



**REGIONE AUTÒNOMA DE SARDIGNA
REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA**

PRESIDENZA

Direzione generale agenzia regionale del distretto idrografico della Sardegna
Servizio tutela e gestione delle risorse idriche, vigilanza sui servizi idrici e gestione delle siccità

ANALISI IDROLOGICA ALLEGATO B

DELIBERAZIONE N. 1 DEL 17 MAGGIO 2016

Attività di cui alla deliberazione n. 1 del 21.01.2016 del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino: Programmazione risorse idriche 2016.



**REGIONE AUTONOMA DELLA SARDEGNA
AUTORITA' DI BACINO REGIONALE**

Allegato alla Deliberazione del Comitato Istituzionale n. 1 del 17/05/2016

Il Segretario Generale

**Il Presidente delegato del
Comitato Istituzionale**

Roberto Silvano

Paolo Giovanni Maninchedda



1 Premessa

Al fine di verificare l'erogabilità dei diversi sistemi (schemi e sottoschemi) di approvvigionamento del Sistema Idrico Multisetoriale Regionale si è provveduto ad analizzare l'attuale situazione climatica, nell'ambito delle significative fluttuazioni che condizionano annualmente l'entità delle risorse idriche disponibili, finalizzata, mediante la predisposizione di uno specifico modello di simulazione, a costituire la base metodologica per definire le risorse effettivamente disponibili nell'assetto attuale e nel breve periodo, in coerenza con i criteri definiti dagli atti di pianificazione fin qui adottati a partire dal più recente aggiornamento del Piano di Gestione del Distretto di cui alla direttiva 2000/60/CE, che ha confermato quanto previsto dal Piano Stralcio per l'Utilizzazione delle Risorse Idriche in Sardegna (PSURI).

2 LA MODELLAZIONE IDROLOGICA ADOTTATA

2.1 *Indagine Pluviometrica*

L'analisi sulla stazionarietà delle serie di precipitazione e di deflusso riportate negli atti di pianificazione generale fin qui adottati evidenziano significativi segnali di non stazionarietà delle serie storiche delle portate dei principali corsi d'acqua della Sardegna.

Tale aspetto non può essere considerato secondario ai fini della modellazione degli schemi multi-settoriali per l'utilizzazione delle risorse idriche.

Appare quindi necessario valutare l'elasticità della media delle portate dei corsi d'acqua al variare della precipitazione media.

A tale proposito si ricordano i diversi studi a tal fine pubblicati per numerose aree territoriali. A titolo esemplificativo si cita la pubblicazione "Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia" (Hydrological Sciences Journal – agosto 2006) nella quale sulla base di un'analisi effettuata su 219 bacini idrografici è emerso che il coefficiente di elasticità dei deflussi in rapporto a quello della pioggia vale circa 2-3.5 volte. Ciò significa che una variazione del 10% della pioggia annua determina una variazione dal 20% al 35% del valore di deflusso annuo.

Preliminarmente è quindi necessario analizzare l'andamento delle piogge nell'isola con particolare riferimento alle aree idrografiche interessate dai principali serbatoi di regolazione del sistema multisetoriale.

Per poter disporre di serie di osservazioni disponibili fino, sostanzialmente, alla data odierna si è concentrata l'analisi sulla rete di stazioni in telelettura per le quali, per i periodi precedenti all'entrata in servizio, si sono "associate" le più prossime e simili stazioni pluviometriche tradizionali del Servizio Idrografico della Sardegna.

L'elenco delle stazioni utilizzate, con la relativa corrispondenza tra stazione tradizionale e stazione in tempo reale è riportato nella tabella seguente.

Stazioni analizzate - Anni idrologici dal 1922-23 al 2014-2015			
N.	Stazione in tempo reale	Comune	Stazione associata tradizionale
Vari fra Tirso e Temo			
1	Badde Urbara	Santulussurgiu	Santulussurgiu
2	Bauladu	Bauladu	Bauladu
3	Putzuidu	S.Vero Milis	Riola Sardo
Temo			
4	Badu Crabolu	Suni	Sindia
5	Bosa Marina	Bosa	Bosa Marina
6	Montresta	Montresta	Montresta
7	Pozzomaggiore	Pozzomaggiore	Pozzomaggiore
8	Villanova Monteleone	Villanova Monteleone	Villanova Monteleone
Cuga e vari			
9	Alghero	Alghero	Alghero aggregata
10	Stintino	Stintino	Stintino
Mannu di Porto Torres e vari			
11	Mannu di Porto Torres	Ittiri	Uri
12	Osilo	Osilo	Osilo
13	Ossoni	Castelsardo	S.G.Coghinas
14	Pianu	Bessude	Pianu
15	Porto Torres	Portotorres	Portotorres
16	Sassari	Sassari	Sassari
Coghinas			
17	Ardara	Ardara	Ardara
18	Coghinas	Perfugas	Coghinas
19	Fraigas	Ozieri	Fraigas
20	Martis	Martis	Martis
21	Oschiri	Oschiri	Oschiri
22	Torraalba	Torraalba	Torraalba
Liscia - Padrongianu e vari			
23	Aglientu	Aglientu	Aglientu
24	Golfo Aranci	Golfo Aranci	Olbia
25	La Maddalena	La Maddalena	Guardia Vecchia
26	Monte Petrosu	Loiri Porto S.Paolo	Monte Pedrosu
27	Monti	Monti	Monti
28	Paduledda	Trinita' d'Agultu	Codaruina
29	Sa Pianedda	Padru	Padru
30	Tempio	Tempio Pausania	Tempio
Posada e vari			
31	Ala' dei Sardi	Ala' dei Sardi	Ala' dei Sardi
32	Mamone	Onani'	Lodé
33	Siniscola	Siniscola	S L.di Siniscola
Cedrina			
34	Farcana	Nuoro	Nuoro
35	Genna Silana	Urzulei	Genna Silana
36	Lula	Lula	Lula
37	Mamoiada	Mamoiada	Mamoiada
38	Monte Tului	Dorgali	Noce Secca
39	Orosei	Orosei	Orosei
40	Orune	Orune	Orune
Vari fra Cedrina e Flumendosa			
41	Baunei	Baunei	Baunei
42	Jerzu	Jerzu	Jerzu
43	Lanusei	Ilbono	Lanusei
44	Punta Tricoli	Gairo	Sicca d'Erba
45	Tertenia	Tertenia	Tertenia

Stazioni analizzate - Anni idrologici dal 1922-23 al 2014-2015			
N.	Stazione in tempo reale	Comune	Stazione associata tradizionale
Flumendosa			
46	Ballao	Ballao	Ballao
47	Bau Mandara	Villagrande Strisaili	Bau Mandara
48	Escalaplano	Escalaplano	Escalaplano
49	Flumini Uri a S. Vito	S. Vito	Muravera
50	Monte sa Scova	Aritzo	Cossatzu
51	Sadali	Sadali	Sadali
Picocca e vari			
52	Campuomu	Sinnai	Campuomu
53	Minni Minni	Villasimius	Castiadas
54	San Priamo	S.Vito	M. Acuto
55	Serpeddi' Meteo	Sinnai	Burcei
Fluminimannu			
56	Cagliari	Cagliari	Cagliari
57	Fluminimannu a Decimomannu	Decimomannu	Decimomannu
58	Fluminimannu a Furtei	Furtei	Villamar
59	Mandas	Mandas	Mandas
60	Nuraminis	Nuraminis	Nuraminis
61	Sanluri O.N.C.	Sanluri	Sanluri
62	Senorbi	Senorbi'	Senorbi'
63	Vallermosa	Vallermosa	Vallermosa
64	Villasor	Villasor	Villasor
Cixerri			
65	Campanasissa	Siliqua	Campanasissa
66	Iglesias	Iglesias	Iglesias
Vari fra Cixerri e Palmas			
67	Capoterra	Capoterra	Capoterra
68	Is Cannoneris	Pula	Is Cannoneris
69	Porto Pino	Sant'Anna Arresi	Porto Pino
70	Pula	Pula	Pula
71	Sant'Antioco	Sant'Antioco	Sant'Antioco
Palmas e Flumentepido			
72	Flumentepido	Carbonia	Flumentepido
73	Santadi	Santadi	Santadi
Mogoro e vari			
74	Santa Maria di Neapolis	Guspini	Uras
75	Sardara	Sardara	Sardara
76	Terramaistus a Gonnosfanadiga	Gonnosfanadiga	Gonnosfanadiga
77	Villa Verde	Villaverde	Villa Verde
Tirso			
78	Abbasanta	Abbasanta	Abbasanta
79	Flumineddu ad Allai	Allai	Allai
80	Fonni	Fonni	Fonni
81	Laconi	Laconi	Laconi
82	Macomer	Macomer	Macomer
83	Orani	Orani	Orani
84	Oristano	Oristano	Oristano
85	Osidda	Osidda	Osidda
86	Samugheo	Samugheo	Samugheo
87	Sedilo	Sedilo	Sedilo
88	Tirso a rifornitore Tirso	Illorai	Rifornitore Tirso

Con lo scopo di differenziare l'analisi per le diverse zone dell'isola si è ritenuto sufficientemente rappresentativo fare riferimento alle zone di allerta oggi utilizzate dalla Regione Sardegna ai fini di Protezione Civile, nel seguito elencate e rappresentate nella successiva figura:

COD_AREA	NOME_AREA	Superficie (Kmq)
Sard-A	Iglesiente	2510
Sard-B	Campidano	2540
Sard-C	Bacini Montevecchio-Pischilappiu	2350
Sard-D	Bacini Flumendosa-Flumineddu	5080
Sard-E	Bacino del Tirso	3340
Sard-F	Gallura	3290
Sard-G	Logudoro	4750



Al fine di procedere all'analisi sono state quindi calcolate le serie storiche delle altezze di pioggia annue per anno idrologico (ottobre-settembre) estese per 93 anni dal 1922-23 al 2014-15 per ciascuna area idrografica sopra descritta e per l'intera regione.

Nello studio idrologico adottato nel Piano Stralcio Direttore delle Risorse Idriche si è proceduto ad individuare la struttura del "kernel" ("nucleo") della variabile statistica, evidenziando la sua evoluzione nel corso del periodo osservato. Il kernel smoothing è uno strumento statistico standard utilizzato per filtrare il rumore a più alta frequenza di una serie temporale per evidenziare le variazioni a bassa frequenza.

Si è utilizzato un kernel quadratico (o di Epanechnikov) con lambda rispettivamente pari a 0.2 e 0.06. L'ampiezza di banda è lambda*n, cioè, in questo caso, vale, ad esempio, 0.2*80=16 anni. La procedura è simile ad una media mobile di +/- 16 ritardi. Ma, poiché i pesi tendono a ridursi con l'aumentare della distanza temporale dall'istante interessato, l'estensione dell'intervallo è sostanzialmente inferiore a quella della corrispondente media mobile convenzionale.

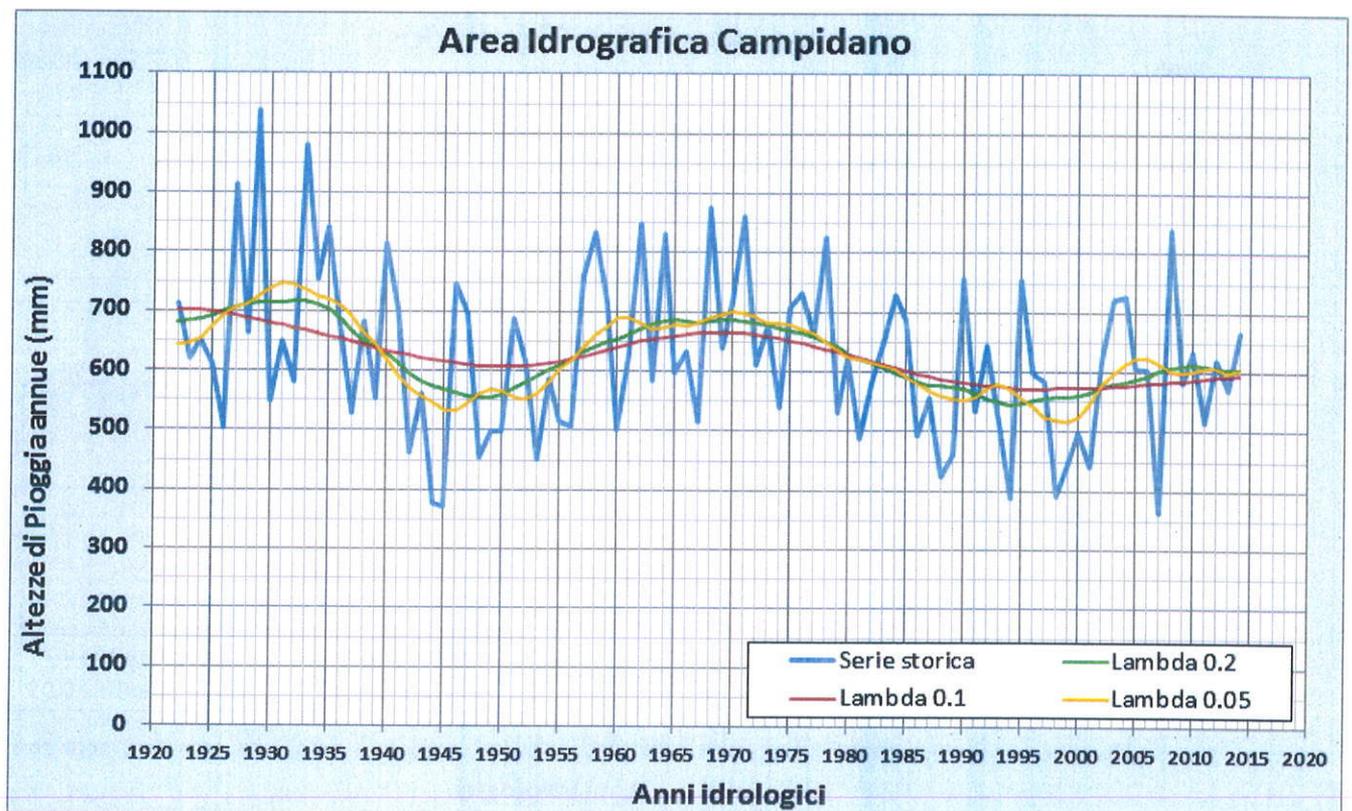
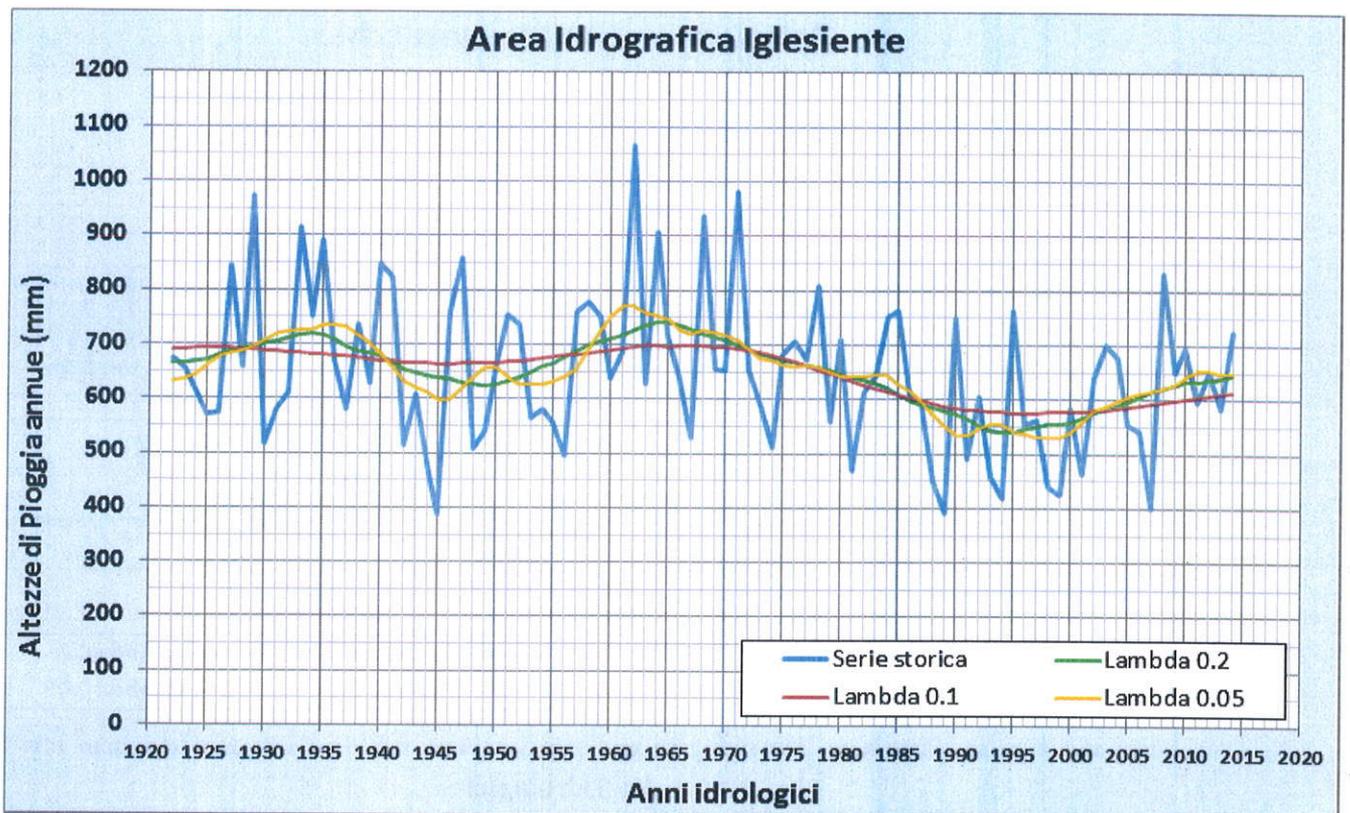
Il valore del kernel smoothing all'istante t vale:

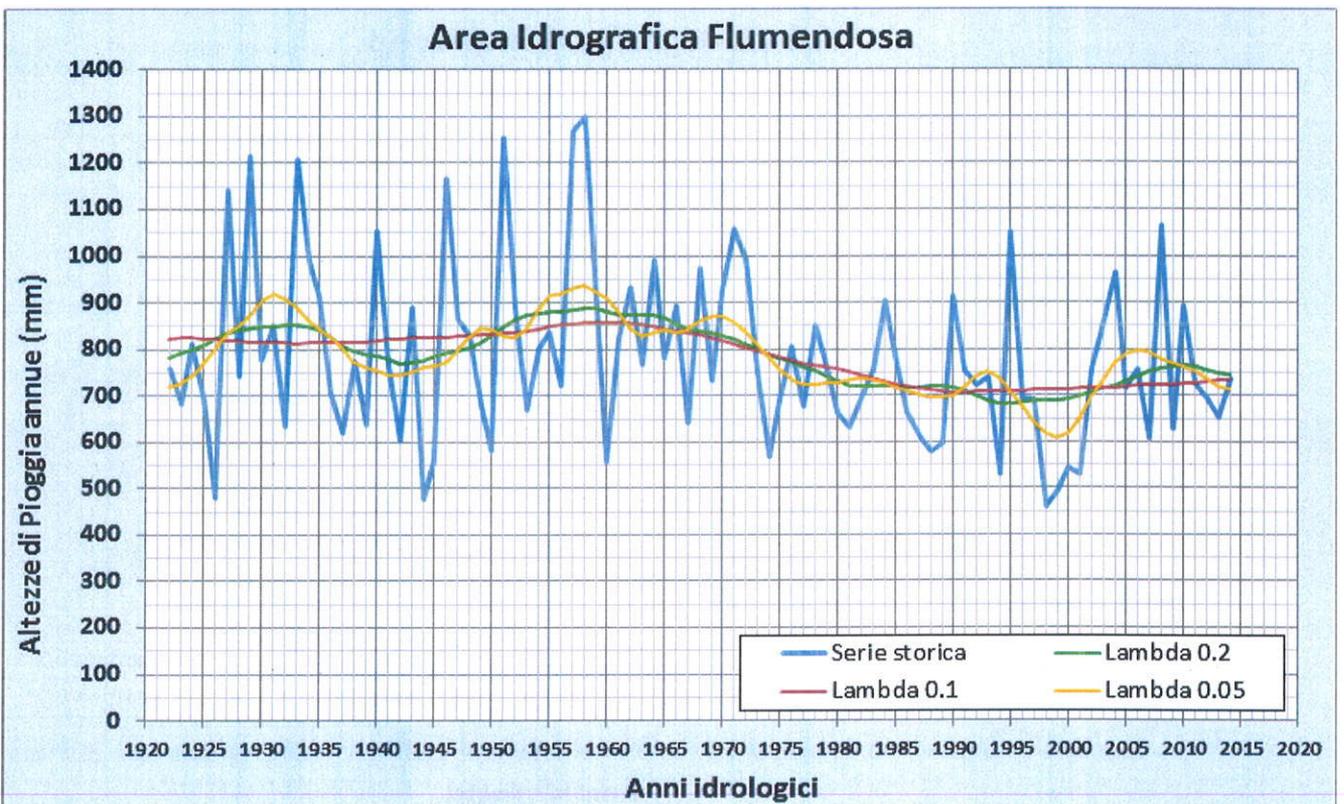
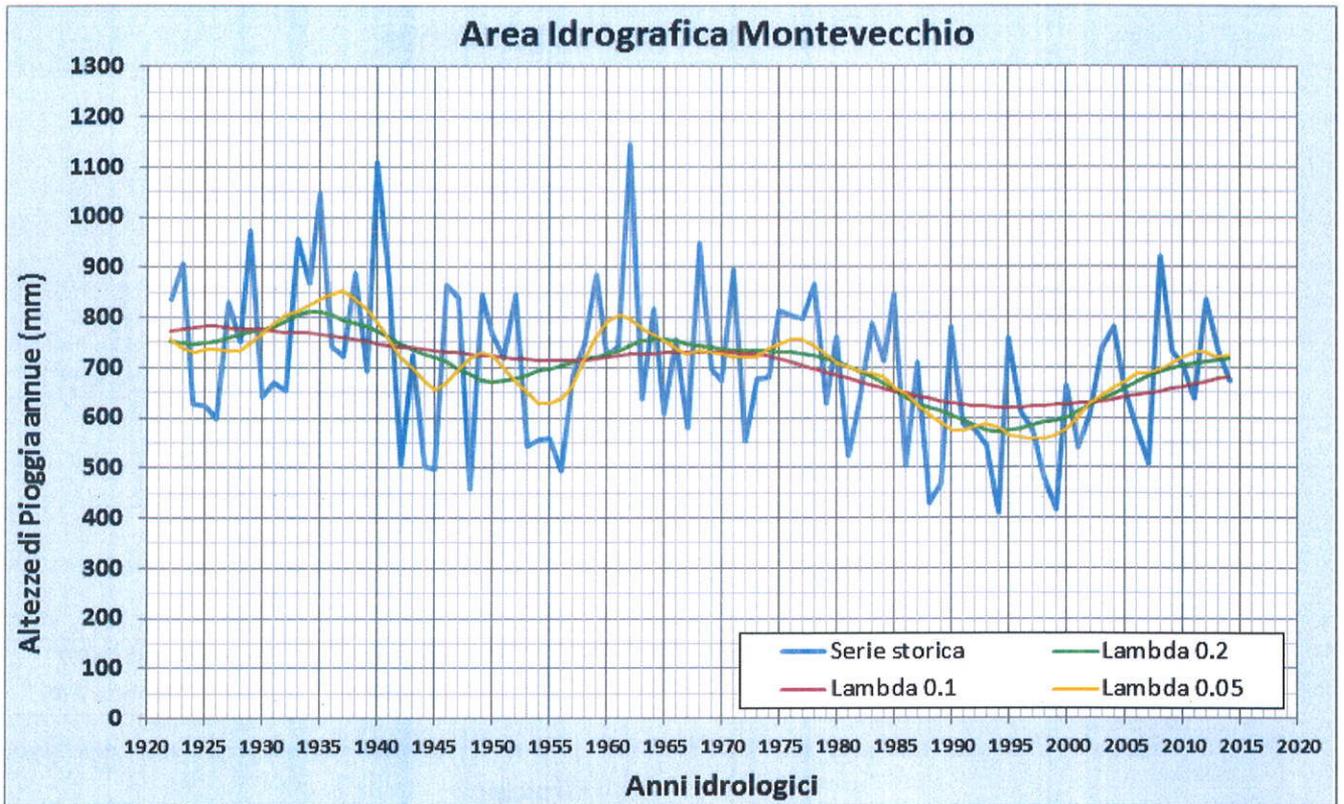
$$y_t = \frac{\left(\sum_{s=1}^n y_s K\left(\frac{s-t}{\lambda n}\right) \right)}{\left(\sum_{s=1}^n K\left(\frac{s-t}{\lambda n}\right) \right)}$$

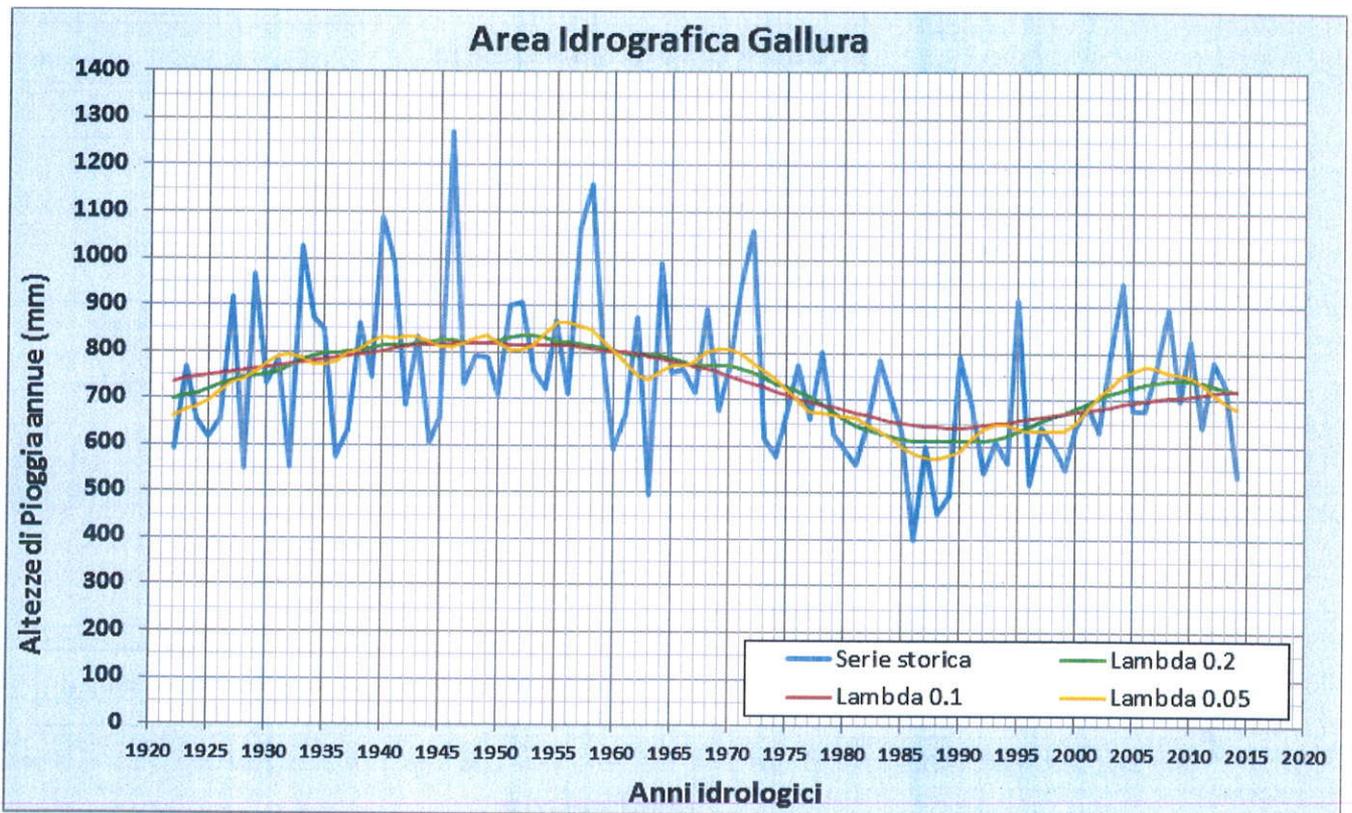
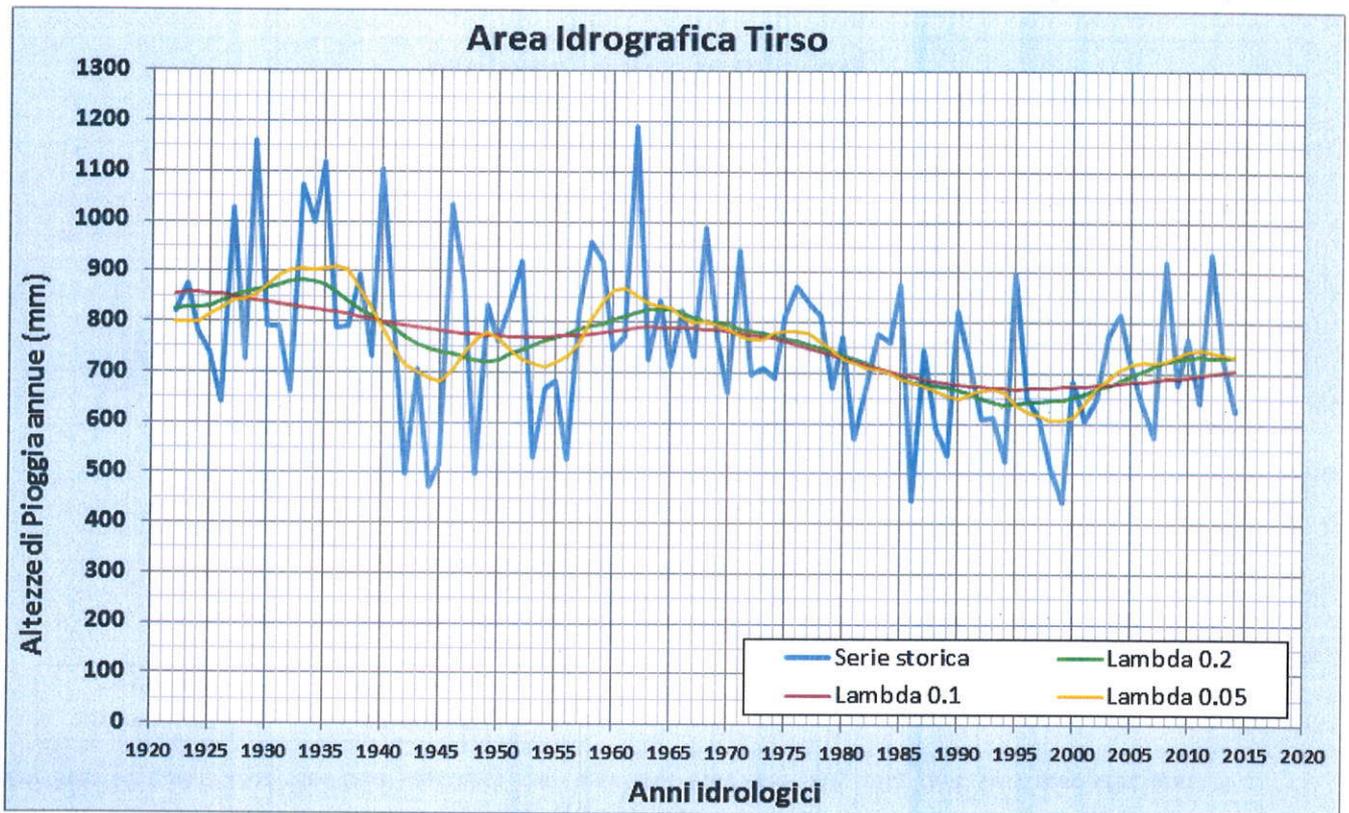
dove la funzione kernel simmetrica è la quadratica (o di Epanechnikov) funzione data da

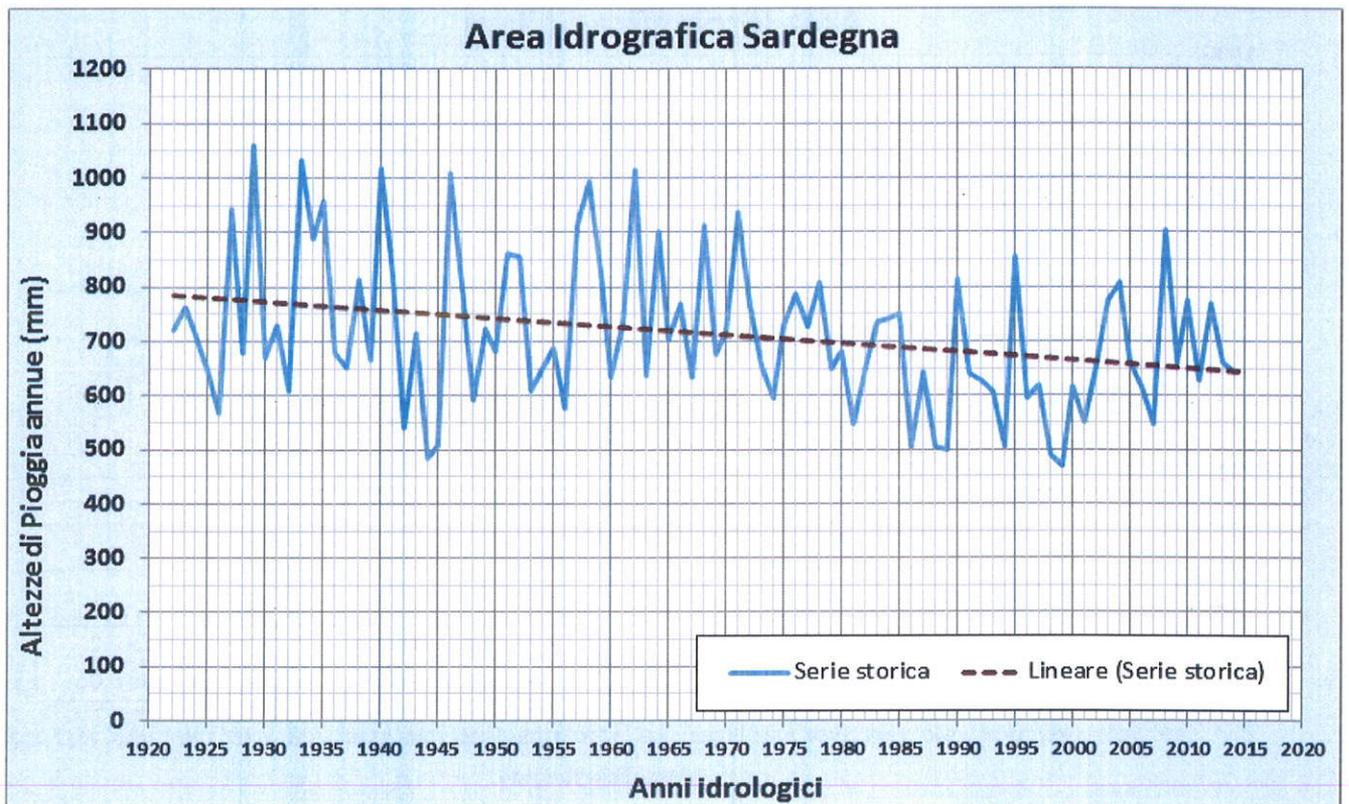
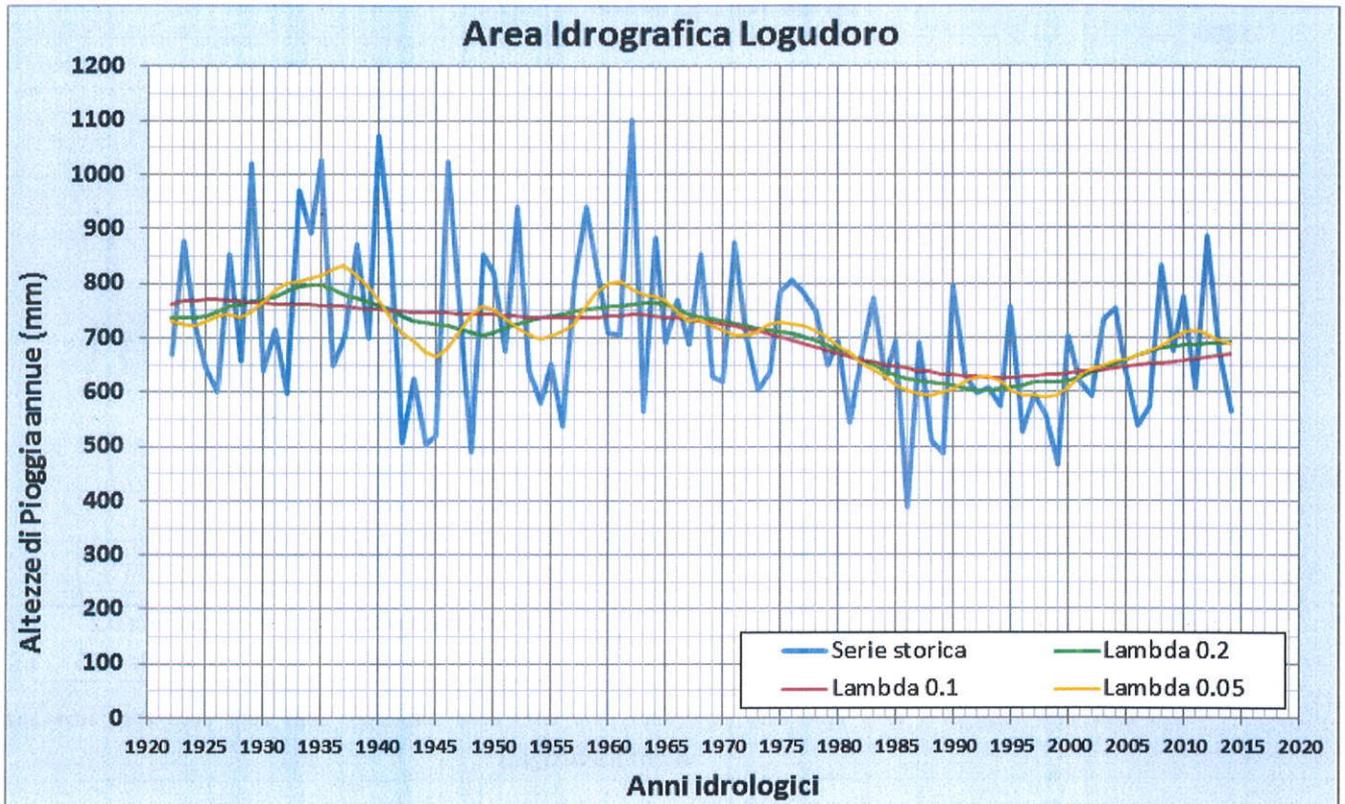
$$K(x) = \max(0, (1 - x^2))$$

Si è ora proceduto ad aggiornare l'analisi e nei grafici seguenti sono mostrati per le diverse aree idrografiche gli andamenti delle funzioni Kernel rispettivamente per i valori di lambda pari a 0.2, 0.1 e 0.05.









Come si può notare risultano evidenti due elementi, il primo è la fluttuazione del valor medio, con un significativo carattere di persistenza ed il secondo l'esistenza di un complessivo trend lineare negativo.

Per il primo elemento si procederà ad un'ulteriore analisi nel seguito, per il secondo il fenomeno viene evidenziato sulla serie storica dei valori medi regionali che mostrano un trend dovuto ad una riduzione delle altezze di pioggia di circa 150 mm in 93 anni di osservazione, con una riduzione dal valore iniziale di quasi il 20% e una tendenza negativa di circa 1.6 mm all'anno.

Per il primo aspetto si ricorda che, al fine di valutare le reali capacità di erogazione dei sistemi di approvvigionamento multisettoriale dell'isola, come noto basati su grandi serbatoi a regolazione pluriennale in parte tra loro interconnessi, una particolare attenzione meritano le caratteristiche di correlazione seriale dei valori di afflusso e deflusso annui, per anno idrologico, che ove rivelino un certo grado di persistenza o di periodicità pluriennale, ancorché debole, possono influire in misura non trascurabile sulle effettive risorse disponibili.

Onde approfondire la questione, così come già effettuato nell'ambito dello Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (Casmez, RAS, Ente Flumendosa, 1981 – Carlo Cao Pinna, et al.) si è ritenuto interessante utilizzare l'analisi suggerita per la prima volta da Hurst (The Long-Term Storage Capacity of Reservoirs, 1951) che consente di avere un misura parametrica del fenomeno in modo del tutto diretto.

Viene, infatti, analizzata la variabile "capacità del serbatoio necessaria alla regolazione totale" determinata in base all'andamento dei totali annui della grandezza in studio, ed ha analizzato il relativo comportamento al variare del numero degli anni di osservazione.

La formula di Hurst determinata teoricamente per un processo stazionario, normale e totalmente casuale, valida per n grande, vale:

$$R/S = m[C_n]/\sigma = (n\pi/2)^{0.5}$$

dove C_n è la capacità di regolazione totale e σ lo scarto quadratico medio della serie considerata, relativamente agli n anni di osservazione e avendo indicato con $m[]$ l'operatore media.

Tale studio dette vita a una metodologia statistica, applicabile a numerosi fenomeni naturali, per distinguere le serie "casuali" da quelle "non casuali" e per identificare la persistenza di trends.

Successivamente, Benoit Mandelbrot, investigando sulla natura frattale degli indici finanziari rilevò il potenziale della formula di Hurst e indicò l'esponente della formula quale misura della memoria di lungo termine delle serie temporali.

Oltre all'esponente di Hurst, Mandelbrot coniò due termini utili a descrivere il fenomeno: effetto "Giuseppe" e effetto "Noè". L'effetto "Giuseppe" indica che gli andamenti di una serie temporale sono parte di un trend di lungo termine e si riferisce al Vecchio Testamento

dove si racconta che in Egitto si erano registrati sette anni di ricchi raccolti seguiti da sette anni di carestia.

Al contrario l'effetto "Noè" è la tendenza di una serie temporale ad avere repentini cambiamenti. Entrambi questi effetti possono essere individuati tramite l'esponente di Hurst.

Per una serie di osservazioni l'esponente di Hurst è stimato con la seguente procedura. Si divide la serie in un numero di subserie di lunghezza più breve della serie completa e per ciascuna di queste è calcolato il valore di R/S. Quindi si stima l'esponente mediante una procedura di regressione, mediante una legge di potenza, dei valori di R/S calcolati e le lunghezze n delle diverse subserie utilizzate.

Usando l'esponente di Hurst le serie temporali possono essere classificate in diverse tipologie e possono essere evidenziate alcune loro dinamiche. In particolare possono essere definiti i seguenti profili caratteristici.

Serie completamente casuali. Per tali serie non vi sono correlazioni tra le osservazioni attuali e quelle future. L'esponente di Hurst è prossimo a 0.5.

Serie temporali antipersistenti. In una serie antipersistente un incremento sarà più facilmente seguito da un decremento o viceversa. Quindi i valori tenderanno ad alternarsi intorno alla media. Un valore dell'esponente di Hurst compreso tra 0 e 0.5 è indicativo di un comportamento antipersistente; più vicino è il valore a 0 e più forte è tale tendenza.

Serie temporali persistenti. In una serie temporale persistente un incremento in valore sarà seguito più facilmente da un analogo incremento nel breve periodo e un decremento da un analogo decremento nel breve periodo. Un valore dell'esponente di Hurst compreso tra 0.5 e 1 indica un comportamento persistente; più vicino è il valore a 1 e più forte è tale tendenza.

L'esponente di Hurst è quindi un utile metodo statistico per descrivere la proprietà di una serie temporale senza dover fare assunzione sulla sua stazionarietà ed è molto utile, in associazione con altri indicatori, per assumere delle decisioni influenzate dalle caratteristiche di evoluzione temporale dei fenomeni osservati.

Applicando tale metodologia ai valori ragguagliati di precipitazione (afflussi) per le diverse aree idrografiche della Sardegna si hanno i seguenti risultati.

COD_AREA	NOME_AREA	Superficie (Kmq)	Precipitazione media annua (mm)	Indice di Hurst	Indice di Hurst (Trasformata Logaritmica)
Sard-A	Iglesiente	2510	648.5	0.74	0.76
Sard-B	Campidano	2540	625.7	0.70	0.70
Sard-C	Bacini Montevecchio-Pischilappiu	2350	704.6	0.74	0.76
Sard-D	Bacini Flumendosa-Flumineddu	5080	784.7	0.77	0.76
Sard-E	Bacino del Tirso	3340	755.6	0.75	0.74
Sard-F	Gallura	3290	736.8	0.89	0.90
Sard-G	Logudoro	4750	705.1	0.77	0.77

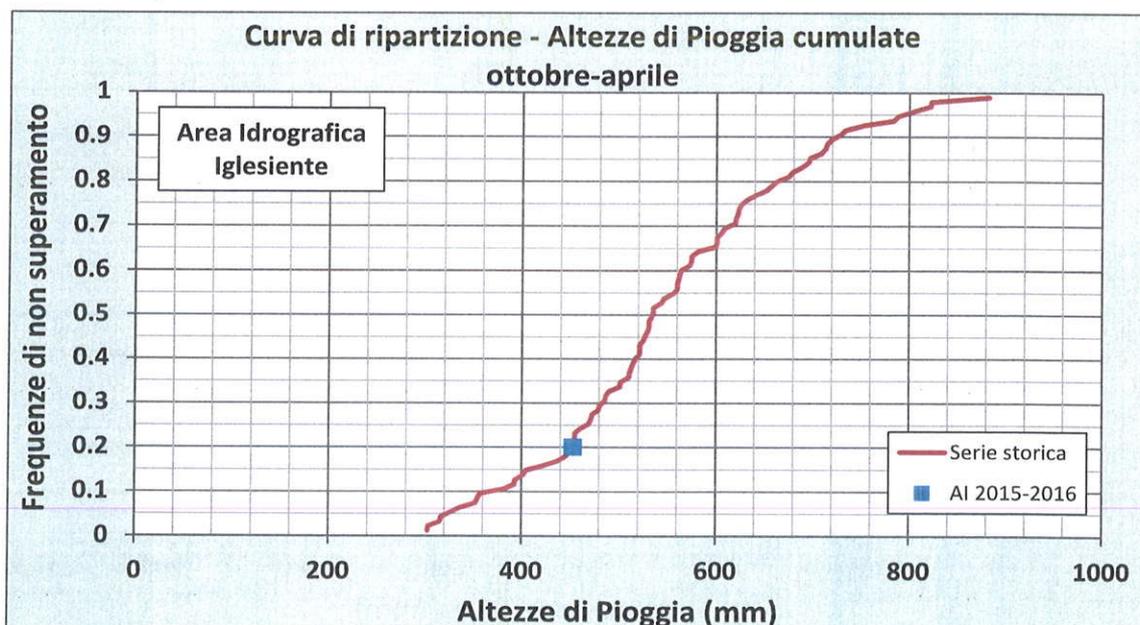
Considerata che l'assunzione di normalità è fondamentale per la valutazione dell'indicatore, si è proceduta alla stima sia sulle serie naturali e sia sulla trasformata logaritmica, pervenendo sostanzialmente agli stessi risultati.

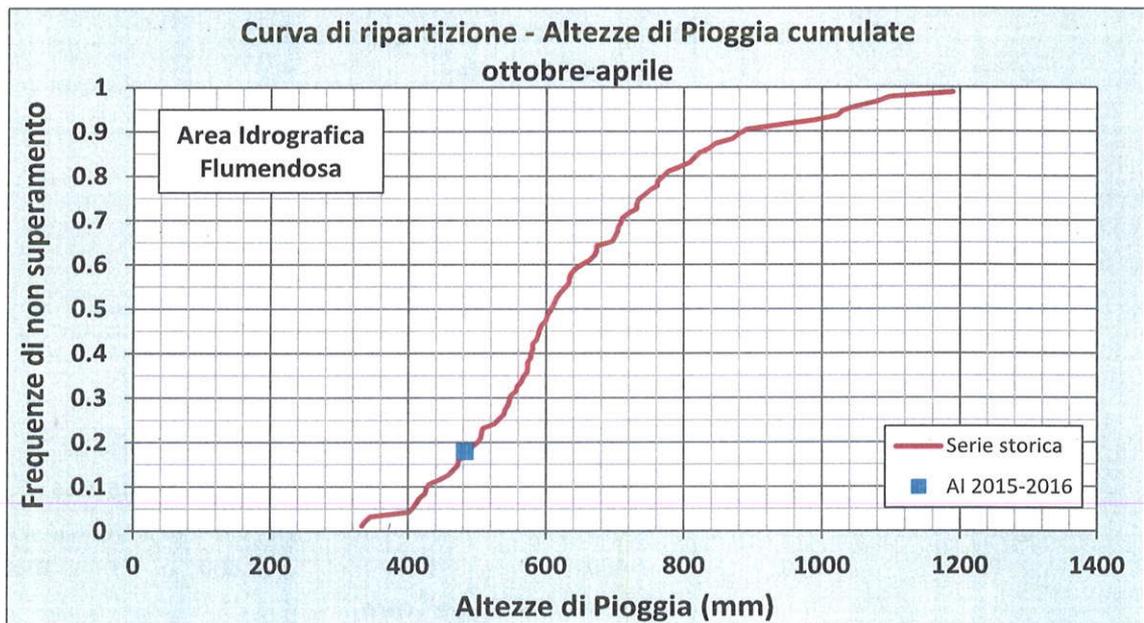
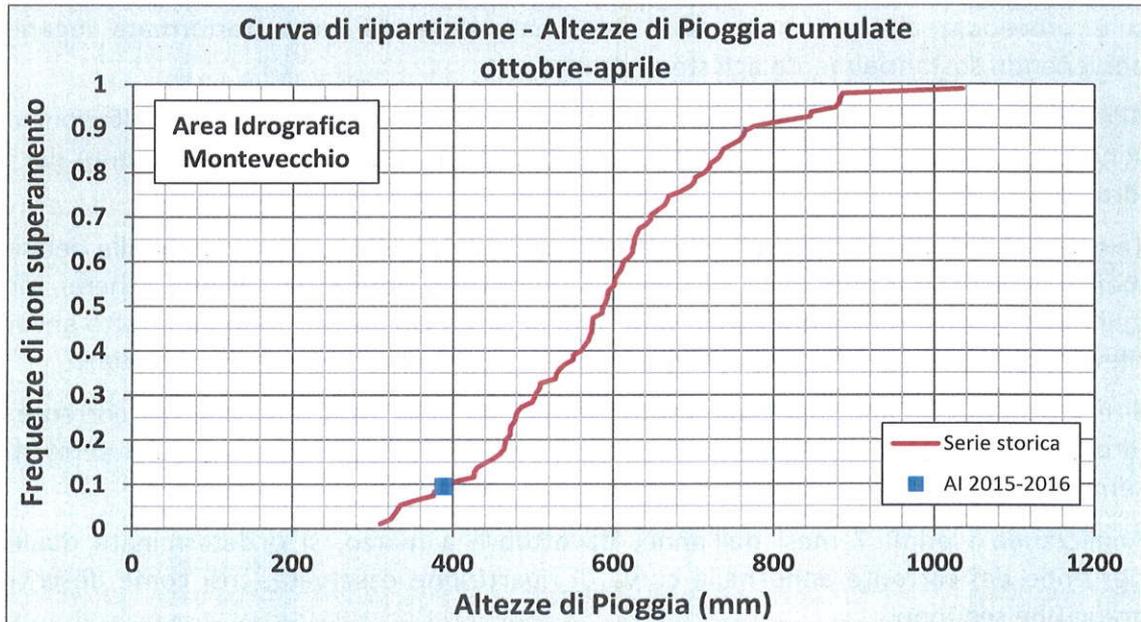
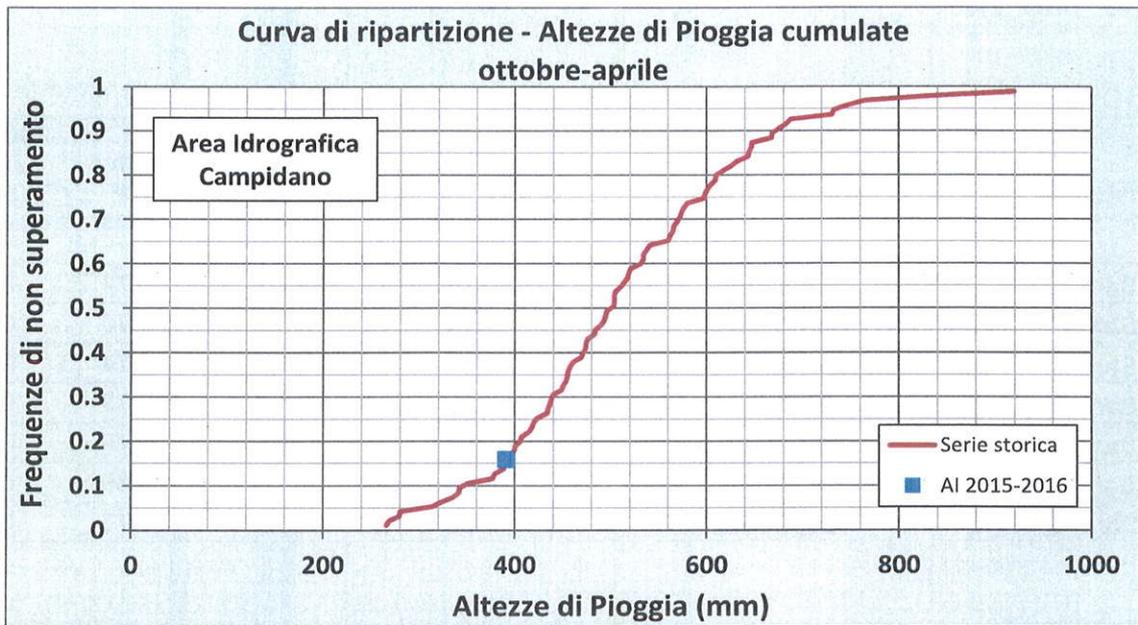
Alla luce di tali elementi emerge con chiarezza che le serie temporali di precipitazione annua sono caratterizzate da una significativa persistenza che si accentua ulteriormente per l'area idrografica della Gallura.

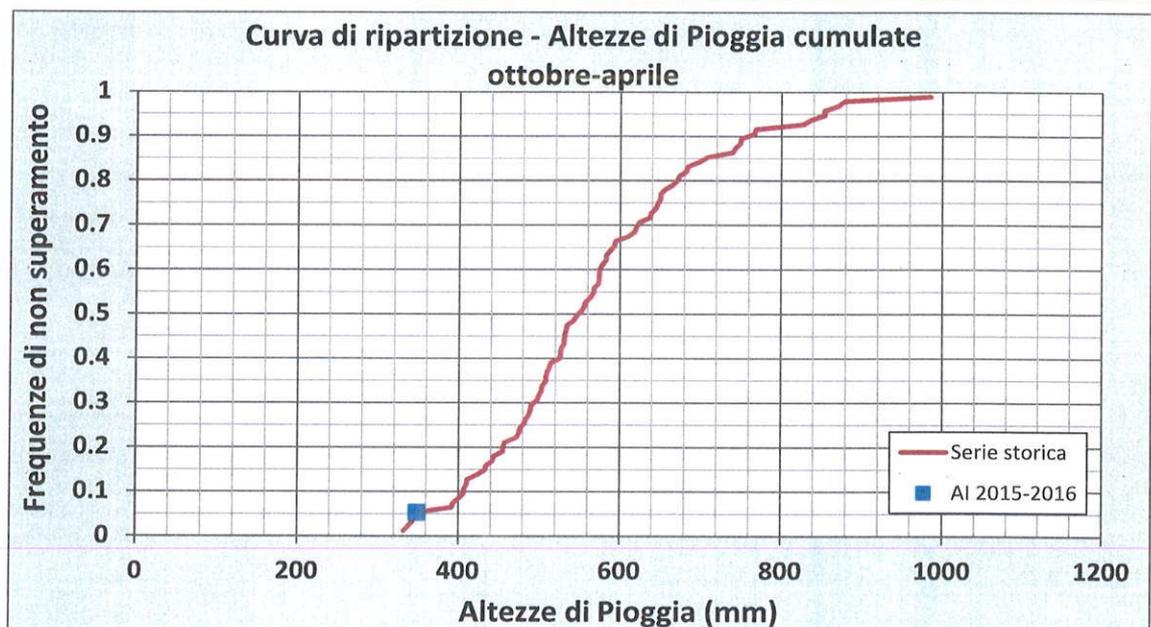
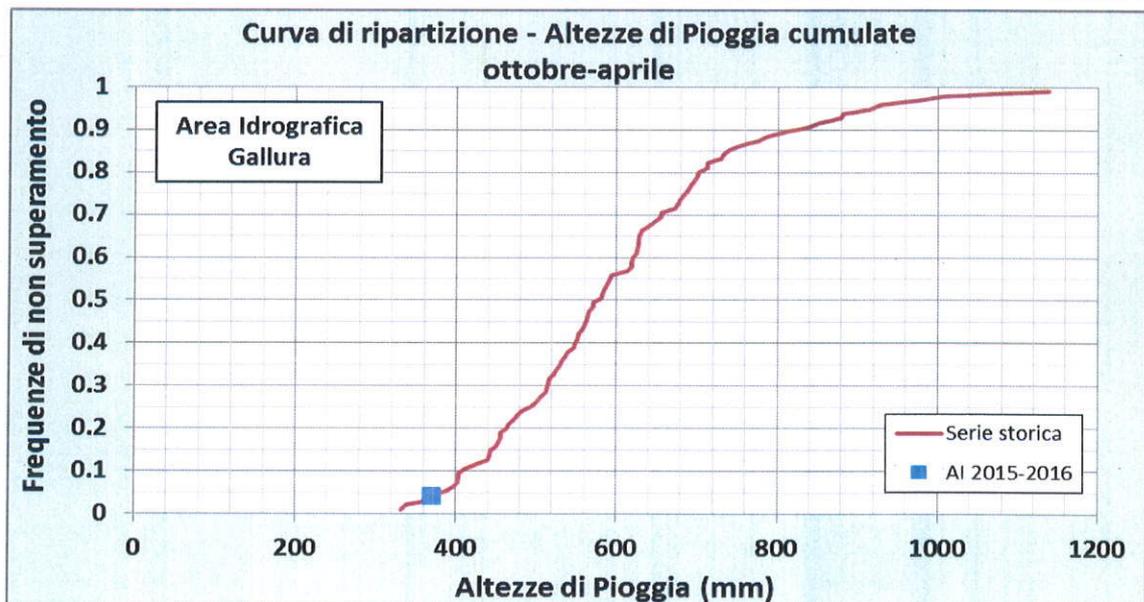
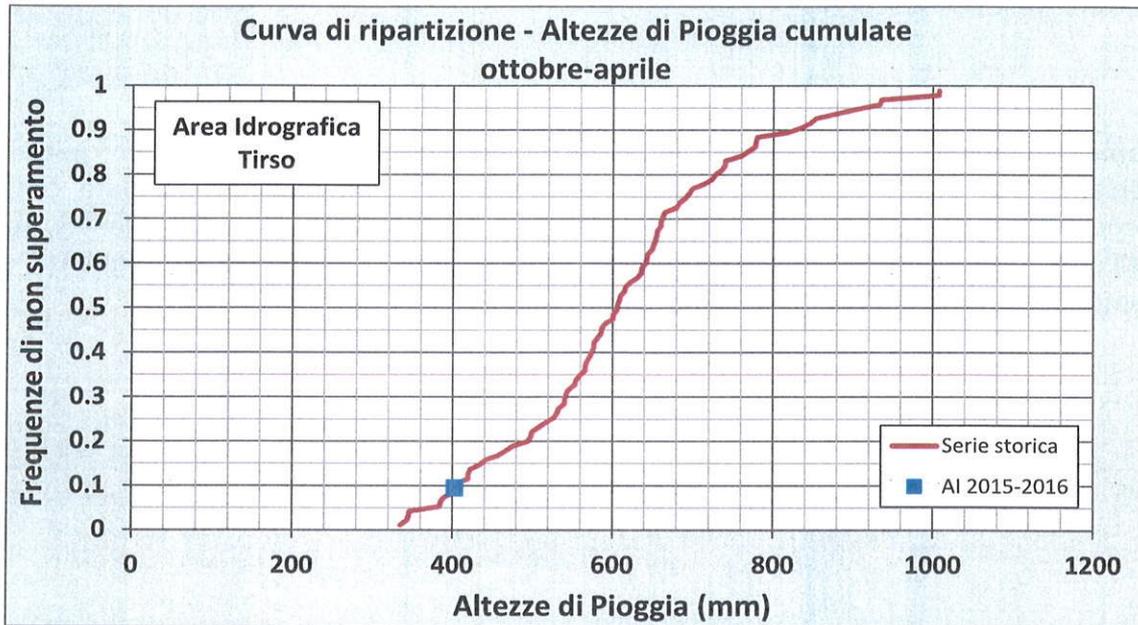
Tale aspetto non può certamente essere trascurato nel sistema di supporto alle decisioni in merito alla valutazione della disponibilità di risorsa idrica dai diversi schemi idraulici dell'isola, ricordando ancora che le variazioni nelle precipitazioni hanno un effetto ancora più rilevante sulle portate dei corsi d'acqua e quindi sugli apporti ai serbatoi artificiali.

Si è proceduto infine a dare una rappresentazione delle caratteristiche del corrente anno idrologico, 2015-16, in relazione alle frequenze osservate nell'ambito della serie storica, sempre con riferimento alle aree idrografiche di riferimento.

Analizzando i primi 7 mesi dell'anno, da ottobre a marzo, si è determinata quale è la posizione del corrente anno nella curva di ripartizione osservata, così come descritto nei grafici che seguono.







Come si può rilevare in tutte le aree idrografiche sono state registrati valori di precipitazione ben al di sotto della media. In particolare i valori più critici sono quelli della Gallura con una frequenza di non superamento osservata del 4% e del Logudoro con il 5%. Mentre, anche nell'area maggiormente interessata dalle precipitazioni, l'Iglesiente, la frequenza si è comunque attestata ad appena il 20%.

2.2 *La trasformazione Afflussi-Deflussi*

Lo Studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna, redatto alla fine degli anni '70, nell'ambito degli studi di settore preliminari al Piano Acque, ha riguardato la ricostruzione dei deflussi mensili con riferimento alla serie storica delle grandezze idrologiche del periodo 1922-1975, afferenti a un gran numero di sezioni di interesse, per una superficie complessiva dei bacini idrografici di 17.993 km² (su una superficie complessiva dell'isola di circa 24.000 Km²). Il bilancio idrologico complessivo risultava il seguente:

Afflussi	779.3 mm
Perdite	522.9 mm
Deflussi	256.4 mm
Coefficiente di deflusso	0.33

La valutazione dei deflussi su scala regionale era stata effettuata a partire dai bilanci idrologici ricostruiti su 30 bacini idrografici corrispondenti alle stazioni di misura di portata del Servizio Idrografiche che hanno significativamente funzionato a partire dal 1922.

A metà degli anni '90 lo Studio dell'Idrologia è stato aggiornato con i dati fino al 1992.

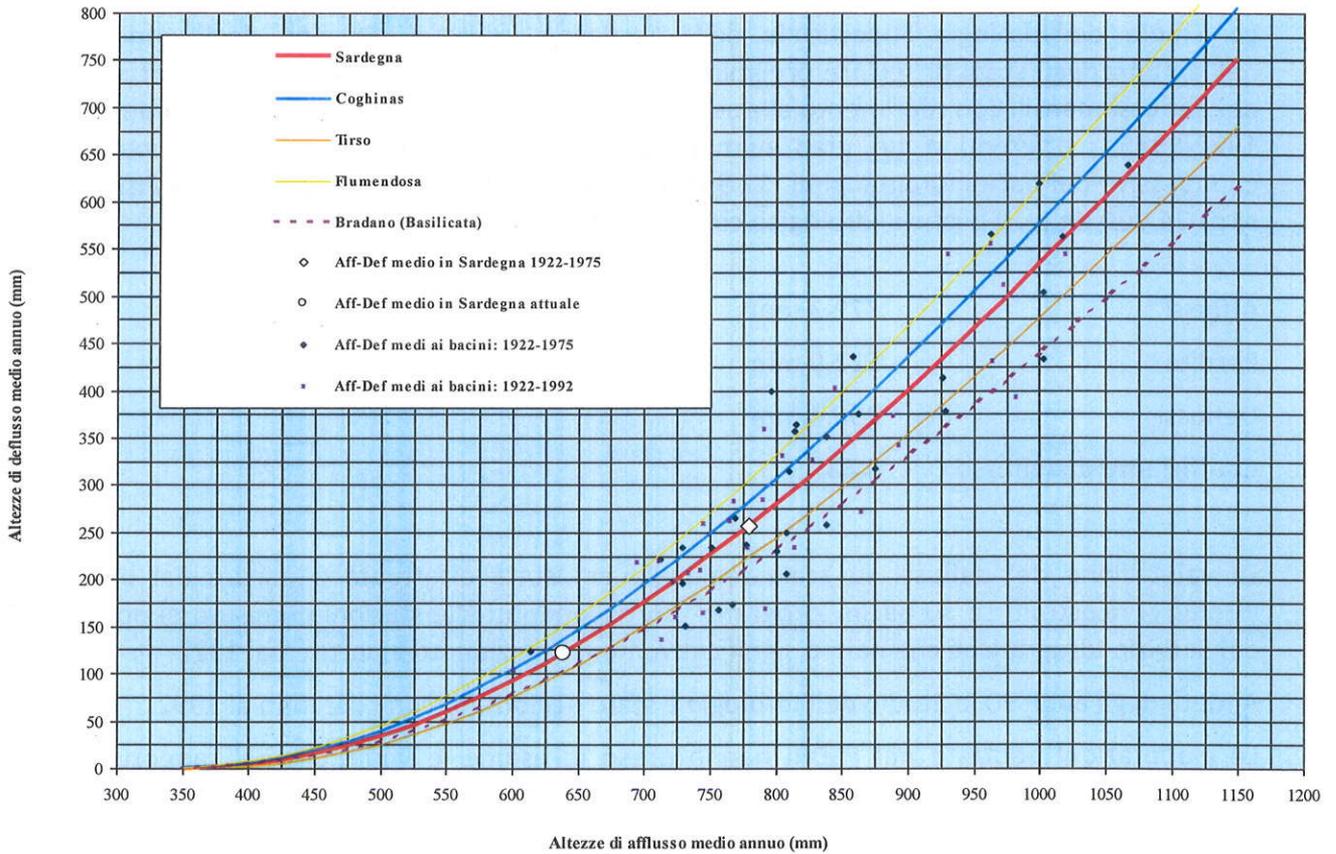
Le elaborazioni adottate nel PSDRI hanno preso in esame le variazioni del rapporto tra afflussi e deflussi al diminuire dell'entità del primo termine. Inserendo in un diagramma i valori di afflusso e di deflusso medio annuo di tutte le sezioni osservate dell'isola, si può ricostruire il legame tra le precipitazioni (afflussi) e le portate nei corsi d'acqua (deflussi). Tale diagramma consente di valutare gli effetti della riduzione delle piogge e di quantificare quanto tale riduzione incide sulle risorse superficiali potenzialmente utilizzabili (deflussi).

Tale legame, può essere correttamente interpretato da una funzione del tipo:

$$D_m^{1/3} = c_1 + c_2 \text{ LOG}(A_m)$$

Nella figura seguente è riportata la curva ottenuta mediante una regressione sui dati relativi a tutti i bacini osservati nel periodo 1922-1992 in Sardegna. Tale curva fornisce le caratteristiche medie che nell'isola caratterizza il processo di trasformazione afflussi-deflussi. Sullo stesso diagramma sono state poi riportate le curve relative ai bacini idrografici del Coghinas, del Tirso e del Flumendosa, unitamente a quella del fiume Bradano (Basilicata), riportata solo al fine di osservare la similitudine idrologica di tali relazioni nell'ambito dei bacini idrografici dell'Italia meridionale con clima semiarido mediterraneo.

TRASFORMAZIONE AFFLUSSI-DEFLUSSI



I parametri dell'equazioni valgono.

	C ₁	C ₂
Sardegna	-40.536	16.215
Coghinas	-40.536	16.285
Tirso	-40.536	16.117
Flumendosa	-40.536	16.349
Bradano (Basilicata)	-28.200	11.980

Si è, quindi, proceduto, utilizzando le relazioni analitiche descritte, sulla base degli afflussi ragguagliati del periodo 1922-23 / 1974-75 ed a quelli del periodo 1986-87 / 2001-02, alla valutazione dei principali parametri del bilancio idrico nei due periodi considerati.

I risultati sono sintetizzati nella tabella seguente.

		<i>Valori dimensionali in mm</i>	Sardegna	Coghinias	Tirso	Flumendosa
1922-23 / 1974-75	Afflussi		779.3	766.2	799.7	871.6
	Deflussi		256.4	266.4	244.4	427.8
A	Perdite		522.9	499.7	555.3	443.8
	Coefficiente di deflusso		0.33	0.35	0.31	0.49
1986-87 / 2001-02	Afflussi		639.0	669.2	666.1	700.6
	Deflussi		121.7	164.4	122.9	214.4
B	Perdite		517.3	478.6	543.2	486.2
	Coefficiente di deflusso		0.19	0.25	0.18	0.31
Rapporto	Afflussi		0.820	0.873	0.833	0.804
	Deflussi		0.475	0.617	0.503	0.501
B/A	Perdite		0.989	0.958	0.978	1.096
	Coefficiente di deflusso		0.579	0.707	0.604	0.623

La contrazione minima si registra nel Coghinias, con una riduzione nelle precipitazioni medie di quasi il 13% ed una contrazione dei deflussi di circa il 38%. La situazione più critica si ha sul Flumendosa, con riduzioni rispettivamente del 20% e di oltre il 50%.

Si sottolinea ancora che il problema più rilevante in termini di processo di pianificazione non è tanto la riduzione degli apporti naturali ai sistemi idrici che, una volta valutata, costituisce uno dei tanti elementi del sistema in esame, quanto che tale parametro appare connesso ad un alto grado di incertezza, trasferendo, in modo amplificato, detta incertezza agli scenari decisionali.

Nel PSDRI e come confermato dal PSURI, al fine di elaborare una prima valutazione delle risorse idriche potenzialmente utilizzabili in Sardegna con opere di captazione di risorse superficiali, è apparso opportuno assumere, come scenario idrologico di base, quello riferito ad una riduzione dei deflussi uniforme sull'intero territorio regionale, in misura pari al 55% della media del periodo storico di 53 anni 1922-23 / 1974-75, con, quindi, un nuovo valor medio pari al 45% di quello osservato in precedenza.

Tale assunzione è fatta, in via preliminare, sulla base delle seguenti considerazioni:

- il valore del 55% di riduzione è quello che si sta registrando nell'area dove il fenomeno appare più rilevante in Sardegna, anche ai fini dell'utilizzazione delle risorse: nel bacino del Flumendosa, nella zona sud orientale dell'isola;
- tale valore è molto simile a quello registrato sul Tirso, accomunando sotto tale aspetto i due maggiori bacini idrografici della regione;
- il fenomeno appare meno grave nell'area nord occidentale, nella quale d'altra parte la riduzione è sempre significativa. Comunque, il valore medio sull'isola è stimato pari al 52-53% di riduzione, corrispondente ad un valor medio pari al 47-48% di quello storico. Tali livelli sono molto prossimi a quelli osservati sul Flumendosa;

- come si è visto queste condizioni climatiche appaiono interessare l'intero bacino del Mediterraneo occidentale, per cui le diverse indicazioni territoriali registrate nell'isola potrebbero dipendere da situazioni contingenti e tendere ad uniformarsi all'estendersi della serie storica;
- l'esigenza di assumere parametri cautelativi nella valutazione delle risorse è sottolineata dal fatto che i parametri idrologici registrano differenze statisticamente significative rispetto al passato e non mostrano di aver ancora raggiunto una condizione di nuova stabilità. Il processo sembra essere ancora in evoluzione.

Ora è possibile, come illustrato in precedenza, disporre di una serie di osservazioni pluviometriche più estesa con 93 anni osservati di anni idrologici dal 1922-23 al 2014-15.

Purtroppo altrettanto non si può dire delle osservazioni sulle portate.

Pertanto al fine di fare ulteriori approfondimenti sulla problematica non resta che partire dalle piogge e procedere alla trasformazione afflussi-deflussi almeno per la stima del valor medio.

Si richiamano nella tabella che segue gli elementi caratteristici delle serie pluviometriche dei valori annui per le diverse aree idrografiche.

COD_AREA	NOME_AREA	Superficie (Kmq)	Precipitazione media annua 1922-23 / 2014-15 A (mm)	Precipitazione media annua 1922-23 / 1974-75 B (mm)	Precipitazione media annua 1922-23 / 1991-92 C (mm)	Precipitazione annua minimo del Kernel 0.2 intero periodo D (mm)	Precipitazione annua minimo del Kernel 0.2 1922-23 / 1974-75 E (mm)	D / E
Sard-A	Iglesiente	2510	648.5	682.4	667.8	576.1	663.4	0.87
Sard-B	Campidano	2540	625.7	649.6	641.0	571.9	606.2	0.94
Sard-C	Bacini Montevecchio-Plischlappiu	2350	704.6	739.6	724.3	620.1	714.2	0.87
Sard-D	Bacini Flumendosa-Flumineddu	5080	784.7	833.0	805.7	707.4	790.6	0.89
Sard-E	Bacino del Tirso	3340	755.6	799.3	778.4	670.0	768.8	0.87
Sard-F	Gallura	3290	736.8	788.2	752.1	640.3	717.5	0.89
Sard-G	Logudoro	4750	705.1	744.8	723.0	626.5	707.6	0.89

Considerando come indice significativo delle fluttuazioni climatiche legate alla persistenza nel medio periodo il valore del Kernel con $\lambda=0.2$ si ritiene opportuno valutare la modifica dei valori medi di deflusso relativi al primo 53ennio e quelli degli anni successivi considerando i valori minimi della funzione di smoothing nel primo periodo ed il valor minimo assoluto della medesima funzione che, come si è visto si è registrato generalmente intorno alla metà degli anni '90.

Applicando le equazioni di trasformazione sopra riportate si è pervenuti ai seguenti risultati.

COD_AREA	NOME_AREA	Superficie (Kmq)	Relazione Afflussi/Deflussi	Precipitazione media annua (mm)	Precipitazione media annua 1922-23 / 1991-92 C (mm)	Precipitazione annua minimo del Kernel 0.2 intero periodo D (mm)	Precipitazione annua minimo del Kernel 0.2 1922-23 / 1974-75 E (mm)	D / E
Sard-D	Bacini Flumendosa-Flumineddu	5080	Flumendosa	790.6	320.4	707.4	221.8	0.69
Sard-E	Bacino del Tirso	3340	Tirso	768.8	213.3	670.0	125.9	0.59
Sard-G	Logudoro	4750	Coghinas	707.6	202.6	626.5	125.9	0.62

Si evidenzia innanzitutto che il coefficiente di elasticità dei deflussi in rapporto a quello della pioggia vale circa 3.3 volte, assolutamente in linea con il range stimato per i bacini australiani nello studio citato in precedenza, collocandosi in prossimità con il valore superiore coerentemente con le caratteristiche climatiche semiaride mediterranee della Sardegna.

In definitiva volendo utilizzare come “banco di prova” la serie storica ricostruita per tutte le sezioni di interesse dalla Sardegna per il periodo 1922-1975 nell’ambito dello Studio dell’Idrologia Superficiale della Sardegna, redatto alla fine degli anni ’70, nell’ambito degli studi di settore preliminari al Piano Acque, risulta necessario ‘risalare’ la media tenendo conto dei risultati sopra esposti.

A tal fine si è valutato di adottare per l’intera isola un coefficiente di riduzione della media pari a 0.6 che è sostanzialmente il valor minimo nelle tre aree idrografiche analizzate, in relazione alla necessità di assumere valutazioni cautelative dal punto di vista della stima delle erogabilità.

Un altro aspetto, importante, riguarda l’analisi del valore dello scarto delle serie temporali dei deflussi. Assunte le ipotesi sulla media, risulta ora necessario valutare in che misura si modifica, in corrispondenza a tali ipotesi, lo scarto della variabile “deflusso annuo”, essendo evidente che in teoria non può essere imposto semplicemente senza ulteriori analisi per tale serie il medesimo coefficiente di variazione connesso alle medie precedenti.

Tuttavia tali analisi non hanno evidenziato nell’ambito delle serie di precipitazione trend significativi, denotando anzi una sostanziale costanza del coefficiente di variazione e quindi evidenziando il fatto che lo scarto si modifica analogamente alla media.

D’altra parte il processo di trasformazione afflussi-deflussi non è lineare e quindi dovendo ipotizzarne gli effetti sui deflussi della variazione della media degli afflussi, sempre per il principio di cautela, si è ritenuto di ridurre lo scarto del coefficiente di 0.8, pervenendo così ad un incremento del coefficiente di variazione del 33%.

In definitiva, nelle elaborazioni adottate è apparso corretto e coerente con i risultati delle analisi precedentemente descritte assumere, per la definizione dello scenario idrologico di base, quali nuovi parametri statistici per le serie dei deflussi alle sezioni di interesse i seguenti valori:

- media = 0,60 x la media del periodo 1922-23 / 1974-75
- scarto = 0,80 x lo scarto del periodo 1922-23 / 1974-75

2.3 *La ricostruzione dei deflussi alle sezioni di interesse*

Lo studio delle possibilità di erogazione dei diversi schemi del Sistema Idrico Multisetoriale Regionale deve essere sviluppata mediante modelli di simulazione che valutino le prestazioni del sistema utilizzando come input le serie dei deflussi alle diverse sezioni di interesse con passo temporale mensile.

Tali serie devono essere sufficientemente estese, come numero di anni, da consentire di rappresentare adeguatamente i processi di regolazione di grandi serbatoi artificiali, con coefficienti di utilizzazione rispetto al media delle portate naturali piuttosto elevati, che si protraggono anche fino a dieci anni. L'estensione complessiva del periodo critico si amplifica via via che aumenta il livello di interconnessione fra i principali sistemi idrici dell'isola.

In relazione a ciò non appare adeguato, dal punto di vista dell'estensione temporale, utilizzare come base della simulazione la serie dei deflussi mensili di un numero di anni limitato ma la cui media sia la più ridotta, e quindi più cautelativa per la valutazione delle effettive disponibilità.

D'altra parte, la complessità dei sistemi idrici e, quindi, il notevole numero di sezioni di interesse, l'ampia estensione territoriale dei bacini idrografici connessi a tali sezioni, impongono di rispettare la struttura di correlazione spaziale naturale delle serie dati di deflusso nei bacini idrografici dell'isola.

Sulla base di tali considerazioni, nel Piano d'Ambito, nel PSDRI e nel PSURI è stata messa a punto una procedura di generazione che soddisfa l'esigenza di trovare soluzioni corrette ma speditive per la definizione della base dati da utilizzare come input della simulazione. Si è adottata la procedura seguente :

- la base dati su cui si opera è rappresentata dalle serie storiche dei deflussi ai bacini totali delle sezioni di interesse ricostruiti per tutto il territorio regionale nell'ambito dello studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (EAF, 1996) per il 53ennio 1922-23 / 1974-75, in cui i parametri statistici fondamentali mostrano un sufficiente grado di stazionarietà;
- in relazione alle rilevazioni dei parametri idrologici degli ultimi anni, come descritto nel paragrafo precedente, si riscalano le serie dei deflussi al fine di imporre, per il 53ennio, la nuova media ridotta al 60% della rispettiva media storica e lo scarto pari all'80% del corrispettivo valore storico. Tale operazione viene effettuata, di volta in volta, per tutte i bacini parziali corrispondenti alle sezioni di interesse definite dalla localizzazione sulle aste fluviali delle opere di captazione e regolazione previste nella configurazione infrastrutturale da sottoporre a verifica mediante simulazione.

Nello specifico l'applicazione dello schema descritto porta alle seguenti fasi operative:

- acquisizione dalla banca dati dello studio dell'Idrologia Superficiale della Sardegna (EAF, 1996) della serie storica dei deflussi mensili alla sezione di interesse

parziale (in relazione alla configurazione delle infrastrutture presenti nella simulazione) per il periodo 1922-23 / 1974-75;

- calcolo della serie storica dei deflussi per anno idrologico nel medesimo periodo;
- determinazione con il metodo dei momenti dei parametri della distribuzione lognormale imponendo il rispetto della media e dello scarto della serie storica. Si adotta pertanto la seguente espressione che trasforma il valore D_i , deflusso totale dell'anno i alla sezione di interesse, nella variabile di Gauss standardizzata z :

$$z_i = a \log_{10} D_i + b$$

Per stimare i parametri a e b si ricorre al metodo dei momenti, sapendo che essi sono legati alla media μ ed allo scarto σ dalle relazioni:

$$a = 1,517 / \sqrt{\log_{10} [1 + \sigma^2 / \mu^2]}$$

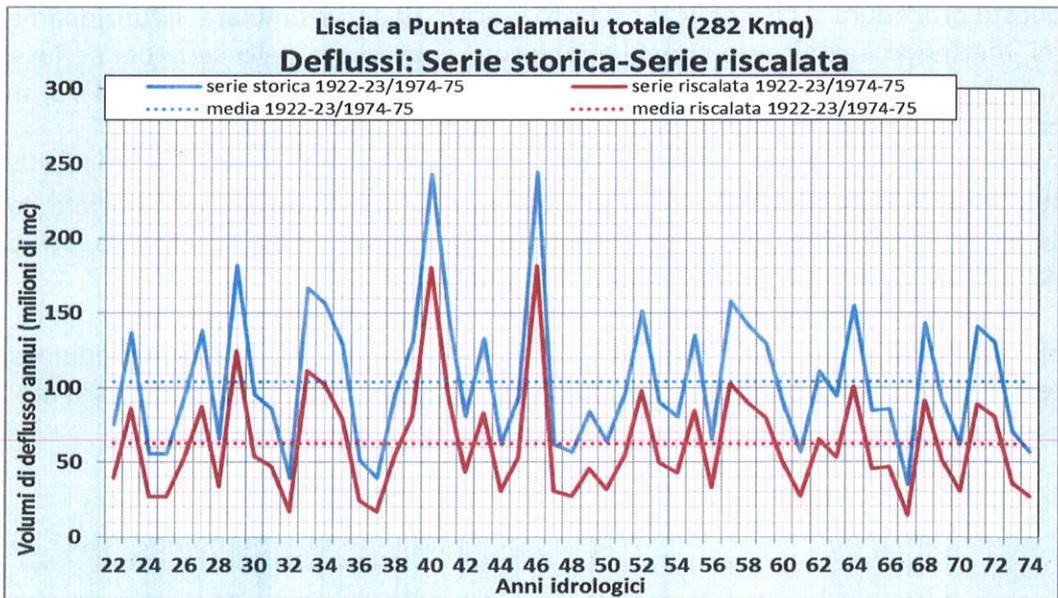
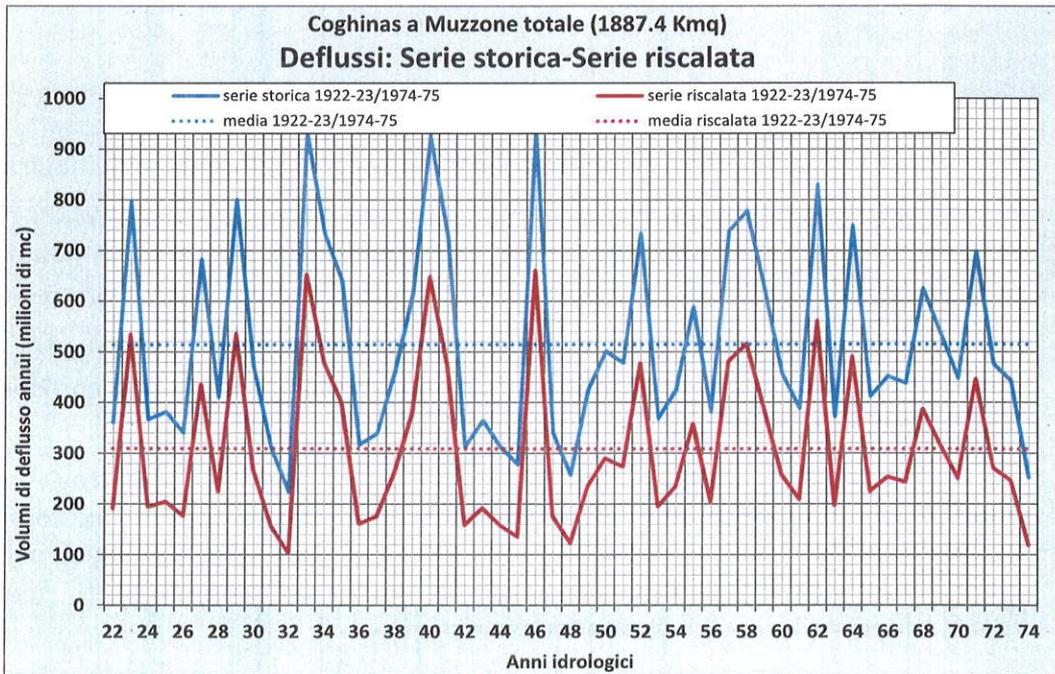
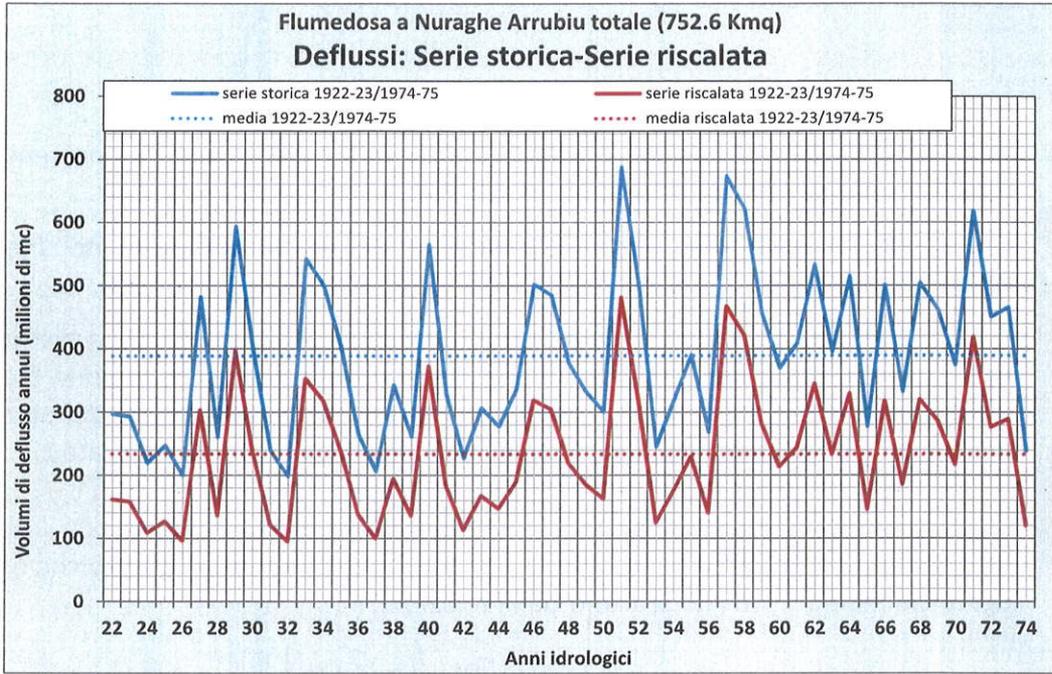
$$b = 1,151/a - a \log_{10} \mu$$

- trasformazione della serie dei deflussi nella corrispondente serie dei frattili z_i ;
- determinazione con il metodo dei momenti dei nuovi parametri (a^* e b^* , mediante l'espressioni precedenti) della distribuzione lognormale imponendo una media pari al 60% della media storica ed uno scarto pari al 80% del valore storico;
- antitrasformazione della serie dei frattili z_i , calcolati in precedenza, in una nuova serie di deflussi D_i^* , caratterizzata da una media ed uno scarto corrispondenti alle assunzioni adottate;
- per ogni anno idrologico si calcola il coefficiente dato dal rapporto D_i^* / D_i tra il nuovo valore di deflusso ed il valore di deflusso della serie originale. Tale coefficiente viene poi moltiplicato per tutti i valori mensili del singolo anno idrologico della serie di partenza, per ottenere la serie completa dei deflussi ricostruiti, con passo temporale mensile, con le caratteristiche richieste.

Con questa procedura si consegue il risultato cercato di poter simulare il funzionamento dei sistemi, mettendo a confronto risorse e fabbisogni, sulla base della serie dei deflussi estesa su un periodo di 53 anni che riproduce l'andamento storico, 1922-23 / 1974-75, ma con i parametri statistici adeguati alle più recenti condizioni climatiche.

Un altro aspetto importante da sottolineare è quello che la procedura adottata conserva, per le serie ricostruite alle varie sezioni di interesse, integralmente la struttura di correlazione spaziale e temporale delle serie originali.

A titolo esemplificativo si riportano nei grafici seguenti i risultati della procedura adottata mettendo a confronto per alcuni bacini significativi le serie originali e quelle riscalate.



Si è proceduto, quindi, a verificare gli effetti di tale definizione delle serie idrologiche di riferimento sulle erogabilità di alcuni schemi idrici.

E' stato quindi predisposto a tal fine un modello di simulazione per la gestione del sistema idraulico di rifornimento idrico che sia in grado di ben rappresentare con modelli matematici sia le caratteristiche funzionali degli elementi strutturali (serbatoi, condotte, canali, impianti di pompaggio, impianti idroelettrici, ecc.) e sia i fenomeni naturali che interessano tali infrastrutture quale ad esempio l'evaporazione dai laghi e sia le regole operative scelte per la gestione ottimale della risorsa acqua.

Il primo passo è quello di definire il volume massimo erogabile con zero deficit nell'ambito della serie temporale utilizzata come banco di prova.

Tale indicazione potrà poi essere utilizzata per definire regole operative che, al fine di meglio sfruttare le caratteristiche dei diversi anni idrologici, consentano di stabilire annualmente i volumi erogabili in relazione allo stato delle riserve idriche presenti nei diversi schemi idrici dell'isola.

Nei grafici che seguono, come detto a titolo esemplificativo, sono riportati i risultati della procedura di simulazione per gli schemi idrici dell'Alto Coghinas e del Liscia per i quali sono state individuate le massime erogazioni multisettoriali che determinano in entrambi gli schemi un volume minimo invasato nell'intero periodo simulato pari al 10% della capacità massima autorizzata.

