



# Valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee: applicazione all’acquifero della Piana d’Aosta

Gennaro Alberto Stefania<sup>(1)</sup>, Chiara Zanotti<sup>(1)</sup>, Marco Rotiroti<sup>(1)</sup>, Letizia Fumagalli<sup>(1)</sup>, Michele Bigoni<sup>(1)</sup>, Fulvio Simonetto<sup>(2)</sup>,  
Pietro Capodaglio<sup>(2)</sup>, Tullia Bonomi<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup>Dipartimento di Scienze dell’Ambiente e della Terra (DISAT), Università degli Studi di Milano – Bicocca

<sup>(2)</sup>Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Valle d’Aosta



**6° Convegno nazionale AIGA**  
**27-29 Giugno 2018**  
**Courmayeur**



# Premessa

- All'articolo 4 della **Direttiva Quadro sulle Acque** (Water Framework Directive – WFD, 2000/60/CE) stabilisce che:  
«gli Stati membri proteggono, migliorano e ripristinano i corpi idrici sotterranei, [...] al fine di conseguire un **buono stato**»



# Premessa

- All'articolo 4 della Direttiva Quadro sulle Acque (Water Framework Directive – WFD, 2000/60/CE) stabilisce che:

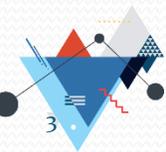
«gli Stati membri proteggono, migliorano e ripristinano i corpi idrici sotterranei, [...] al fine di conseguire un **buono stato**»



Tale **buono stato** deve essere raggiunto  
sia dal punto di vista **qualitativo** sia **quantitativo**  
in ciascun corpo idrico sotterraneo

Ai sensi della WDF:

lo **stato quantitativo** (**buono** o **scarso**) è riferito alla presenza di pressioni antropiche (intese come prelievi significativi) sul corpo idrico, ne consegue che l'assenza di prelievi garantisce uno stato quantitativo buono per definizione



# Premessa

- Sia la normativa nazionali sia la WFD (2000/60/CE) **non forniscono indicazioni** precise sul come valutare lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei.
- Al fine di colmare questo gap normativo **ISPRA**, in collaborazione con **ARPA**, ha emanato una recente **linea guida** dal titolo:

# Premessa

- Sia la normativa nazionali sia la WFD (2000/60/CE) **non forniscono indicazioni** precise sul come valutare lo stato quantitativo dei corpi idrici sotterranei.
- Al fine di colmare questo gap normativo **ISPRA**, in collaborazione con **ARPA**, ha emanato una recente **linea guida** dal titolo:

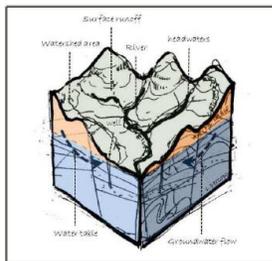
## *Criteri tecnici per l'analisi dello stato quantitativo e il monitoraggio dei corpi idrici sotterranei*

### Scopo:

- Criteri per la valutazione dello stato quantitativo
- Favorire l'omogeneizzazione dei metodi di lavoro a scala nazionale per una migliore confrontabilità dei risultati
- Favorire la progettazione di reti di monitoraggio ad hoc per lo stato quantitativo



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



MANUALI E LINEE GUIDA



# Obiettivi del lavoro

- Applicazione delle nuove linee guida ISPRA (2016) per la valutazione dello stato quantitativo delle acque sotterranee all'acquifero della Piana d'Aosta
- Valutazione della loro efficacia e praticità di applicazione ad un caso studio reale

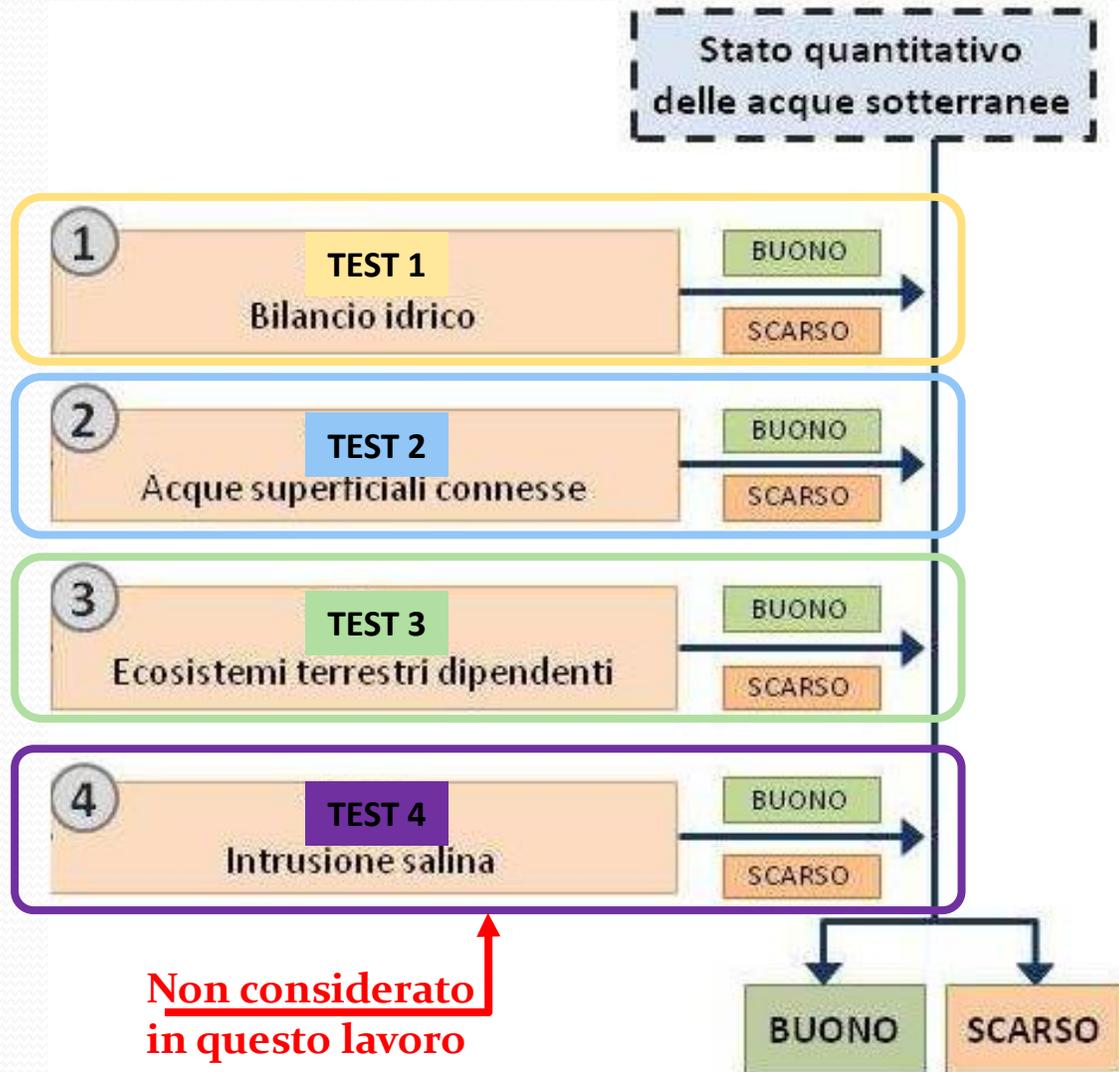
Il lavoro è stato eseguito nell'ambito della collaborazione tra

Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e della Terra  
Università degli Studi di Milano-Bicocca e

ARPA Valle d'Aosta



# Linee guida: struttura



- 4 Test
- Ogni test è svolto in modo indipendente
- Per ciascun test si esprime un giudizio:
  - **BUONO**
  - **SCARSO**
- Basate sul principio:
  - One out, all out»



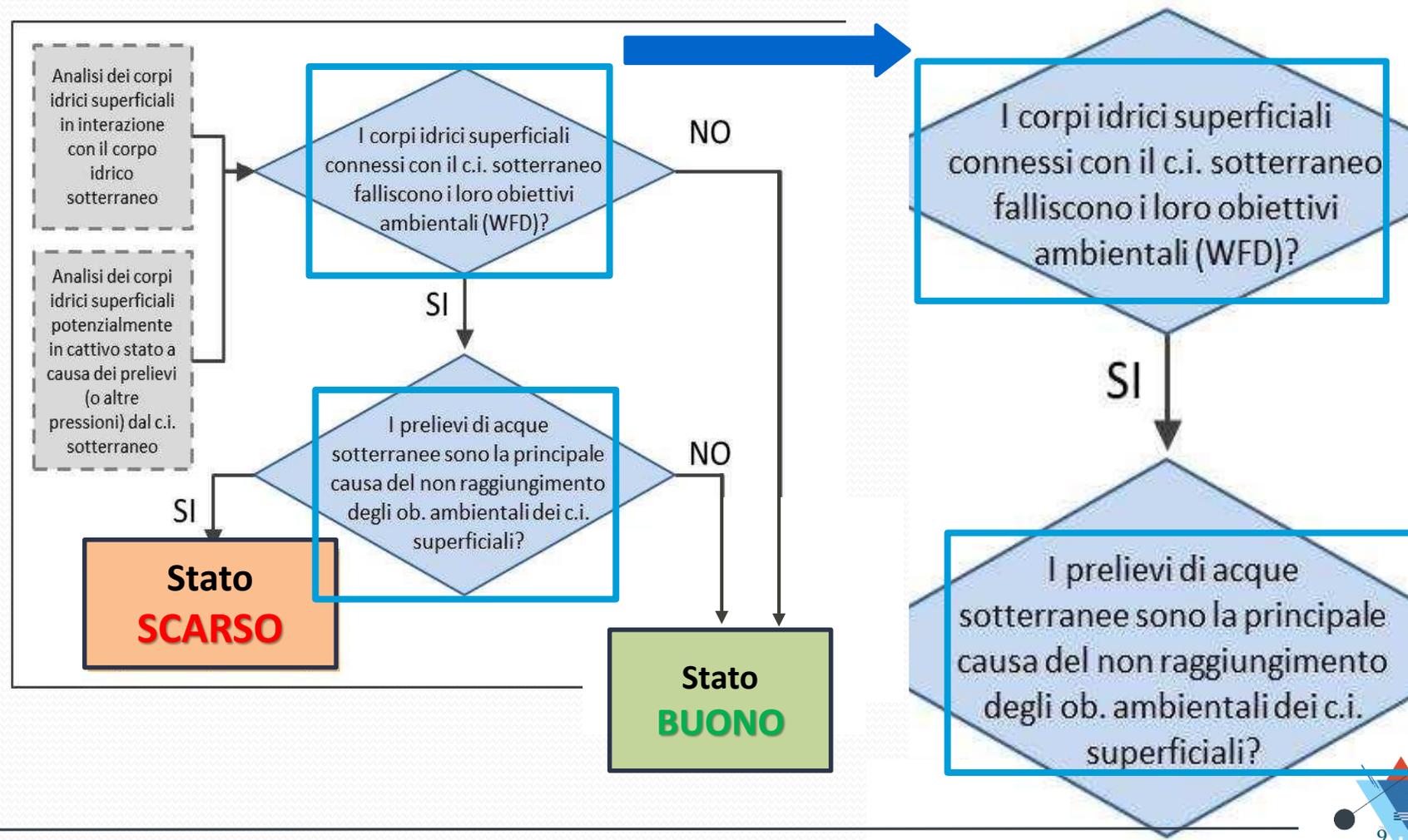
# Test 2: Acque superficiali connesse

- Indaga la responsabilità della falda nel fallimento degli obiettivi ambientali di un corpo idrico superficiale

Si esegue solo se:

Corpo idrico superficiale:

- è in connessione con la falda
- fallisce i propri obiettivi ambientali

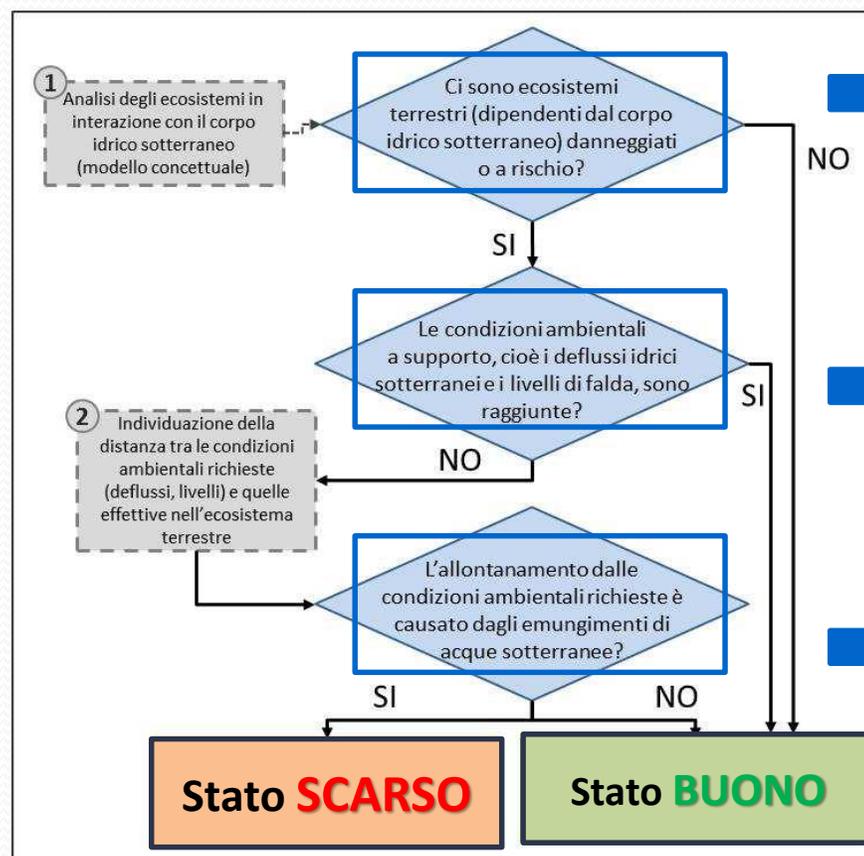


# Test 3: Ecosistemi terrestri dipendenti

- Indaga la responsabilità della falda nel cattivo stato di conservazione di un ecosistema terrestre dipendente

Si esegue solo se:

L'ecosistema è dipendente dalle acque sotterranee (aree umide, stagni, fontanili)

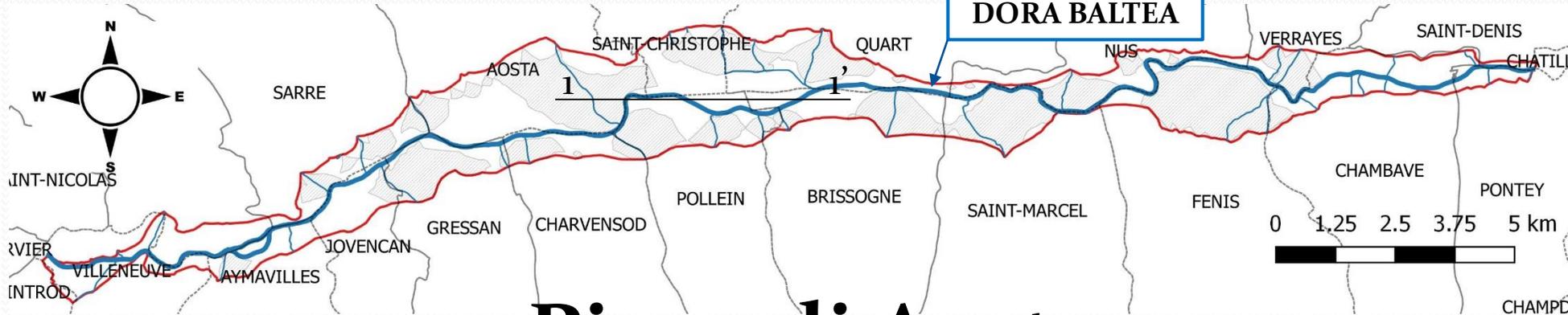
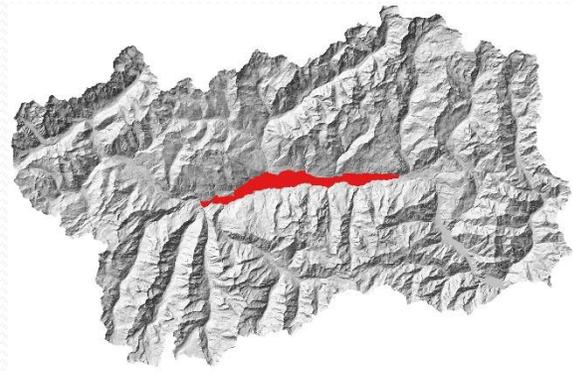


Ci sono ecosistemi terrestri (dipendenti dal corpo idrico sotterraneo) danneggiati o a rischio?

Le condizioni ambientali a supporto, cioè i deflussi idrici sotterranei e i livelli di falda, sono raggiunte?

L'allontanamento dalle condizioni ambientali richieste è causato dagli emungimenti di acque sotterranee?

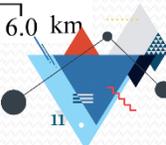
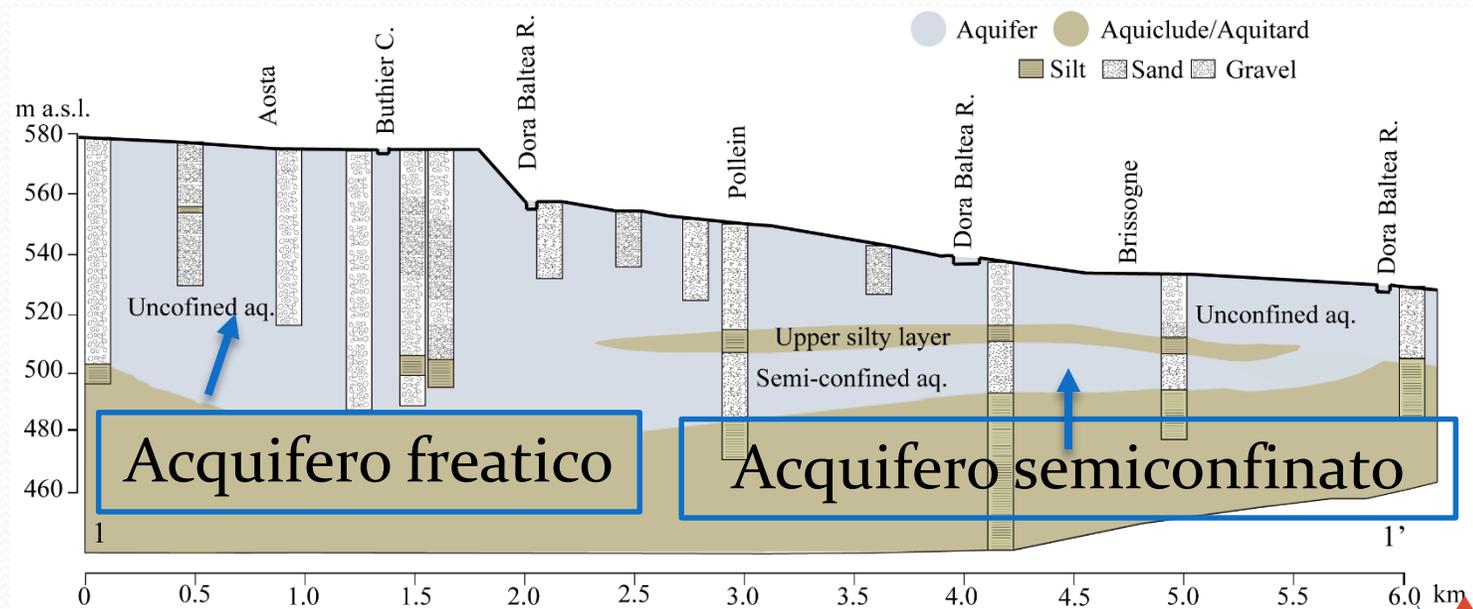
# Area di studio



## Piana di Aosta

### Acquifero della Piana di Aosta

- Estensione ~ 35 km x 2.5 km
- Acque superficiali
  - Dora Baltea + torrenti laterali
- Due sistemi idrogeologici
  - Acquifero freatico
  - Acquifero semi-confinato
- Forti relazioni di scambio tra acque sotterranee e superficiali
- Approvvigionamento idrico da pozzo



# Fasi di lavoro

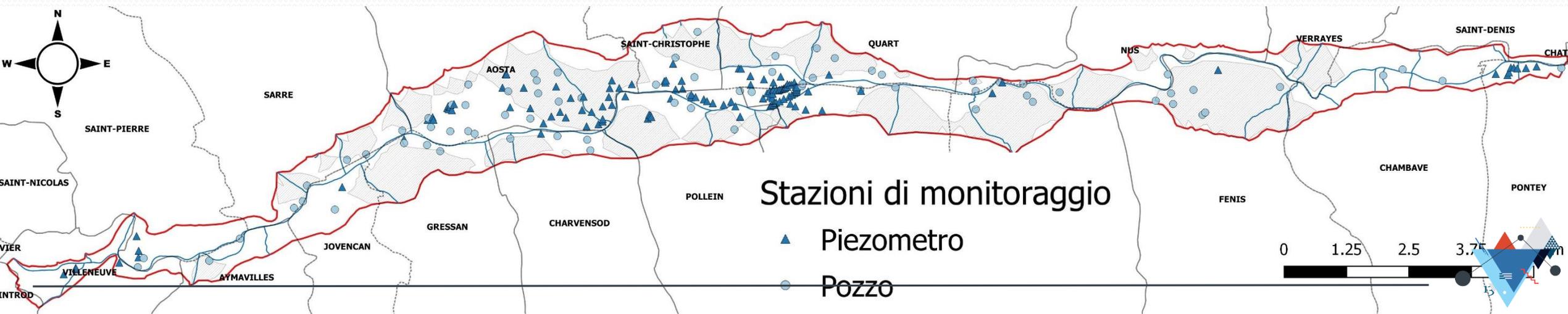
## Analisi di stato quantitativo:

- Test 1 – Bilancio idrico
- Test 2 – Acque superficiali connesse
- Test 3 – Ecosistemi terrestri dipendenti



# Raccolta dati

- Dati piezometrici forniti da ARPA VdA coprono il periodo compreso tra il 2000-2017
- 213 stazioni di monitoraggio



# Raccolta dati

Ai fini della valutazione dello Stato Quantitativo, le linee guida stabiliscono che le serie piezometriche per singolo pozzo devono:

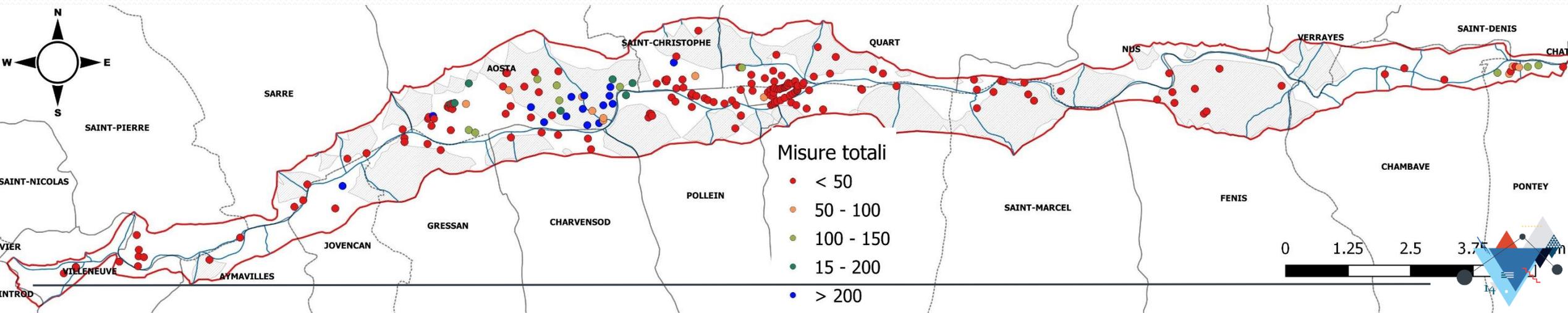
- Coprire 10-15 anni recenti
- monitoraggio mensile

In alternativa

- Coprire 6 anni recenti
- 2 misure all'anno

**Requisiti ideali**

**Requisiti minimi**



TEST 1

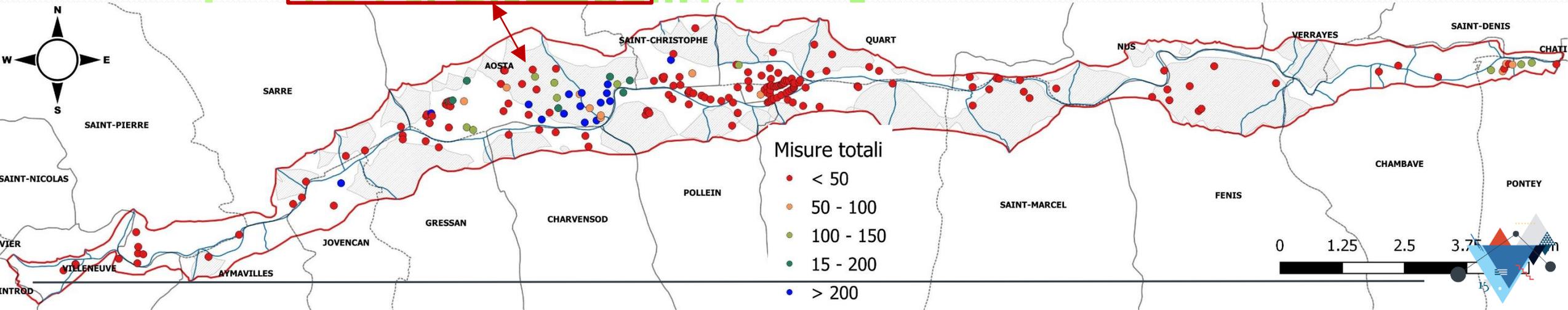
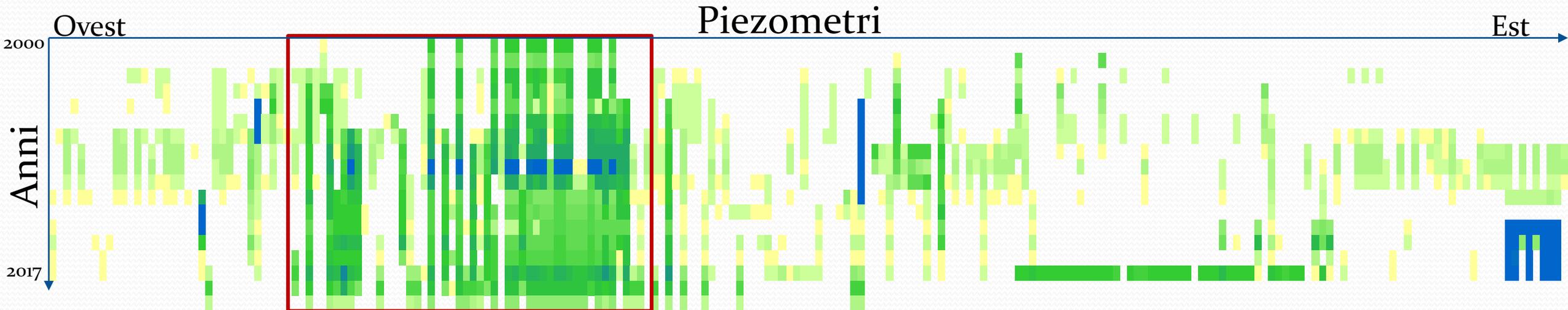
TEST 2

TEST 3

# Raccolta dati

## Dati piezometrici disponibili Piana d'Aosta

- 1 misura/anno
- 2-12 misure/anno
- 12-24 misure/anno



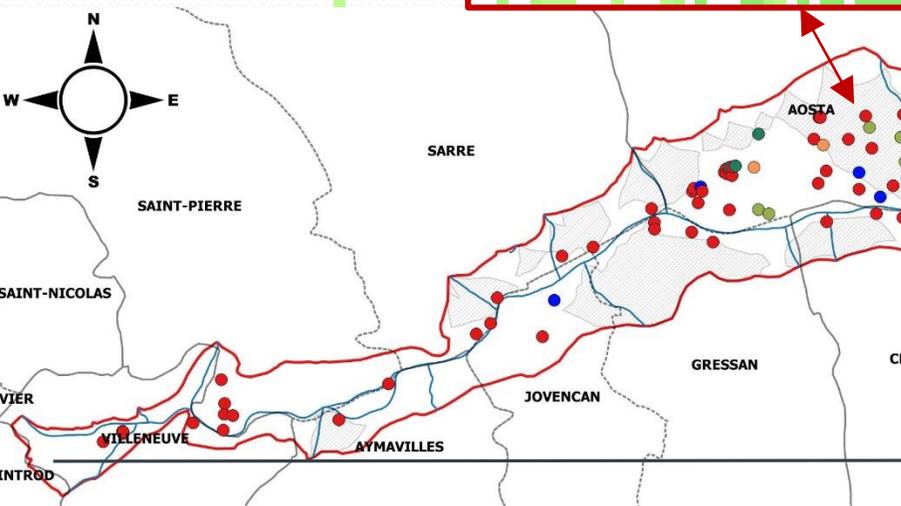
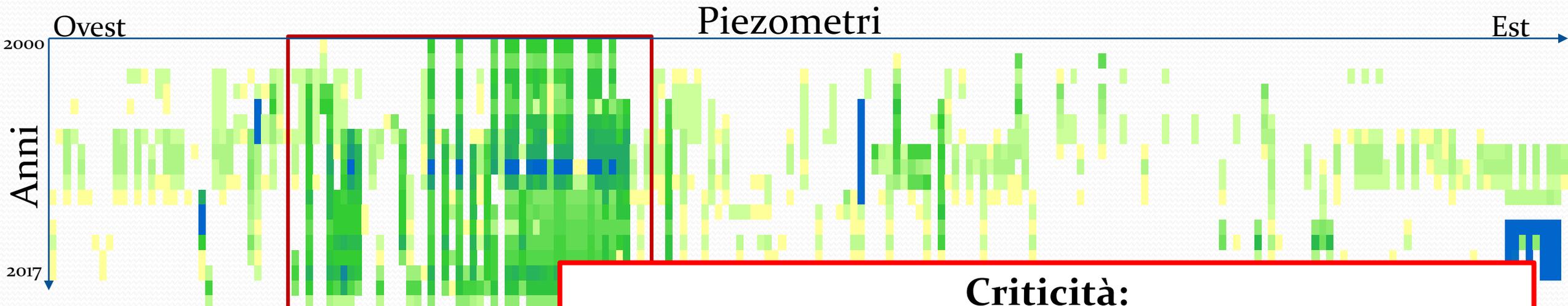
# Raccolta dati

## Dati piezometrici disponibili Piana d'Aosta

1 misura/anno

2-12 misure/anno

12-24 misure/anno



**Criticità:**  
**Poche serie soddisfano i requisiti delle linee guida!**  
 Serie piezometriche poco confrontabili per:

- Diversa frequenza di misura
- Diverso periodo di riferimento
- Diversa lunghezza della serie

• 15 - 200

• > 200

# Selezione dei dataset

Riduzione dei requisiti per la definizione del DATASET piezometrico

• Requisiti minimi

- 6 anni di misure recenti
- 2 misure all'anno



• Requisiti ridotti

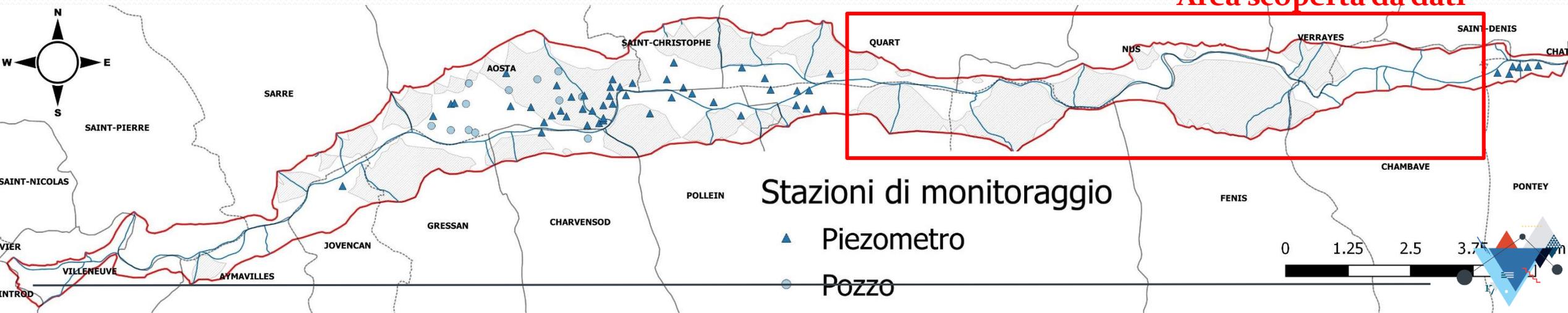
- Serie di almeno 4 anni
- Lunghezza almeno fino al 2014
- Continuità anche parziale

Da 213 stazioni



64 stazioni di monitoraggio

Area scoperta da dati



# Fase A: Analisi dei dati

## Analisi tendenza dei livelli di falda sulle 64 serie disponibili

### Ricerca outliers

- Metodo statistico
- Metodo grafico

### Retta di regressione

- Pendenza
- Variazione annua dei livelli piezometrici

### Test di Mann-Kendall

- Significatività della tendenza

ProUCL5.1

TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase A: Variazione annua dei livelli piezometrici

Ricerca outliers

Retta di regressione

Test di Mann-Kendall

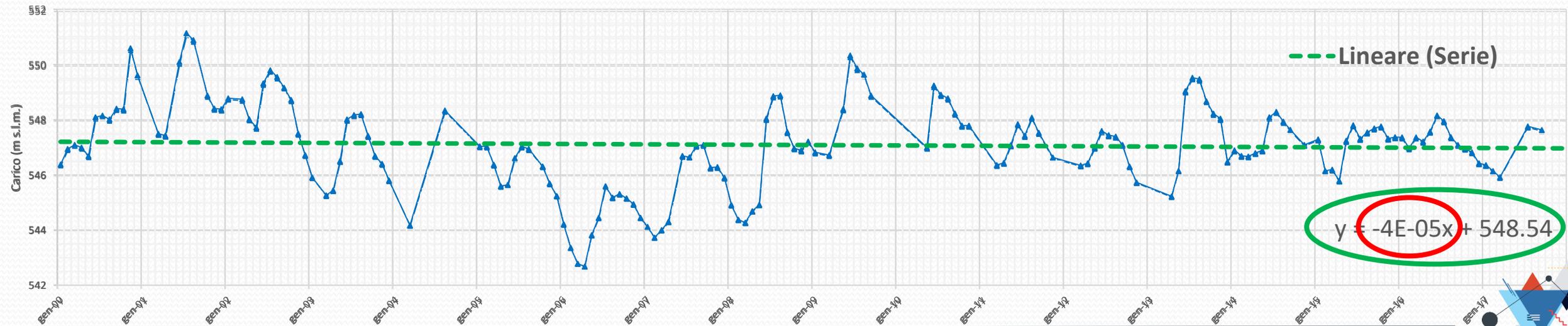
Per ciascuna delle 64 serie piezometriche

Grafici piezometria/tempo

Retta di regressione

Pendenza

Variazione in metri/anno



# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

- Test indicato dalle linee guida
- Stima quanto una serie storica si discosta da una serie ascendente (discendente) «perfetta»
- Confronta ogni dato della serie storica con tutti quelli che lo seguono, calcolando un parametro chiamato  $S$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{con} \quad \text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{se } x_j > x_k \\ 0 & \text{se } x_j = x_k \\ -1 & \text{se } x_j < x_k \end{cases}$$

- Test non-parametrico
- Basato sul ranking
- **Ipotesi nulla  $H_0$ :**
  - **non esistenza del trend**

## Vantaggi:

- utilizzabile anche con dati mancanti
- robusto rispetto agli outliers
- distribuzione normale non necessaria

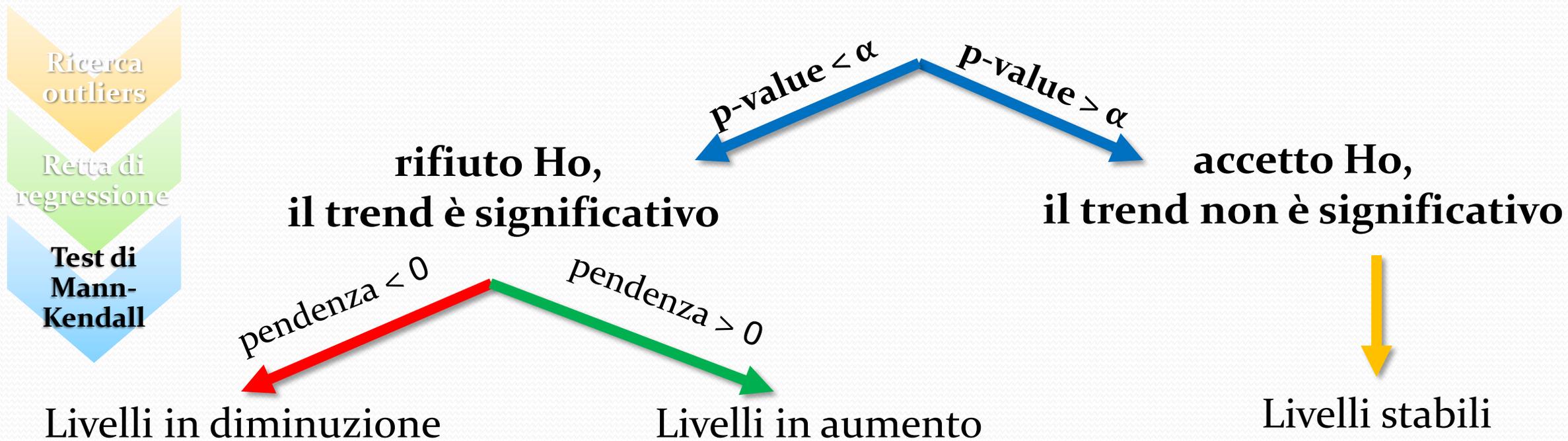
TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

Il p-value associato parametro  $S$  viene confrontato con  $\alpha = 0.05$  (significatività al 95%)



Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao46	-2182	0.0008	-3.52E-04	-0.128	Negativo

Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao15	1734	0.0109	1.59E-04	0.058	Positivo

Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao19	441	0.285	6.09E-05	0.022	Stabile

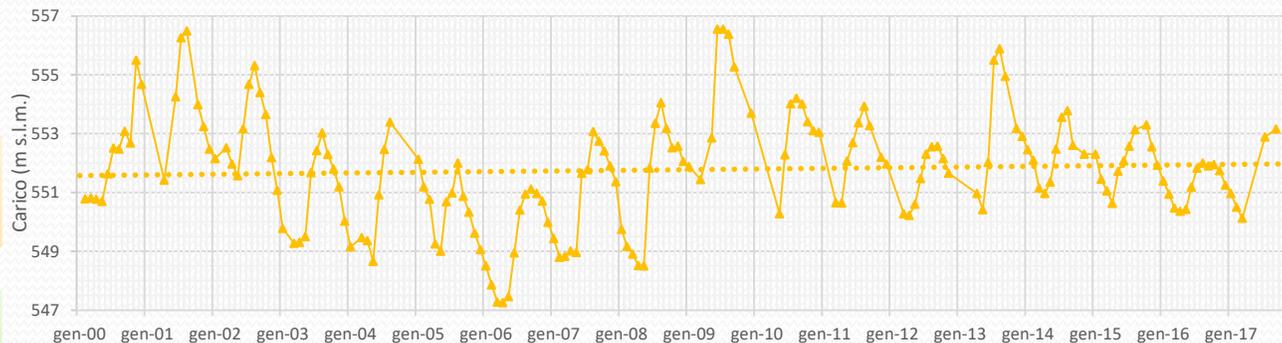
TEST 1

TEST 2

TEST 3

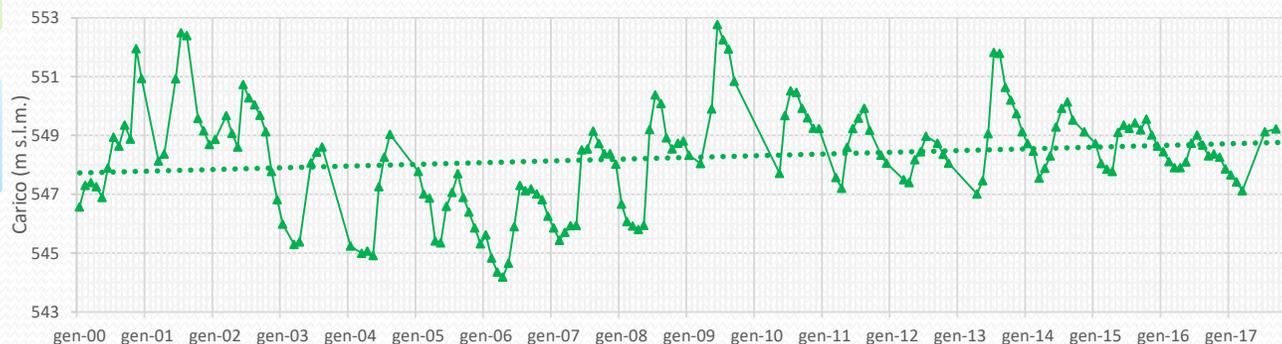
# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

## ...alcuni esempi



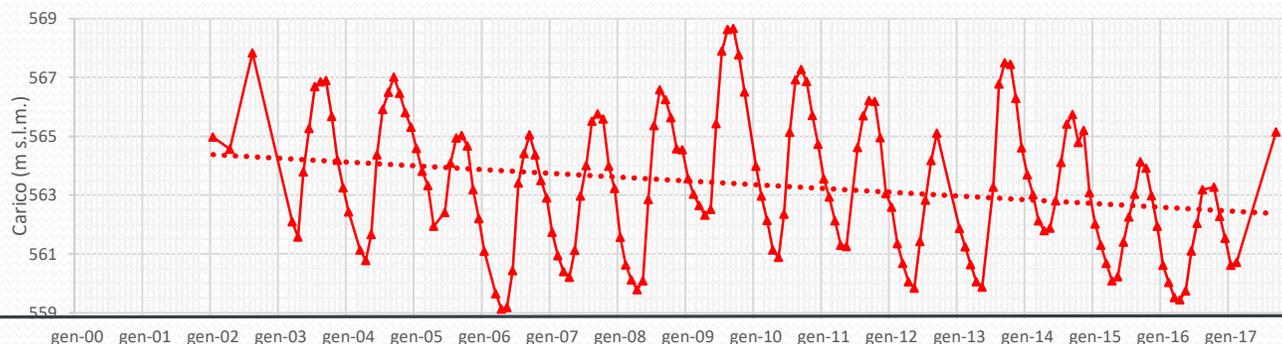
accetto  $H_0$ ,  
il trend non è significativo

Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao19	441	0.285	6.09E-05	0.022	Stabile



rifiuto  $H_0$ ,  
il trend è significativo

Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao15	1734	0.0109	1.59E-04	0.058	Positivo



rifiuto  $H_0$ ,  
il trend è significativo

Codice ente	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao46	-2182	0.0008	-3.52E-04	-0.128	Negativo

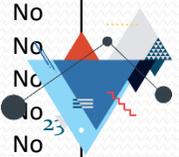
# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

## ...alcuni esempi



Codice ente	Inizio	Fine	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Jo02	dic-10	giu-15	-67	0.1190	-1.88E-03	-0.685	No
Ao07	apr-02	ott-14	222	0.0127	6.62E-04	0.242	Positivo
Ao51	mar-03	giu-15	-388	0.0002	-7.85E-04	-0.287	Negativo
Ao09	apr-02	ago-16	14	0.4240	4.53E-04	0.166	No
Ao46	gen-02	set-17	-2182	0.0008	-3.52E-04	-0.128	Negativo
Ao53	mar-03	set-17	-1810	0.0044	-2.86E-04	-0.104	Negativo
Ao06	apr-02	set-17	-224	0.2070	2.20E-04	0.080	No
Ao11	apr-02	set-17	-1508	0.0003	-5.87E-04	-0.214	Negativo
Ao05	mag-06	set-17	-646	0.0595	-2.15E-04	-0.078	No
Ao12	apr-02	ago-16	-614	0.0796	-2.01E-04	-0.073	No
Ao61	mar-06	set-17	21	0.3380	2.84E-04	0.104	No
Ao03	mag-06	lug-14	169	0.2690	2.94E-04	0.107	No
Ao73	giu-09	set-17	21	0.3380	3.33E-04	0.121	No
Ao32	gen-00	set-17	-721	0.1720	-3.58E-05	-0.013	No
Ao10	mag-06	ago-16	329	0.1500	2.39E-04	0.087	No
Ch05	dic-10	set-17	-62	0.1020	-2.40E-04	-0.088	No
Ao19	feb-00	set-17	441	0.2850	6.09E-05	0.022	No
Ao76	giu-12	set-17	-35	0.1520	1.89E-04	0.069	No
Ao68	dic-06	set-17	119	0.3800	1.05E-04	0.038	No
Ao04	apr-02	set-17	87	0.0913	1.93E-04	0.070	No
Ao91	mag-06	ago-16	43	0.4540	8.73E-05	0.032	No
Ao23	mar-00	set-17	-501	0.1960	-8.72E-06	-0.003	No
Ao18	gen-00	set-17	268	0.3510	4.56E-05	0.017	No
Ao35	gen-00	set-17	171	0.4080	4.62E-05	0.017	No
Ao01	apr-07	ago-16	-118	0.3100	-5.01E-05	-0.018	No
Ao17	gen-00	set-17	141	0.4210	1.01E-05	0.004	No
Ao20	gen-00	set-17	418	0.2780	3.88E-05	0.014	No
Ao16	gen-00	set-17	982	0.0931	9.56E-05	0.035	No
Ch01	apr-02	set-17	-37	0.2800	4.54E-05	0.017	No
Ao22	apr-02	set-17	-631	0.0168	-1.52E-04	-0.055	Negativo
Ao15	gen-00	set-17	1734	0.0109	1.59E-04	0.058	Positivo

Codice ente	Inizio	Fine	S	p-value	Pendenza	Variazione (m/y)	Trend
Ao115	mag-08	set-17	-534	0.0074	-2.79E-04	-0.102	Negativo
Ao116	mag-08	set-17	-460	0.0161	-2.55E-04	-0.093	Negativo
Ao24	gen-00	ott-16	544	0.2300	5.88E-05	0.021	No
Ao21	gen-00	set-17	-454	0.2690	-3.67E-05	-0.013	No
Ao55	mar-04	set-17	2503	0.0000	3.52E-04	0.128	Positivo
Ao14	gen-00	set-17	-687	0.1750	-6.35E-05	-0.023	No
Ao54	mar-04	giu-15	1359	0.0003	4.75E-04	0.173	Positivo
Po13	mar-04	set-17	2298	0.0001	3.05E-04	0.111	Positivo
Ao56	mar-04	set-17	2351	0.0000	2.85E-04	0.104	Positivo
Po02	ago-02	set-17	85	0.2350	1.25E-04	0.046	No
Sc16	dic-10	set-17	-97	0.0226	-1.62E-04	-0.059	Negativo
Po34	dic-10	set-17	4	0.4720	2.74E-05	0.010	No
Sc05	mar-04	set-17	-535	0.075	-3.92E-05	-0.014	No
Sc08	gen-07	giu-15	-17	0.1910	-1.77E-04	-0.065	No
Po38	giu-11	set-17	6	0.4510	3.57E-05	0.013	No
Po29	giu-09	giu-15	-10	0.2410	-2.30E-04	-0.084	No
Po35	giu-11	giu-15	-2	0.4510	-1.59E-04	-0.058	No
Qu10	apr-04	giu-15	-141	0.3490	-7.51E-06	-0.003	No
Sc11	gen-07	giu-15	-59	0.2240	-8.98E-05	-0.033	No
Br22	dic-10	dic-15	-25	0.2180	-1.23E-04	-0.045	No
Br23	giu-12	giu-15	-22	0.2630	1.02E-04	0.037	No
Br04	mar-05	dic-15	288	0.0002	1.57E-04	0.057	Positivo
Br24	giu-12	giu-15	-47	0.0821	-2.51E-04	-0.091	No
Br21	lug-08	dic-15	-54	0.1950	-5.30E-05	-0.019	No
Br25	giu-12	giu-15	-6	0.4400	6.76E-05	0.025	No
Qu16	apr-07	giu-15	36	0.1450	7.82E-05	0.029	No
Pn03	gen-07	dic-15	37	0.4070	-3.64E-06	-0.001	No
Pn07	ago-10	dic-15	35	0.3850	-2.19E-05	-0.008	No
Pn09	ago-10	dic-15	-15	0.4520	-1.78E-05	-0.006	No
Pn08	ago-10	dic-15	29	0.4050	-2.26E-06	-0.001	No
Pn05	gen-07	dic-15	-116	0.2310	-7.75E-05	-0.028	No
Pn06	gen-07	dic-15	98	0.2630	6.26E-05	0.023	No



TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

Su 64 stazioni:

↑ 7 positiva

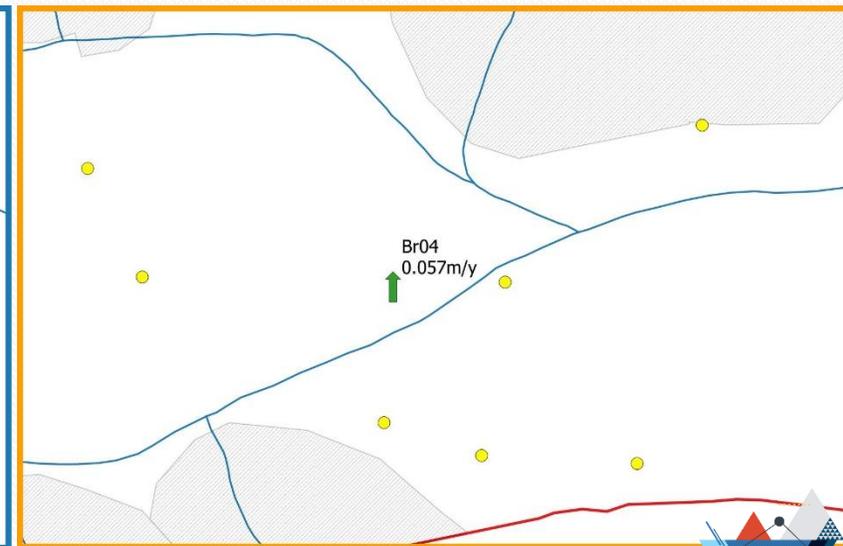
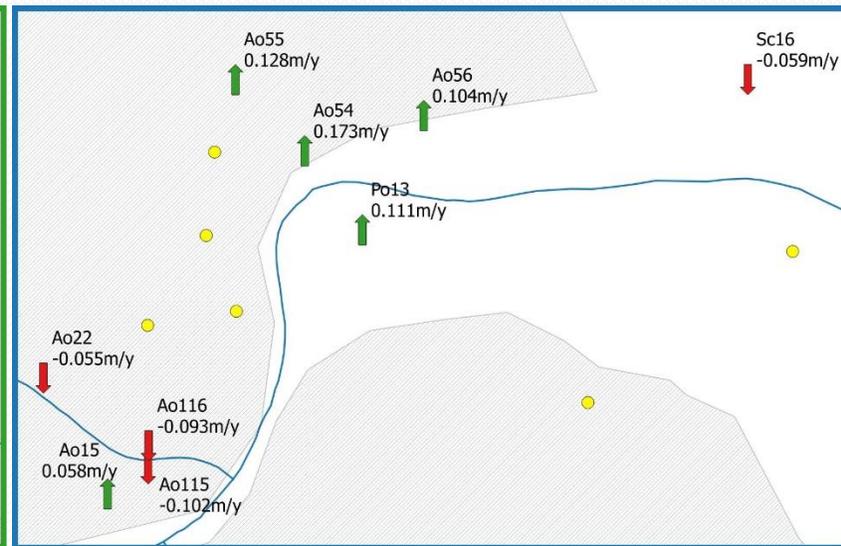
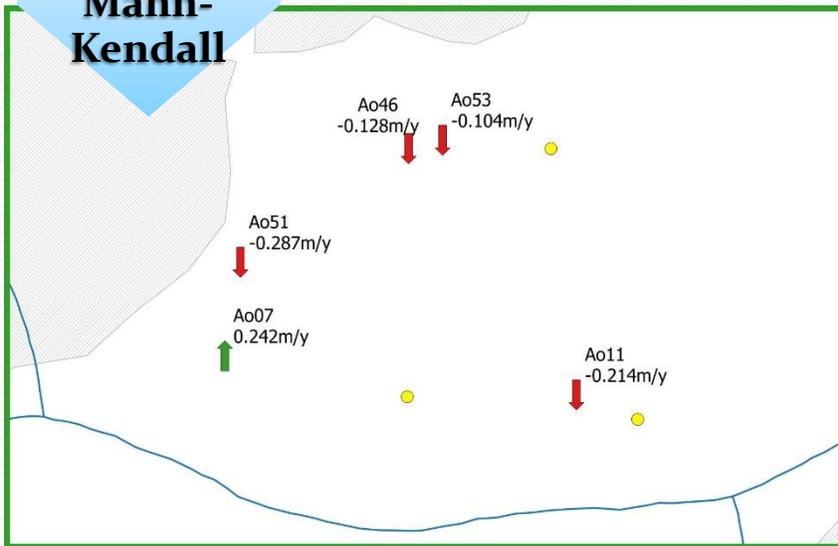
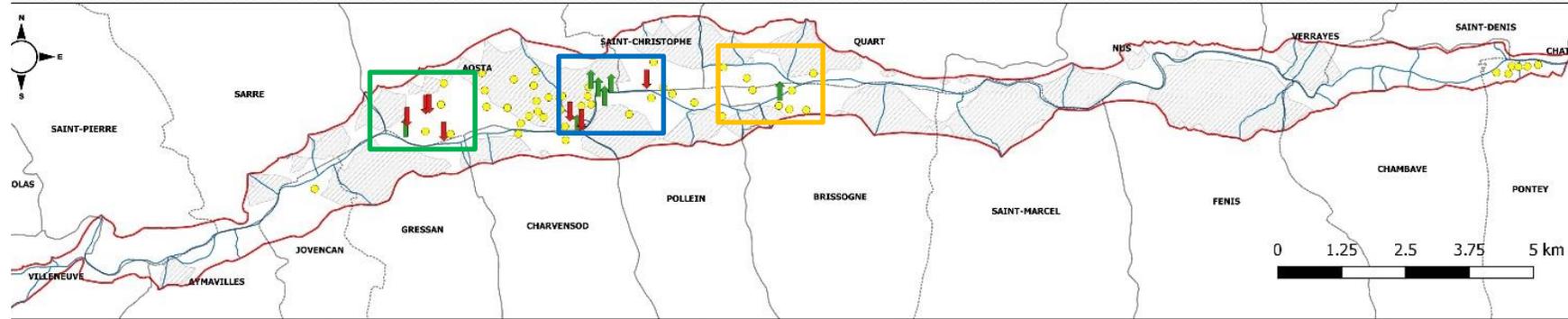
● 49 stabile

↓ 8 negativa

Ricerca outliers

Retta di regressione

Test di Mann-Kendall



TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase A: Applicazione test di Mann-Kendall

Su 64 stazioni:

↑ 7 positiva

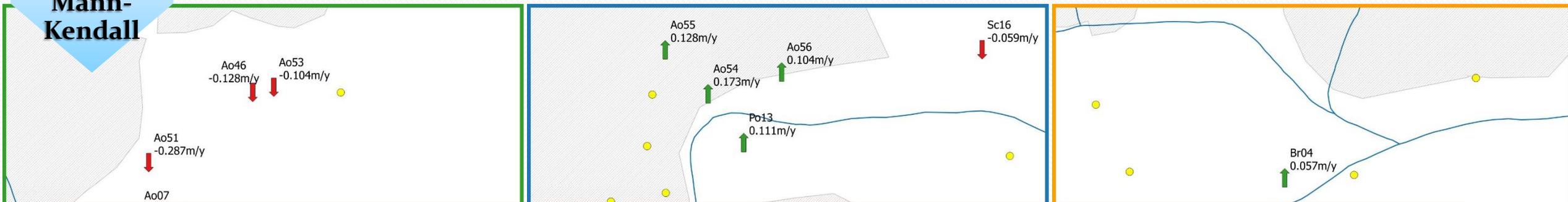
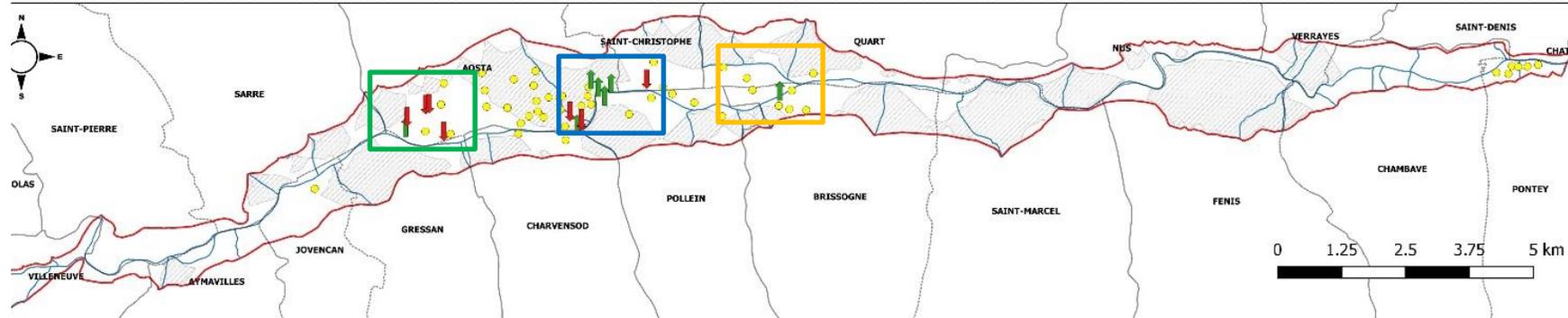
● 49 stabile

↓ 8 negativa

Ricerca outliers

Retta di regressione

Test di Mann-Kendall



Tuttavia, data la generale stabilità sul lungo periodo...  
 ....si è passati alla **Fase B**

# Fase B: Calcolo del bilancio idrico

L'obiettivo di questa fase è valutare se:

Risorse idriche disponibili (AGR) > Prelievi medi su lungo termine (LTAAQ)?

**Secondo le Linee Guida:**

- AGR → Available Groundwater Resources
- LTAAQ → Long-Term Annual Average Abstraction

**Le linee guida non forniscono nessuna spiegazione su come ricavarli!!!**

TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase B: Calcolo del bilancio idrico

L'obiettivo di questa fase è valutare se:

Risorse idriche disponibili (**AGR**) > Prelievi medi su lungo termine (**LTAAQ**)?

Secondo le Linee Guida:

- **AGR** → Available Groundwater Resources
- **LTAAQ** → Long-Term Annual Average Abstraction

Le linee guida non forniscono nessuna spiegazione su come ricavarli!!!

**STATO  
QUANTITATIVO**



Se  $\frac{LTAAQ}{AGR} < 1$  lo stato quantitativo è **BUONO**

Se  $\frac{LTAAQ}{AGR} > 1$  lo stato quantitativo è **SCARSO**

# Fase B: Calcolo del bilancio idrico

Dal modello numerico di flusso transitorio (2 anni) relativo all'acquifero della Piana d'Aosta (Stefania et al. 2018) è stato possibile estrarre dati relativi a:

- Ricarica (AGR)
- Alimentazione netta da fiume (AGR)
- Prelievi (LTAAQ)

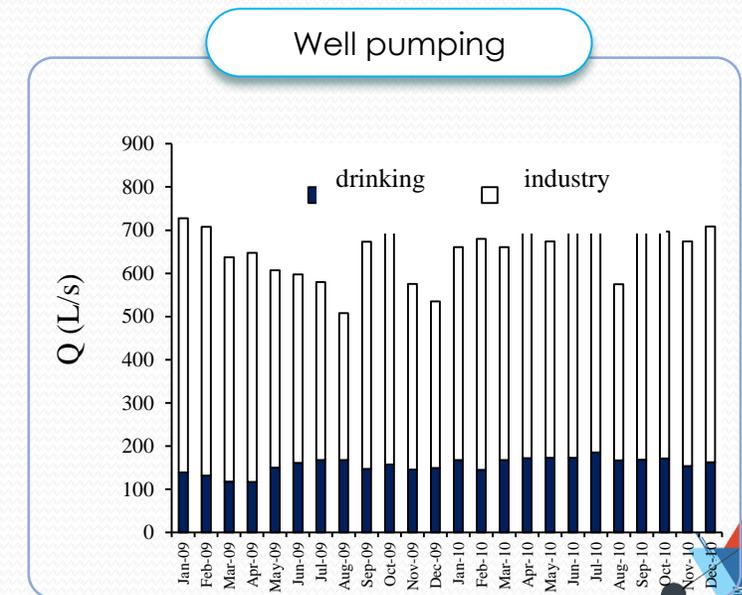
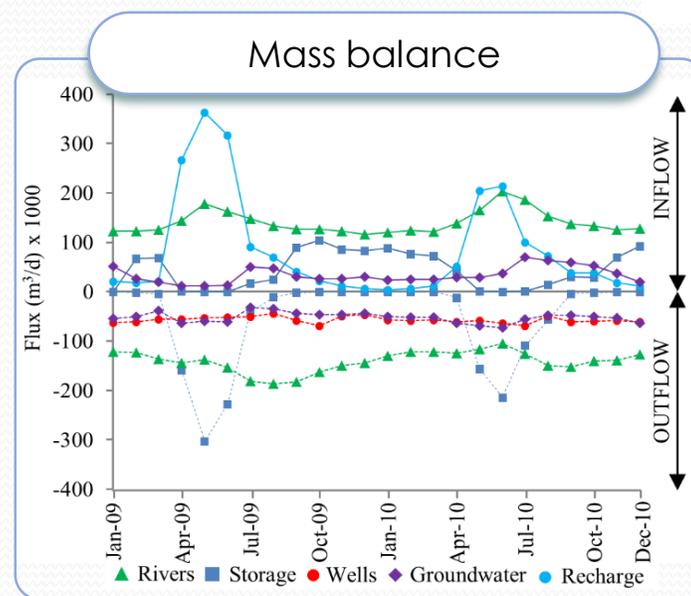
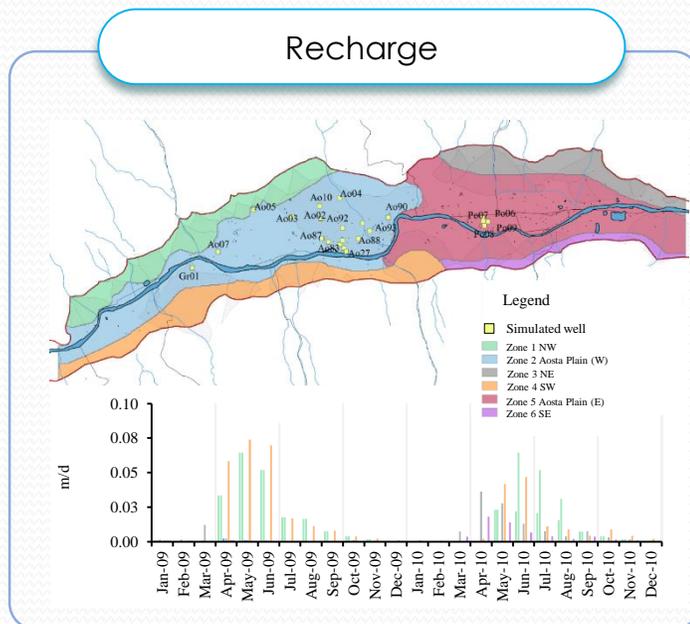
Hydrogeol J (2018) 26:147–162  
DOI 10.1007/s10040-017-1633-x



REPORT

**Modeling groundwater/surface-water interactions in an Alpine valley (the Aosta Plain, NW Italy): the effect of groundwater abstraction on surface-water resources**

Gennaro A. Stefania<sup>1</sup> · Marco Rotiroli<sup>1</sup> · Letizia Fumagalli<sup>1</sup> · Fulvio Simonetto<sup>2</sup> · Pietro Capodaglio<sup>2</sup> · Chiara Zanotti<sup>1</sup> · Tullia Bonomi<sup>1</sup>



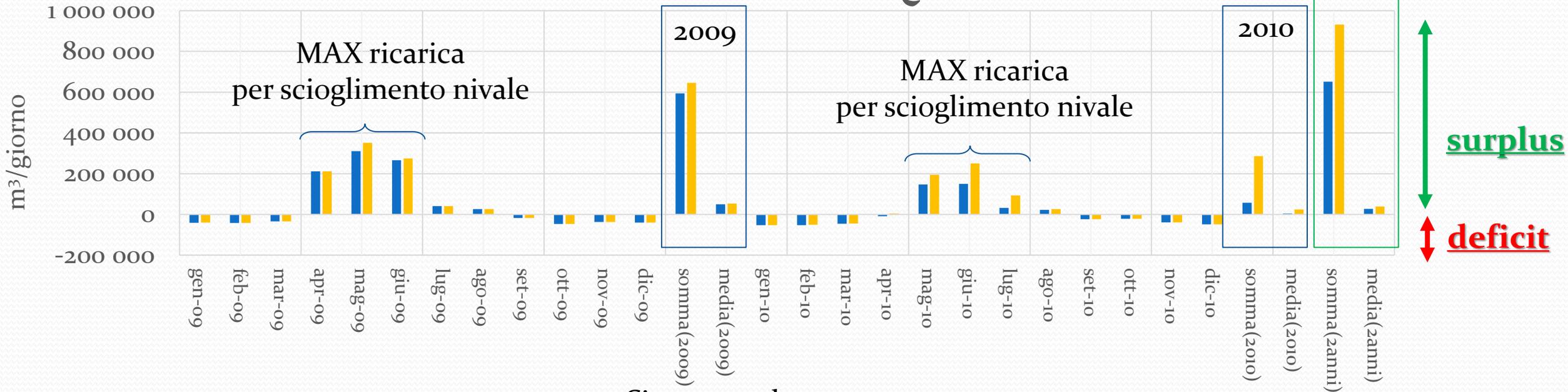
TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Fase B: Calcolo del bilancio idrico

## AGR - LAATQ



INFLOW = AGR	OUTFLOW = LAATQ
Ricarica	Prelievi
Ricarica + Afflusso netto acque superficiali	Prelievi

Si osserva che

- Nei mesi in cui la ricarica è minima, i prelievi non sono sostenibili (**deficit**)
- Nei mesi in cui ricarica è alta, questa supera i prelievi (**surplus**)
- Annualmente, la ricarica è sempre in grado di compensare i prelievi mettendo l'acquifero in uno stato di **surplus** idrico

TEST 1

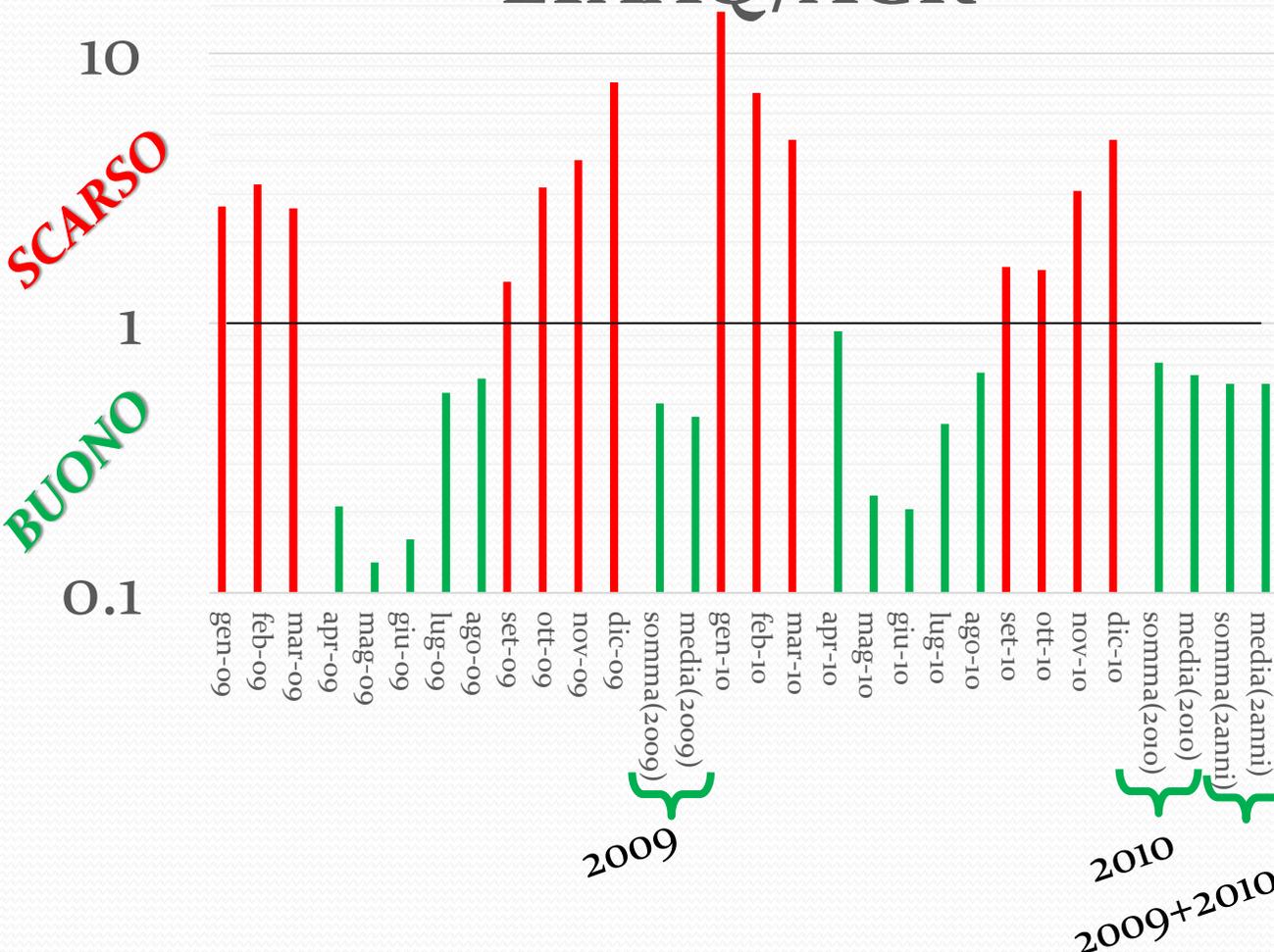
TEST 2

TEST 3

# Fase B: Calcolo del bilancio idrico

$$\frac{LTAAQ}{AGR} < 1 \rightarrow \text{BUONO} \quad \frac{LTAAQ}{AGR} > 1 \rightarrow \text{SCARSO}$$

## LTAAQ/AGR



- **LTAAQ/AGR** cambia mensilmente:
  - nei mesi di bassa ricarica (inverno e autunno)
    - $>1 \rightarrow \text{STATO SCARSO}$
  - nei mesi di alta ricarica (primavera e estate)
    - $<1 \rightarrow \text{STATO BUONO}$
- **LTAAQ/AGR** su singolo anno o sui 2 anni:
  - è **SEMPRE**  $<1$  garantendo lo **STATO** quantitativo **BUONO** (secondo questo test)

TEST 1

TEST 2

TEST 3

# Acque superficiali connesse

- Giudizi espressi ARPA VdA e AdbPo sulla valutazione dello stato chimico ed ecologico dei i corsi d'acqua della regione

STATO CHIMICO	CORPI IDRICI	STATO ECOLOGICO
BUONO	Buthier - 0765va	BUONO
BUONO	d'Arly - 0261va	BUONO
non classificato	d'Arpisson - 0342va	non classificato
BUONO	Dora Baltea - 08va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 09va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 010va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 011va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 012va	BUONO
BUONO	Dora Baltea - 013va	BUONO
BUONO	Grand Eyvia - 0437va	BUONO
BUONO	Savara - 0447va	BUONO

Corpi idrici naturali

STATO CHIMICO	CORPI IDRICI HMWB	STATO ECOLOGICO
BUONO	Buthier - 0766va	BUONO
BUONO	Clou Neuf - 0752va	SUFFICIENTE
BUONO	de Cluse llaz - 0712va	SCARSO
BUONO	de Comboué - 0361va	SCARSO
BUONO	de Crétaz - 0821va	SUFFICIENTE
BUONO	de Gressan - 0402va	SUFFICIENTE
BUONO	de Saint-Barthélemy - 0804va	SUFFICIENTE
BUONO	de Verrogne - 0702va	CATTIVO
BUONO	des Laures - 0302va	non classifiato
BUONO	du Château de Quart - 0792va	SUFFICIENTE
BUONO	Saint-Marcel - 0292va	SUFFICIENTE

Corpi idrici altamente modificati



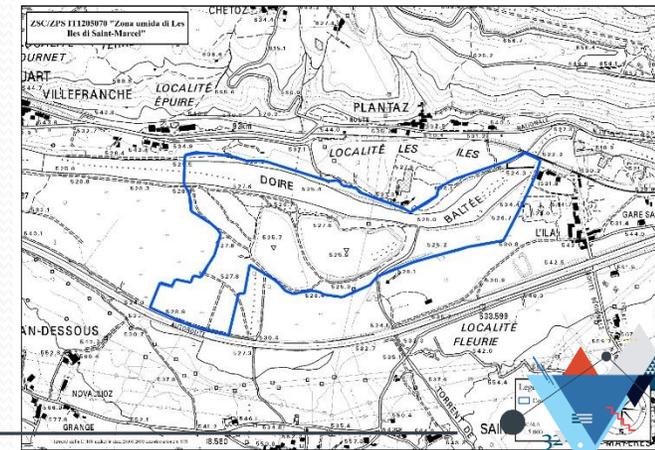
dovute a modificazioni morfologiche in alveo e alle derivazioni superficiali ...non imputabili alla falda

Lo stato quantitativo è **BUONO** (secondo questo test)

# Ecosistemi terrestri dipendenti

- Giudizi espressi da ISPRA e ARPA VdA nell'ambito  
Strategia Nazionale per la Biodiversità e della Rete Natura 2000,
- Da cui emerge che:
  - Esistono alcuni ecosistemi acqua dipendenti con stato di conservazione basso, tuttavia esso è causato dall'antropizzazione non alla falda
  - Zone umide: ZPS Les Iles di Saint-Marcel che appare in buono stato di conservazione

Lo stato quantitativo è **BUONO** (secondo questo test)



# Giudizio di stato quantitativo

- Il **Test 1** – Bilancio Idrico  
ha dato esito positivo (STATO **BUONO**)
- Il **Test 2** – acque superficiali connesse  
ha dato esito positivo (STATO **BUONO**)
- Il **Test 3** – ecosistemi connessi  
ha dato esito positivo (STATO **BUONO**)

Lo **stato quantitativo** dell'acquifero della  
Piana d'Aosta è risultato **BUONO**  
in accordo con quanto definito dalle linee guida

# Conclusioni

- Le linee guida non sono direttamente applicabili in modo rigoroso

Requisiti ideali e minimi → ulteriormente ridotti

- Solo 63 stazioni (su 213) sono risultate idonee, lasciando scoperte alcune aree della piana
- Nessuna indicazione di dettaglio è fornita sulla stima del bilancio idrogeologico

...tuttavia, sulla base dei dati disponibili è stato comunque possibile giungere ad un giudizio di stato quantitativo **BUONO!**

## Raccomandazioni

**Ai fini della valutazione futura dello stato quantitativo, risulta prioritario:**

- ottenere serie piezometriche confrontabili
- frequenza di misura almeno stagionale
- coprire le aree attualmente prive di dati



Grazie per l'attenzione