il fiume perenne è in relazione continua con il corpo idrico sotterraneo, del quale riceve i contributi lungo determinati tratti fluviali, detti *drenanti*. Tali contributi hanno luogo attraverso sorgenti lineari diffuse lungo il corso d'acqua e identificabili dagli incrementi di portata da monte verso valle (Figura 52).

In un determinato segmento del corso d'acqua drenante è possibile misurare gli incrementi di portata tramite due o più misure eseguite in serie, come mostrato in modo schematico in Figura 52 (*Fiume drenante*) e in Figura 53 (*Fiume perdente*), tramite le misure Q_1 , Q_2 , Q_3 ²³

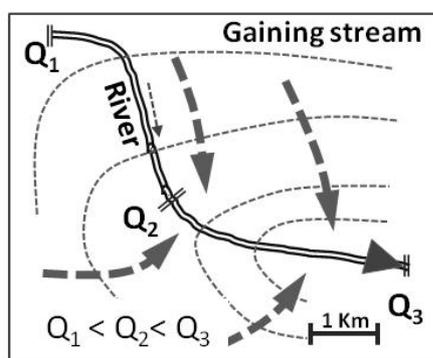


Figura 52 - Fiume drenante;

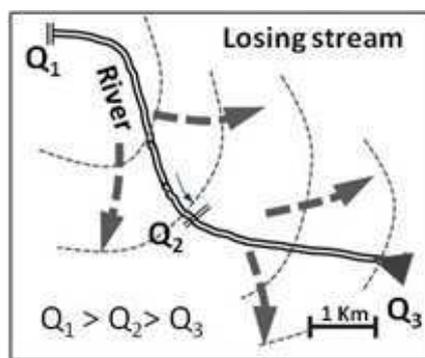


Figura 53 - Fiume perdente

Tramite le misure di portata Q_1 , Q_2 , Q_3 è possibile ricostruire gli incrementi o i decrementi di portata, individuare i luoghi di interazione e determinarne quantitativamente l'entità. E' possibile, inoltre, individuare la direzione di deflusso delle acque sotterranee da e verso il fiume.

Qualora il programma di monitoraggio lo preveda, è possibile ripetere stagionalmente la campagna di misura delle portate lungo lo stesso settore o tratto fluviale perdente o drenante, in modo da registrare le variazioni nel tempo della dinamica di interazione.

Qualora non sia possibile ripetere le misure con frequenza stagionale, è auspicabile almeno disporre di una misura di portata in periodo di massima magra (massimo esaurimento delle risorse idriche), per stimare sulla base delle portate minime i contributi del *flusso di base* nelle condizioni più critiche.

²³ Per approfondimenti sui criteri tecnici per l'esecuzione delle misure di portata si riporta ad es. il volume del World Meteorological Organization "Manual on stream gauging, Vol. II - Computation on discharge (2010)"

Livelli idrometrici (scala locale e di tratto fluviale²⁴)

Assieme alle misure di portata è necessario misurare le variazioni reciproche del livello di falda e del livello idrometrico del fiume e metterle in relazione con il ciclo idrologico afflussi/deflussi. A scala locale (es. 1:10.000 ÷ 1:1.000) è possibile eseguire profili idrogeologici trasversali del corridoio fluviale per evidenziare le relazioni geometriche tra la falda nella piana alluvionale e il livello del fiume (Figura 54), desumendo il verso di flusso delle acque da o verso il corpo idrico superficiale.

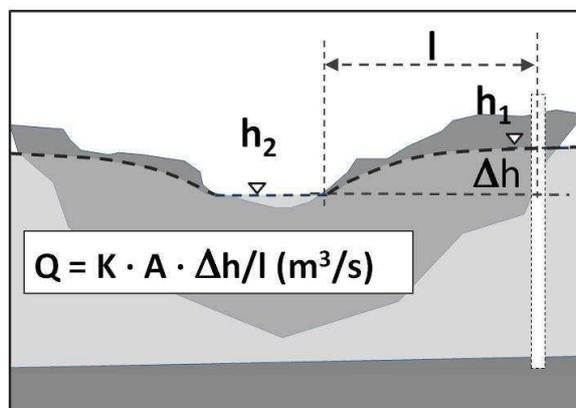


Figura 54 - Interazione acquifero-fiume lungo la sezione trasversale al fiume (da: Rosenberry and LaBaugh, 2008, modificato).

La misura dei livelli piezometrici nella piana fluviale o nelle aree adiacenti il corso d'acqua permette, entro certi limiti dettati dalle condizioni di eterogeneità dei sedimenti su cui scorre il fiume, di applicare la legge di Darcy. Essa permette il calcolo della portata della falda sotterranea che alimenta il fiume a partire dalla conoscenza dei gradienti idraulici lungo la direttrice di flusso acquifero-fiume (Δh), del coefficiente di permeabilità K (m/s) dell'acquifero lungo la direttrice, della sezione (A) attraverso cui filtrano i volumi di acqua che giungono al fiume, in base alla relazione di Figura 54.

Parametri chimico-fisici (scala di tratto fluviale e di unità geomorfologica)

Le caratteristiche chimico-fisiche di base delle acque sotterranee ($T^{\circ}C$, TDS, pH, Cloruri) differiscono da quelle superficiali e consentono il loro utilizzo per una prima caratterizzazione delle diverse matrici liquide superficiale e sotterranea.

Attraverso profili di dettaglio di temperatura dell'acqua lungo determinate sezioni fluviali, è possibile ad esempio individuare e cartografare i punti di filtrazione delle acque sotterranee attraverso la zona iporreica (Constantz and Thomas, 1997; Constantz *et al.*, 2003; Bayani & Cardenas, 2008). Analogamente, profili di conducibilità elettrica e di pH, forniscono indicazioni di dettaglio per localizzare i punti di filtrazione delle acque sotterranee nei corpi idrici superficiali.

Traccianti (scala locale)

L'uso di traccianti naturali o artificiali consente di individuare a scala di dettaglio le direzioni di deflusso delle acque sotterranee. Si tratta, come per i precedenti metodi di rilevamento basati sui parametri chimico-fisici, di analisi puntuali che danno informazioni relative a situazioni di dettaglio, particolarmente utili nel caso della individuazione dei circuiti preferenziali negli ambienti carsici e per lo studio della filtrazione degli inquinanti nel sottosuolo.

²⁴ In idromorfologia il tratto fluviale ha una estensione in lunghezza compresa all'incirca tra 5 ÷ 10 Km.

16.1.2 Misure indirette dell'interazione acquifero - fiume

Analisi dell'idrogramma (scala di bacino idrografico)

Le misure indirette forniscono indicazioni generalmente a piccola scala (ad es. alla scala di bacino o regionale: 1:25.000 ÷ 1:250.000), sulla base della analisi dei dati idrologici e meteo-climatici (deflussi, precipitazioni, temperatura dell'aria).

Alla scala di bacino idrografico, ad esempio, le misure di portata in uscita dal bacino consentono di ricostruire l'idrogramma giornaliero o mensile del corso d'acqua dalla cui scomposizione si possono distinguere i volumi idrici del flusso di base e di ruscellamento, relativi rispettivamente ai contributi di acque sotterranee e superficiali (Figura 55).

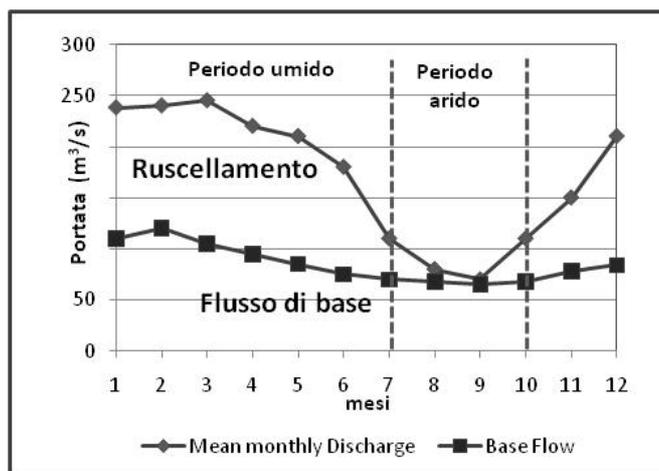


Figura 55 - Analisi dell'idrogramma: ruscellamento - flusso di base

Dall'idrogramma del corso d'acqua in una data sezione fluviale, che sottende il bacino idrogeologico a monte, è possibile analizzare le variazioni in volume del flusso di base rispetto al ciclo idrologico. È così possibile individuare i periodi in cui è prevalente il contributo di acque sotterranee (es. nei periodi di magra) e quelli in cui è prevalente quello relativo alle acque di ruscellamento (periodi umidi o di ricarica)

L'analisi delle variazioni temporali del flusso di base fornisce le indicazioni alla scala di bacino sull'interazione acque sotterranee-acque superficiali e sulla variazione nel tempo: il dato quantitativo che si ricava riguarda i contributi in acque sotterranee che il fiume riceve nel corso dell'anno. Questo dato viene desunto dalla portata totale attraverso l'*indice del flusso di base* (Fb_i):

$$Fb_i = Fb \text{ (volumi annui del flusso di base) / portata totale [\%]}$$

Bilancio idrologico (scala di bacino e di distretto)

Alla scala di bacino idrografico il bilancio idrologico consente di ricavare il valore della ricarica dell'acquifero dal valore di infiltrazione efficace, come visto al Paragrafo 5 del presente documento e nell'Allegato 2.

Quest'analisi consente inoltre di ottenere informazioni sull'assetto idrogeologico dell'acquifero in connessione col fiume (area di ricarica e punti di recapito delle acque sotterranee).

16.2 Rappresentazione dell'interazione acquifero - fiume

Il monitoraggio dei livelli piezometrici e della interazione acquifero-fiume tramite le misure di portata permette di cartografare la superficie piezometrica e di mettere in relazione le direttrici del deflusso delle acque sotterranee con i corpi idrici superficiali.

Tale monitoraggio, se ripetuto nel corso dell'anno, identifica le variazioni dei rapporti acquifero-fiume nel tempo. Il risultato delle attività di monitoraggio è rappresentato dalle carte dei livelli piezometrici (*idroisoipse*) e delle direzioni di flusso sotterraneo, che sovrapposte a quelle degli acquiferi e dei corpi idrici costituiscono le informazioni di base delle carte idrogeologiche (Figura 56 e Figura 57). I dati di monitoraggio, inoltre, permettono di ottenere i dettagli quantitativi della interazione acquifero-fiume. Nelle figure seguenti è mostrata in modo esemplificativo una possibile rappresentazione cartografica delle condizioni di interazione nel caso di un corso d'acqua drenante e perdente.

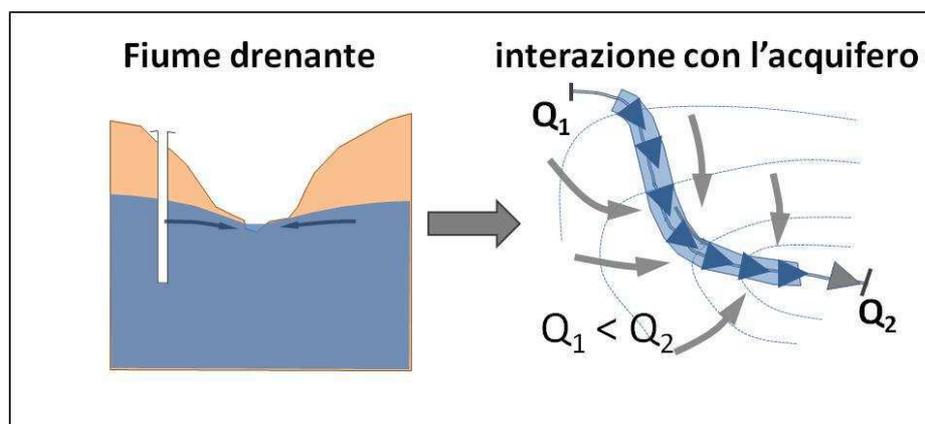


Figura 56 - Interazione acquifero-fiume: fiume drenante

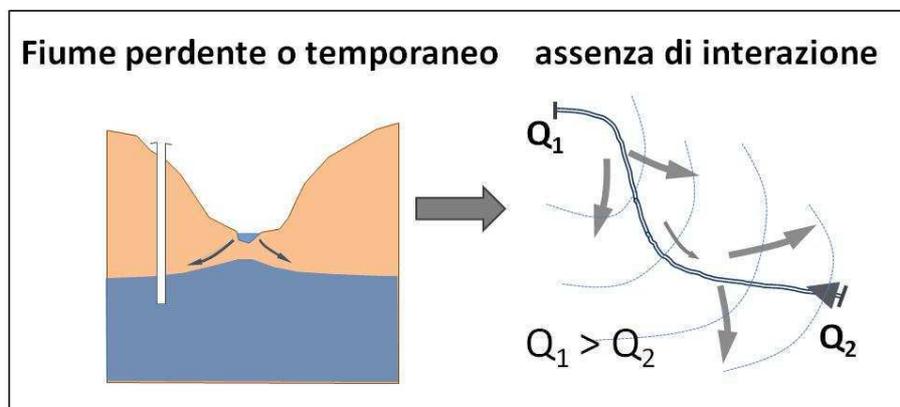


Figura 57 - Interazione acquifero-fiume: fiume perdente

La differenza tra i valori di portata [$Q_2 - Q_1$] di Figura 56 e Figura 57 rappresenta il valore quantitativo (volumi idrici) della interazione tra i corpi idrici superficiale e sotterraneo, al netto dei prelievi e delle derivazioni presenti tra le due sezioni considerate.

Alcuni approfondimenti sui temi relativi alla interazione acque superficiali - acque sotterranee sono contenuti nelle seguenti pubblicazioni: Environment Agency (2005) *Groundwater-surface water interactions in the hyporheic zone*; Gustard et al. (1992) *Low flow estimation*; Harvey & Bencala, (1993) *The Effect of streambed topography on surface - subsurface water exchange in mountain catchments*; Chen (2003) *Analysis of pumping-induced stream-aquifer interactions for gaining streams*; Williams (1983) *The role of the subcutaneous zone in karst hydrology*.

ACRONIMI

AGR: Available Groundwater Resources

AV: Alluvioni Vallive

CA: Calcari

CE: Commissione Europea

CIP: Coefficiente di Infiltrazione Potenziale

CIS: Common Implementation Strategy Groups for the Water Framework Directive

CN: *Curve Number*

CNA, CNB, CNC, CND: Valori del *Curve Number* per Gruppi Idrogeologici A, B, C, D

D.L.: Decreto Legge

D.M.: Decreto Ministeriale

DET: (Formazioni) Detritiche (degli altopiani plio-quadernari);

DMV: Deflusso Minimo Vitale

Dp: Deflusso idrico globale presunto

DQ: (Alluvioni nelle) Depressioni quadernarie

EC: European Commission

EFN: Environmental Flow Needs

ETR (ET): Evapotraspirazione Reale

GWD: Groundwater Directive

IARI: Indice di Alterazione del Regime Idrologico

Ie: Infiltrazione efficace

IHA: Indicators of Hydrologic Alteration

LOC: (Acquiferi) Locali

LTAA: Long Term Annual Average

LTAAR: Long-term annual average recharge

LTAAQ: Long-term annual average abstraction

OCSE: Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OECD)

Pe: Precipitazione Efficace

STE: (Formazioni) Sterili

SIMN: Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale

TDS: Total Dissolved Solids

VU: Vulcaniti

WFD: Water Framework Directive

WMO: World Meteorological Organization

GLOSSARIO

Acquifero: formazione rocciosa di notevole estensione e potenza, permeabile e che permette il deflusso significativo di una falda idrica sotterranea e la captazione di quantità apprezzabili d'acqua (Castany, 1982);

Acquifero ex D.Lgs. 30 del 16.3.2009: uno o più strati sotterranei di roccia o altri strati geologici di permeabilità sufficiente da consentire un flusso significativo di acque sotterranee o l'estrazione di quantità significative di acque sotterranee;

Acquifero a falda libera: acquifero che non ha un limite superiore impermeabile, dove il pelo libero dell'acqua di falda è in equilibrio con la pressione atmosferica nella zona insatura dell'acquifero e può liberamente fluttuare sulla base delle condizioni idrodinamiche esistenti; la superficie piezometrica rappresenta pertanto il limite superiore della falda idrica sotterranea;

Acquifero a falda imprigionata: acquifero il cui limite superiore è di tipo geologico impermeabile; le acque, ovvero la falda idrica, sono imprigionate nella formazione idrogeologica permeabile tra due formazioni impermeabili, il substrato ed il tetto. La falda idrica subisce una pressione diretta verso l'alto pari al carico idraulico cui è sottoposta;

Bilancio idrico: comparazione, nel periodo di tempo considerato, fra le risorse idriche (disponibili o reperibili) in un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, al netto delle risorse necessarie alla conservazione degli ecosistemi acquatici ed i fabbisogni per i diversi usi (esistenti o previsti); (D.M. 28 Luglio 2004);

Bilancio idrologico: comparazione, nel periodo di tempo considerato e con riferimento ad un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, tra afflussi e deflussi naturali, ovvero deflussi che si avrebbero in assenza di pressione antropica; (D.M. 28 Luglio 2004);

Corpo idrico sotterraneo: volume distinto di acque sotterranee contenuto da uno o più acquiferi; (CE/2000/60 "WFD");

Epicarso: fascia superficiale di alterazione della roccia al di sotto del suolo, caratterizzata da un diffuso carsismo nelle microfessure e fratture della roccia, grazie alla circolazione delle acque di precipitazione con carattere 'aggressivo' dovuto alla presenza di CO₂ di origine organica (v. Klimchouk, 2004).

Evapotraspirazione reale: Volume totale di evaporazione dal suolo, dalle aree umide e dai corpi idrici superficiali naturali e di traspirazione dalle piante. In accordo con la definizione fornita in Idrologia, l'evapotraspirazione generata dalle attività umane è esclusa, con l'eccezione dell'agricoltura non irrigata e delle attività forestali.

L'Evapotraspirazione reale media su lungo termine (*Long-term annual average ETR*) è l'evapotraspirazione reale misurata su un periodo di almeno 20 anni consecutivi di registrazioni;

Falda idrica: volumi idrici immagazzinati all'interno della roccia serbatoio di un determinato acquifero; rappresenta la frazione mobile ed estraibile di tutta l'acqua contenuta nel serbatoio idrogeologico sotterraneo (Castany, 1982); le manifestazioni sorgentizie (che rappresentano il livello di base) costituiscono i punti di affioramento in superficie delle acque di falda (Regione Lazio, 1980);

Groundwater dependent terrestrial ecosystems test = Significant damage to groundwater dependent terrestrial ecosystems resulting from an anthropogenic water level alteration ("[Verifica dei] Danni rilevanti agli ecosistemi terrestri che dipendono dalle acque sotterranee, risultanti da una alterazione antropica del livello di falda");

Idrostruttura (o Struttura idrogeologica): complesso geologico uniforme dal punto di vista dei parametri idrogeologici, quali permeabilità e capacità di immagazzinamento delle acque; essa è definita da limiti fisici riconoscibili e cartografabili che circoscrivono l'area di ricarica

entro cui le precipitazioni liquide o solide alimentano l'infiltrazione efficace, e da punti di recapito (sorgenti localizzate e sorgenti lineari lungo i fiumi) delle acque sotterranee;

Infiltrazione efficace: aliquota dell'acqua di precipitazione che cade su un determinato territorio che alimenta la ricarica dell'acquifero; è calcolabile tramite le analisi di bilancio idrologico a partite dai termini noti di Precipitazione, Evapotraspirazione reale, Deflusso superficiale (ruscellamento);

Litologia: insieme dei caratteri fisico-chimici che definiscono l'aspetto e le caratteristiche di una roccia (colore, tessitura, struttura, granulometria, fatturazione; Regione Lazio, 1980);

Livello piezometrico: il livello piezometrico in idrologia è definito dalla quota (elevazione al di sopra del livello del mare) del livello dell'acqua nel sottosuolo (H, m s.l.m.; Castany, 1982);

Piezometria: rappresentazione su mappe idrogeologiche (o sul modello idrogeologico concettuale o numerico) o tramite rappresentazioni grafiche ed elaborazioni statistiche della superficie piezometrica elaborata sulla base dei dati di livello piezometrico;

Prelievi: quantità di acqua derivata da un corpo idrico (D.M. 28 Luglio 2004);

Risorse idriche: volumi di acque sotterranee naturalmente rinnovabili ad opera della ricarica degli acquiferi; rappresentano le acque che possono essere utilizzate senza intaccare il naturale equilibrio quantitativo di ricarica-esaurimento annuo delle risorse;

Risorse idriche disponibili: ricarica dell'acquifero meno le portate medie su lungo termine necessarie al raggiungimento degli obiettivi di qualità ecologica delle acque superficiali connesse con il corpo idrico sotterraneo. Questi volumi idrici tengono in conto le restrizioni imposte per i prelievi di risorse idriche sotterranee. I volumi massimi teorici delle risorse idriche disponibili per i prelievi corrispondono ai volumi della ricarica dell'acquifero. Le risorse idriche variano nel tempo in funzione dell'entità delle precipitazioni meteoriche (ricarica), determinando le oscillazioni del livello piezometrico della falda, proporzionali alla quantità di risorse immagazzinate;

Riserve idriche: acque sotterranee immagazzinate al di sotto del livello di base dell'acquifero; rappresentano una scorta solo teoricamente utilizzabile, compatibilmente con la capacità di ricarica del serbatoio idrogeologico;

Salienza: altezza (in m) del livello di falda al di sopra della superficie topografica. Indica generalmente che l'acquifero è a falda confinata. Per convenzione, al contrario della *soggiacenza*, assume valori negativi;

Saline or other intrusion test = *Regional saline or other intrusions resulting from anthropogenically induced sustained changes in flow direction.* ([Verifica della] Intrusione salina o di altro tipo, a scala regionale, risultante da variazioni antropiche su lungo termine delle direzioni di deflusso sotterraneo delle acque);

Soggiacenza = distanza (in m) tra la superficie topografica e la superficie piezometrica;

Superficie piezometrica = la superficie piezometrica rappresenta la distribuzione dei carichi idraulici di una falda in una determinata porzione dell'acquifero. Essa separa la zona di saturazione dalla zona areata (insatura) della roccia serbatoio in acquiferi a falda libera.

“Tale superficie a scala regionale è più o meno regolare e continua, in relazione alla densità delle fessure intercomunicanti presenti nella roccia. Localmente, la superficie piezometrica presenta una morfologia complessa a causa della eterogeneità litologica e della anisotropia delle rocce carsificabili e non” (da: Regione Lazio, 1980);

Surface water test = *Failure to achieve Environmental Objectives (Article 4 WFD) for associated surface water bodies resulting from anthropogenic water level alteration or change in flow conditions; significant diminution of the status of surface waters resulting from anthropogenic water level alteration or change in flow conditions* (Mancato raggiungimento degli obiettivi ambientali per le acque superficiali connesse, di cui all'Art. 4 della Direttiva Quadro Acque, a causa di alterazione antropiche dei livelli delle acque sotterranee o di variazioni nelle condizioni di deflusso delle acque. Significativa riduzione dello stato delle

acque superficiali connesse a causa di alterazioni di livello o variazioni di flusso delle acque sotterranee);

Water balance test = *Exceedance of available groundwater resource by long-term annual average rate of abstraction that may result in a decrease of groundwater levels* (Superamento su lungo termine delle risorse idriche disponibili da parte dei prelievi, che si può manifestare con il decremento dei livelli delle acque sotterranee).

BIBLIOGRAFIA

- Barazzuoli P., Capacci F., Migliorini J., Rigati R., 2006. *Studio per la definizione del Bilancio idrico e Idrogeologico del Bacino del Fiume Roja. Sintesi Relazione Finale, Siena Luglio 2006*. Università degli studi di Siena. Dip. Di Scienze della Terra (PIC INTERREG III A 2000-2006 Alcotra). (http://eureaupa.provincia.imperia.it/webservice/eureaupa_dvd/DVD_Eurobassin/Relazioni/sintesi/Sintesi_finale_Universit%C3%A0_di_Siena.pdf)
- Bayani M. Cardenas (2008) - *Surface water-groundwater interface geomorphology leads to scaling of residence times*; Hydrology and Land Surface Studies; Geophysical Research Letters - [Volume 35, Issue 8](#), April 2008
- Boni C, Petitta M, Preziosi E, Sereni M. 1993a-A. *Genesi e regime di portata delle acque continentali del Lazio*. Roma, CNR – Italian National Research Council.
- Boni CF, Mastrorillo L, Petitta M, 1993b-B. *Scomposizione della portata dei corsi d'acqua dell'Appennino Marchigiano con il metodo delle portate mensili caratteristiche*. Geologia Applicata e Idrogeologia, 28, Bari, 121-129.
- Bordi I., K. Fraedrich, J.-M. Jiang, and A. Sutera, 2004. *Spatio-temporal variability of dry and wet periods in eastern China*. Theor. Appl. Climatol. (2004) Springer-Verlag 2004 DOI 10.1007/s00704-004-0053-8.
- Braca G., 2008 *Stage-discharge relationship in open channels: practice and problems*. Foralps project, Trento, Marzo 2008 ISBN 978-88-8443-230-8.
- Braca G., Bussetini M., Lastoria B., Mariani S. (2013) – *Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*; ISPRA, Manuali e Linee Guida 84/13 ISBN 978-88-448-0584-5
- Buchanan, TJ. and W.P. Somers, 1969. *Discharge measurements at gauging stations. Techniques of Water resources investigations*. Chapter A8, Bock 3, Applications of Hydraulics. U.S. Geological Survey.
- Bussetini M., Percopo C., Lastoria B., Mariani S. (2014) *A Method for Characterizing the Stream Flow Regime in Europe*. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 3 Springer (Springer International Publishing), 2015 ISBN 978-3-319-09054-2
- Capelli G. & Mazza R., 2009 – *Carte idrogeologiche regionali in Italia*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (2009) DOI: 10.4408/IJEGE.2009-01.O-03 3:53-68.
- Castany G., 1982 – *Principes et methods de l'hydrogeologie*. Dunod Université, Bordas, Paris.
- Celico P., 1988 – *Prospezioni Idrogeologiche*, Vol. I e Vol. II; Liguori ed. Napoli ISBN 88 207 15600.
- Chen, X., 2003. *Analysis of pumping-induced stream-aquifer interactions for gaining streams*. J. Hydrology 275, 1–11.
- Cicogna A., Massimo Centor M., Farre A., Micheletti S., Stel F. (2008) *Atlante Climatico del Friuli Venezia Giulia - ARPA FVG - Via Cairoli, 14-33057 Palmanova (UD)* <http://www.agrometeorologia.it/documenti/Aiam2008/22AtlantePiogge.pdf>
- Cicogna A., Dietrich S., Gani M., Giovanardi R., Sandra M., (2008) online - *Stima della bagnatura fogliare attraverso misure radar in vista dell'applicazione di modelli epidemiologici territoriali*. Website: <http://www.isloprada.eu>

-
- CIS Guidance Document No. 6, 2011 - *Technical Report On Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*, Technical Report No. 6, 2011 (ISBN : 978-92-79-21692-3)
- CIS Guidance Document No. 15, 2007 – *Guidance on Groundwater Monitoring*. Technical report 2007-002.
- CIS Guidance Document No. 18, 2009 – [Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment](#). Technical report 2009-026
- Constantz J., Tyler S.W. and Kwicklis E. 2003. *Temperature-profile methods for estimating percolation rates in arid environments*. *Vadose Zone Journal* **2**: 12–24.
- Constantz, J. and Thomas, C.L., 1997. *Stream bed temperature profiles as indicators of percolation characteristics beneath arroyos in the middle Rio Grande Basin, USA*. *Hydrological Processes*, **11**, 1621- 1634.
- Craig M. and Daly D., 2010 – [Methodology for Establishing groundwater threshold values and the assessment of chemical and quantitative status of groundwater, including an assessment of pollution trends and trend reversal](#) – Environmental Protection Agency - Hydrometric and Groundwater Section, Office of Environment Assessment, 2010 Ireland.
- Cucchi F., Piano C., Marinetti E., Massari G., Oberti S., Zini L. (2000). *Studies for the realization of the Hydrogeological map of Friuli Venezia Giulia* – *Ipogea*, **3**: 57-71
- Darcy H., 1856 - *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau*; V. Dalmont, Paris.
- De Breuck W., 1991 - *Hydrogeology of Salt-Water Intrusion: Methods and Instruments*. Verlag Heinz Heise GmbH & Co KG, Hannover, Germany, pp 223. Fletcher G. Driscoll.
- Doorenbos J., W.O. Pruitt, 1977, *Guidelines for predicting crop water requirements*, FAO-ONU, Rome, Irrigation and Drainage Paper no. 24 (rev.), 144 pp.
- Du J., Jian Fang , Wei Xu, Peijun Shi; 2012. *Analysis of dry/wet conditions using the standardized precipitation index and its potential usefulness for drought/flood monitoring in Hunan Province, China*; *Stoch Environ Res Risk Assess* , Springer_Verlag DOI 10.1007/s00477-012-0589-6.
- Environment Agency (2005) - *Groundwater–surface water interactions in the hyporheic zone* Environment Agency, Science Report SC030155/SR1, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD. www.environment-agency.gov.uk ISBN: 1844324257 (https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291492/scho0605bjcq-e-e.pdf).
- European Commission, 2000 – *Directive 2000/60/EC of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy*; OJ L 327, 22.12.2000, pp 1-72 (European Parliament and Council).
- European Commission, 2003 - [Monitoring under the Water Framework Directive](#), Guidance Document No. 7, Technical Report ISBN 92-894-5127- 0 European Communities 2003.
- European Commission, 2006 – *Directive 2006/118/EC of 12 December 2006 on the protection of the groundwater against pollution and deterioration*; OJ L 372, 27.12.2006, pp 19-31 (European Parliament and Council).
- European Commission, 2007 – [Guidance on Groundwater monitoring](#), Guidance Document No. 15 Technical Report N. 002 – 2007. ISBN 92-79-04558-X. European Communities, Luxembourg.

-
- European Commission, 2009 – [Guidance on Groundwater Status and Trend Assessment](#), Guidance Document No. 18 Technical Report N. 026 – 2009. ISBN 978-92-79-11374-1. European Communities, 2009 Luxembourg.
- European Commission, 2010 – [Guidance on Risk Assessment and the Use of Conceptual Models for Groundwater](#), Guidance Document No. 26 Technical Report N. 026 – 2010. ISBN-13 978-92-79-16699-0. European Communities, 2010 Luxembourg.
- European Commission, 2011. CIS Guidance Document No. 6. *Technical Report On Groundwater Dependent Terrestrial Ecosystems*, Technical Report No. 6 (ISBN : 978-92-79-21692-3)
- Eurostat (Nagy M., Lenz K., Windhofer G., Fürst J, Fribourg-Blanc B.) 2008 - *Data Collection Manual for the OECD/Eurostat Joint Questionnaire on Inland Waters*.
http://ec.europa.eu/eurostat/ramon/coded_files/OECD_ESTAT_JQ_Manual_version_2_21.pdf
- FAO (Food and Agriculture Organization (2006) – *FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 'Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*; FAO, February 2006
<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>
- Farina M., Marcaccio M., Zavatti A., 2014. *Esperienze e prospettive nel monitoraggio delle acque sotterranee. Il contributo dell'Emilia-Romagna*. Pitagora ed., Bologna, 560pp. (ISBN 88-371-1859-7).
- Fekete B.M, Vörösmarty C.J., Roads J.O., and Willmott C.J., 2004: *Uncertainties in Precipitation and Their Impacts on Runoff Estimates*. J. Climate, 17, 294–304.
- Fischer T., Gemmer M., Su B., Scholten T., 2013 - *Hydrological long-term dry and wet periods in the Xijiang River basin, South China*; Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, 135–148, 2013 doi:10.5194/hess-17-135-2013.
- Gleeson T., Befus K.M., Jasechko S., Luijendijk E. and Cardenas M.B., 2015. *The global volume and distribution of modern groundwater*. Nature Geoscience 9, 161–167 (2016) doi:10.1038/ngeo2590.
- Gustard, A.; Bullock, A.; Dixon, J. M.. *1992 Low flow estimation in the United Kingdom*. Wallingford, Institute of Hydrology, 88pp ISBN 0- 948540- 45- 1.
- Harvey, J.W., and Bencala, K.E., 1993 - *The Effect of streambed topography on surface-subsurface water exchange in mountain catchments*. Water Resources Research, 29, 89-98.
- Huh S, Dickey DA, Meador MR, Ruh KE. 2005. *Temporal analysis of the frequency and duration of low and high streamflow: years of record needed to characterize streamflow variability*, Journal of Hydrology 310, 78–94.
- Irpi-CNR (2013): *Piano e Sistemi di Monitoraggio per la Prevenzione del Rischio Idrogeologico: Alluvioni e Siccità* (Siccità e Cambiamenti climatici, Rapporto di Attività, 2011); POR-FESR 2007/2013 - Asse II, Attività a1), azione n° 4.
- ISPRA 2014 - [Progettazione di reti e programmi di monitoraggio delle acque ai sensi del D.Lgs 152/2006 e relativi decreti attuativi](#). Sistema Nazionale per la Protezione dell' Ambiente. Delibera del Consiglio federale delle Agenzie Ambientali. Seduta del 30 giugno 2014 Doc. no. 42/14-CF ISBN 978-88-448-0677-4.
- ISPRA, 2011, *Implementazione della Direttiva 2000/60/CE. Analisi e valutazione degli aspetti idromorfologici. Versione 1.1*. Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma.

-
- ISPRA, 2013. [*Linee guida per l'analisi e l'elaborazione statistica di base delle serie storiche di dati idrologici*](#). Manuali e Linee Guida 84/2013. A cura di G. Braca et al. ISBN 978-88-448-0584-5.
- Klimchouk A.B., 2004 – *Towards defining, delimiting and classifying epikarst: its origin, processes and variants of geomorphic evolution*. In: Jones, W.K., Culver, D.C. & Herman, J.S. (Eds.) – Epikarst. Special Publication 9. Charles Town, WV: Karst Waters Institute: 23-35.
- Martarelli L., Petitta M., Scalise A.R., Silvi A., 2008 - *Cartografia idrogeologica sperimentale della Piana Reatina (Lazio)*; Mem. Descr. Carta Geol. d'It. LXXXI (2008), pp. 137-156, figg. 4, tab. 1.
- Mouton J., Mangano F., Fried J.J. (1982) – *Studio delle risorse in acque sotterranee dell'Italia*. Th Schafer GmbH. D. 3000 – Hannover
http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/groundwatercd/PDFs%5Cstudio%20sulle%20risorse%20-%20Italia.pdf.
- Preziosi E. e Romano E., 2009; *Dall'analisi idrostrutturale allo studio modellistico di acquiferi regionali*; Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 1 (2009); DOI: 10.4408/IJEGE.2009-01.O-10.
- Raudkivi, A.J., and Callander, R.A., 1976. Analysis of groundwater flow. Edward Arnold, London, 214pp.
- Regione Emilia-Romagna, 2015. Delibera di Giunta n. 1781, “Aggiornamento del quadro conoscitivo di riferimento (carichi inquinanti, bilanci idrici e stato delle acque) ai fini del riesame dei Piani di Gestione Distrettuali 2015-2021”; All. 5 - Valutazione dello stato delle acque sotterranee, A cura di Donatella Ferri e Marco Marcaccio.
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti/aggiornamento-del-quadro-conoscitivo-di-riferimento-carichi-inquinanti-bilanci-idrici-e-stato-delle-acque-ai-fini-del-riesame-dei-piani-di-gestione-distrettuali-2015-2021>
- Regione Emilia–Romagna, 2010. Delibera di Giunta n. 350, “Approvazione delle attività della Regione Emilia–Romagna riguardanti l’implementazione della Direttiva 2000/60/CE ai fini della redazione ed adozione dei Piani di Gestione dei Distretti idrografici Padano, Appennino settentrionale e Appennino centrale.
<http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/temi/piani%20di%20gestione>
- Regione Lazio, 1980 – *Al di là della preistoria*. EPT Latina, Amm. Prov. Latina, “*Turismo scolastico, Itinerari*”, Vol. 8 Latina (P. Bono, G. Capelli, G. Civitelli, G. Mariotti, M. Parotto, P. Fano, G. Ventura).
- Richter B.D., Baumgartner J.V., Powell J., Braun D.P., 1996 – *A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems*, Conservation Biology, 10, 1163–1174.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Braun, D.P., and Powell, J. (1998). [*A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network*](#). Regulated Rivers: Research & Management, 14, 329-340
- Rosenberry, D.O., and LaBaugh, J.W., 2008, *Field techniques for estimating water fluxes between surface water and ground water*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 4–D2, 128 p.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS (v. 2.2.2). *Hydrologic modelling system* (HEC-HMS)
- USDA SCS (Soil Conservation Service). (1972) *SCS National Engineering Handbook. Section 4, Hydrology*. Washington, DC: USDA.
- UKTAG Paper 11b (ii), 2012 – [*Groundwater Quantitative Classification for the purpose of the Water Framework Directive*](#) . UK Technical Advisory Group, Feb 2012.
-

-
- Williams P.W., 1983 - *The role of the subcutaneous zone in karst hydrology*. Journal of Hydrology, 61: 45–67.
- Williams T.M., Epps T., Hitchcock D.R., Jayakaran A.D., Loflin D.R., Amatya D.M. (2000) *Curve number derivation for watersheds draining two headwater streams in lower coastal plain south carolina, USA*; Journal of the American Water Resources Association (JAWRA) 49(6): 1284-1295. DOI: 10.1111/jawr.12084
- Williams, J. R. 1995. *The EPIC model*. In *Computer Models of Watershed Hydrology*, 909-1000, ed. V. P. Singh. Highlands Ranch, Colo.: Water Resources Publications.
- Winter T. C., Harvey J. W., Lehn Franke O., Alley W.M., 1998 - *Ground Water and Surface Water: A Single Resource* , U.S. Geological Survey Circular 1139; Denver Colorado 1998.
- WMO - World Meteorological Organization, 1986 - *Level and discharge measurements under difficult conditions*, Operational Hydrology Report n. 24, n.650, Geneva.
- WMO - World Meteorological Organization, 2010a, *Manual on stream gauging Vol. I: Fieldwork*, Publ. N. 1044, ISBN 978-92-63-11044-2. Geneva.
(http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/stream_gauging/1044_Vol_I_en.pdf).
- WMO - World Meteorological Organization, 2010b – *Manual on stream gauging, Vol. II – Computation on discharge*, Publ. N. 1044, ISBN 978-92-63-11044-2, Geneva.
(http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/publications/stream_gauging/1044_Vol_II_en.pdf).



ISPRA
ARPA Campania
ARPAE Emilia-Romagna
ARPA Friuli Venezia Giulia
ARPA Liguria
ARPA Lombardia
ARPA Piemonte
ARPA Sardegna
ARPA Valle d'Aosta
ARPA Veneto