

RAPPORTO

USO RISERVATO

APPROVATO

C0011329

Cliente Enel Produzione SpA

Oggetto Progetto per il recupero ambientale della miniera di Santa Barbara nei comuni di Cavriglia (AR) e di Figline ed Incisa Valdarno (FI).

Aggiornamento dell'analisi modellistica del bilancio idrico e della qualità delle acque dei bacini dei laghi Castelnuovo, Allori e San Cipriano.

Ordine Attingimento N. 3500071692 del 24/01/2020

Note REV. 3 (A1300002331 – Lettera di trasmissione C0011331)

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

N. pagine 177 **N. pagine fuori testo** 95

Data 27/07/2020

Elaborato STC - Dassie Giuseppe Augusto, STC - Passeri Valentina, STC - Colombo Daniela
C0011329 3800 AUT C0011329 484514 AUT C0011329 3821 AUT

Verificato EDM - Granata Tommaso
C0011329 3744 VER

Approvato EDM - Il Responsabile - Sala Maurizio
C0011329 3741 APP

CESI S.p.A.

Via Rubattino 54
I-20134 Milano - Italy
Tel: +39 02 21251
Fax: +39 02 21255440
e-mail: info@cesi.it
www.cesi.it

Capitale sociale € 8.550.000 interamente versato
C.F. e numero iscrizione Reg. Imprese di Milano 00793580150
P.I. IT00793580150
N. R.E.A. 429222

© Copyright 2020 by CESI. All rights reserved

Pag. 1/177

Indice

1	SINTESI	4
2	INQUADRAMENTO TERRITORIALE.....	5
2.1	Analisi delle condizioni idrauliche	6
2.1.1	Lago di San Cipriano.....	6
2.1.2	Lago di Allori	6
2.1.3	Lago di Castelnuovo	7
2.1.4	Caratteristiche del sistema Allori-Castelnuovo-San Cipriano.....	8
3	PARAMETRI METEOCLIMATICI.....	10
3.1	Temperatura, umidità, vento, irraggiamento	10
3.2	Stima delle precipitazioni giornaliere	13
3.2.1	Premessa	13
3.2.2	Il bacino del lago di Allori	14
3.2.3	Il bacino del lago di Castelnuovo	16
3.2.4	Il bacino del lago di San Cipriano	18
3.3	Omogeneità dei dati meteorologici	20
4	ANALISI IDROLOGICA.....	22
4.1	Modellazione afflussi/deflussi – codice HEC-HMS	22
4.2	Risultati del modello idrologico (HEC-HMS)	27
4.2.1	Il bacino del lago di Allori	27
4.2.2	Il bacino del lago di Castelnuovo	29
4.2.3	Il bacino del lago di San Cipriano	31
4.2.4	Considerazioni conclusive	34
4.3	Confronto con le evidenze del Piano Stralcio del Bilancio idrico della regione Toscana	35
4.3.1	Premessa	35
4.3.2	L’approccio tecnico-scientifico	35
4.3.3	I parametri del confronto.....	35
4.4	Verifica di ottemperanza alla prescrizione ministeriale A1.3 MATTM	45
4.4.1	La riserva idrica dei suoli.....	45
5	ANALISI TERMO-IDRAULICA	48
5.1	Descrizione del modello termo-idraulico utilizzato	48
5.2	Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di San Cipriano.....	52
5.2.1	Dati di input utilizzati	52
5.2.2	Risultati della modellazione	53
5.3	SCENARIO A - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Allori	61
5.3.1	Dati di input utilizzati	61
5.3.2	Risultati della modellazione	62
5.4	SCENARIO A - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Castelnuovo	68
5.4.1	Dati di input utilizzati	68
5.4.2	Risultati della modellazione	69
5.5	SCENARIO B - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Allori	76
5.5.1	Dati di input utilizzati	76
5.5.2	Risultati della modellazione	77

5.6	SCENARIO B - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Castelnuovo	84
5.6.1	Dati di input utilizzati	84
5.6.2	Risultati della modellazione	85
5.7	Considerazioni conclusive.....	91
6	VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO DEI TRE LAGHI.....	92
6.1	Valutazione del tempo di ricambio del lago di San Cipriano	92
6.2	Valutazione del tempo di ricambio del lago di Allori	94
6.3	Valutazione del tempo di ricambio del lago di Castelnuovo	96
6.4	Considerazioni conclusive.....	98
7	ANALISI BIO-CHIMICA.....	99
7.1	Qualità delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di San Cipriano, Allori e Castelnuovo	99
7.1.1	Caratterizzazione dei bacini e dei relativi immissari.....	104
7.1.2	Stima della concentrazione dei parametri stagionali per i volumi immessi nei singoli laghi	109
7.2	Modello biochimico	115
7.3	Analisi delle portate ai laghi nei periodi dei rilievi per una più corretta definizione dei carichi in ingresso ai laghi	118
7.4	Modellazione del bilancio biochimico del lago di San Cipriano	122
7.4.1	Dati di input utilizzati	122
7.4.2	Risultati della modellazione	123
7.5	SCENARIO A - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori	131
7.5.1	Dati di input utilizzati	131
7.5.2	Risultati della modellazione	132
7.6	SCENARIO A - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo	138
7.6.1	Dati di input utilizzati	138
7.6.2	Risultati della modellazione	139
7.7	SCENARIO B - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori	145
7.7.1	Dati di input utilizzati	145
7.7.2	Risultati della modellazione	146
7.8	SCENARIO B - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo	152
7.8.1	Dati di input utilizzati	152
7.8.2	Risultati della modellazione	153
7.9	Discussione dei risultati relativi al sistema Allori - Castelnuovo	159
7.9.1	Risultati della modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori.....	159
7.9.2	Risultati della modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo	160
7.10	Valutazione dello stato trofico dei laghi S. Cipriano, Allori e Castelnuovo.....	163
8	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	168
8.1	Modellazioni idrologiche – idrauliche	169
8.2	Modellazioni bio – chimiche	170
9	BIBLIOGRAFIA CITATA O CONSULTATA.....	175
	ALLEGATO 1 AL RAPPORTO C0011329.....	177

STORIA DELLE REVISIONI

Numero revisione	Data	Protocollo	Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati
0	11/12/2015	B5000045	Prima emissione
1	28/01/2016	B6002334	Refuso
2	17/05/2019	B9009722	Modificati paragrafi 2.1.4, 3.2, 4.4.1, 5.3.2, 6
3	21/07/2020	C0011329	Rifacimenti e ottimizzazioni modellistiche; aggiornamento dati al 2019

1 SINTESI

La conclusione dell'attività estrattiva nell'area di Santa Barbara ha comportato la necessità di provvedere ad un riassetto complessivo sfociato nel decreto della Regione Toscana n. 416 del 9 febbraio 2010 avente per oggetto la *Autorizzazione del piano di recupero ambientale della concessione "Santa Barbara" nei Comuni di Cavriglia e Figline Valdarno*.

Lo studio in oggetto riguarda l'esecuzione di quanto previsto in ambito idrologico e di qualità delle acque in merito alla Prima Fase Attuativa del progetto per il recupero ambientale della miniera di Santa Barbara nei comuni di Cavriglia (AR) e Figline ed Incisa Valdarno (FI).

In particolare, in base al documento preparato da Enel "*Prima fase attuativa. Studio generale su bilancio idrologico e qualità delle acque. Relazione di Sintesi. Rev. 01*" (Enel, 2014) si è proceduto con le seguenti attività:

1. sono state effettuate campagne di misura stagionali per il monitoraggio della qualità delle acque degli invasi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano e dei rispettivi borri immissari nel periodo novembre 2014 – agosto 2015 (rilievi CESI riportati in Allegato CESI B6002088), nel periodo autunnale dal 2016 al 2019 e nel mese di giugno per gli anni 2018, 2019 (rilievi società CIERRE);
2. è stato aggiornato il bilancio idrologico - idraulico dei laghi di Castelnuovo, Allori e San Cipriano; la modellazione idrologica - idraulica è stata eseguita utilizzando un ampio e rappresentativo set di dati meteorologici di input (01/09/1992 ÷ 31/12/2019). Le analisi numeriche, che hanno permesso di valutare anche il tempo di ricambio o di permanenza di ciascun invaso, sono state eseguite mediante una nuova formulazione modellistica basata sulle curve di invaso e sulle scale di deflusso di ciascuno dei tre laghi considerati previa taratura dei parametri idrologici (la fase di taratura, eseguita sulle misure relative all'invaso di San Cipriano, è oggetto del rapporto CESI Prot. C0007404);
3. è stata aggiornata la modellazione biochimica della qualità delle acque dei tre invasi assumendo come dati di input sia i bilanci aggiornati di cui al punto precedente, sia le misure ricavate dalle campagne di monitoraggio stagionale (in Allegato); l'analisi ha riguardato l'andamento nel tempo dei valori di parametri quali BOD5, Fosforo totale, *Escherichia coli*, Enterococchi intestinali, Coliformi fecali e *Salmonella spp.*

Il presente rapporto descrive le elaborazioni di quanto ai punti 2 e 3 di cui sopra costituendo, dunque, l'aggiornamento del precedente documento CESI B9009722 del 2019.

2 INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area estrattiva di Santa Barbara si estende tra i comuni di Cavriglia (AR) e Figline ed Incisa Valdarno (FI). In tale area Enel ha condotto tra il 1956 e il 1994 un'intensa attività estrattiva a supporto della produzione dell'omonima centrale termoelettrica. La conclusione dell'attività mineraria per esaurimento del giacimento ha comportato la necessità di provvedere ad un riassetto complessivo dell'area che prevede, tra l'altro, la risistemazione di alcuni dei numerosi borri (corsi d'acqua a carattere effimero) che costituiscono la rete idrografica del luogo e la creazione di due laghi, tra loro collegati, nelle depressioni costituite dalle ex miniere di Allori e Castelnuovo. La Figura 1 che segue localizza l'area, l'esistente bacino di San Cipriano ed i due nuovi laghi ora menzionati.

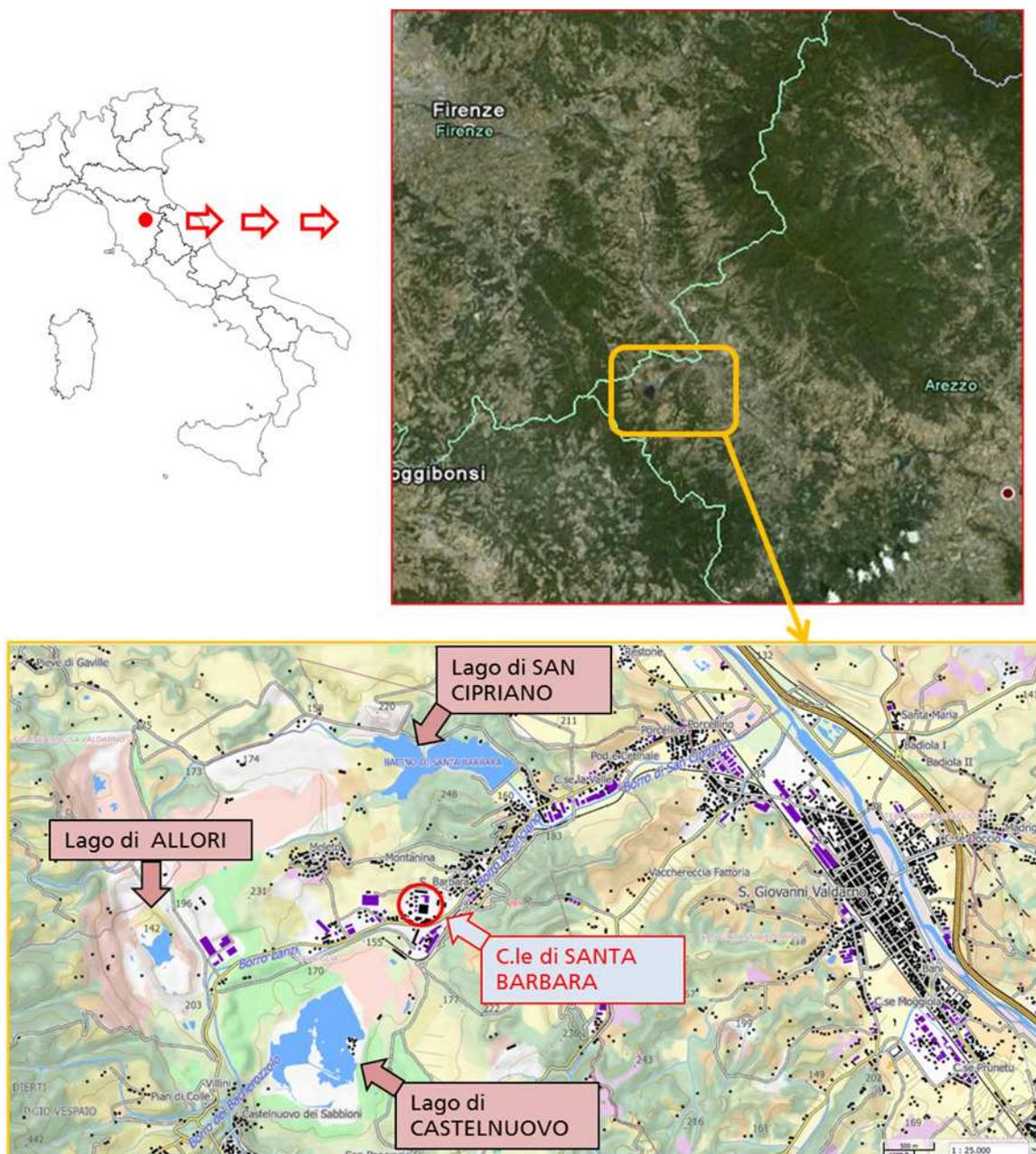


Figura 1 - Inquadramento dell'area di studio (fonte Google Earth e www.rete.toscana.it/cartografia).

2.1 Analisi delle condizioni idrauliche

Le condizioni idrauliche generali ipotizzate per questo studio si basano in parte su informazioni derivanti da studi precedenti e per quanto riguarda San Cipriano anche da dati ricavati dal FCEM (Foglio Condizioni per l'Esercizio e la Manutenzione della diga) e sono riassunte nei paragrafi seguenti:

Nell'area oggetto di studio, il progetto di riassetto ha utilizzato essenzialmente due basi cartografiche: la cartografia a grande scala (1:1.000) commissionata dalla Miniera di S. Barbara ripetutamente nel tempo a varie aziende specializzate nel rilievo aerofotogrammetrico e la cartografia di produzione regionale (CTR in scala 1:10.000).

A tale proposito per quanto concerne le quote assolute indicate nel seguito del rapporto si precisa che la variazione di - 1 m rispetto a quanto riscontrabile nel precedente rapporto CESI B3018674 del 2013 è dovuta ad una discrepanza tra la cartografia ufficiale CTR e quella adottata localmente per la progettazione esecutiva del riassetto dell'area mineraria (Enel, 2015). L'aggiornamento delle quote è effetto della correzione della base cartografica annunciata a pag. 5 del documento "Prima fase attuativa. Studio generale su bilancio idrologico e qualità delle acque – Relazione di Sintesi" datato 10/07/2014.

2.1.1 Lago di San Cipriano

• fondo del lago ¹ :	143.00 m s.l.m.
• quota di massimo invaso:	152.30 m s.l.m.
• superficie alla quota di massimo invaso ² :	472 948 m ²
• volume alla quota di massimo invaso:	2 183 039 m ³
• quota di massimo utilizzo:	151.30 m s.l.m.
• superficie alla quota di massimo utilizzo ³ :	423 240 m ²
• volume alla quota di massimo utilizzo ³ :	1 737 919 m ³

2.1.2 Lago di Allori

• fondo del lago:	169.00 m s.l.m.
• quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta):	182.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima ritenuta:	530 470 m ²
• volume alla quota di massima ritenuta:	4 409 684 m ³
• quota di massima piena:	185.00 m s.l.m.
• superficie alla quota di massima piena:	551 420 m ²
• volume alla quota di massima piena:	6 032 519 m ³

In Figura 2 è riportato lo schema dell'idrografia e dei bacini imbriferi di Allori e San Cipriano.

¹ quota più bassa ricavata dalla batimetria effettuata da CESI nel 2011

² dati ricavati dal FCEM di San Cipriano

³ dato ricavato dalla batimetria eseguita da CESI del 2011



Figura 2 - Stato di progetto: morfologia e idrografia degli invasi di Allori e San Cipriano (fonte Google Earth).

2.1.3 Lago di Castelnuovo

- | | |
|---|---------------------------|
| • fondo del lago: | 136.40 m s.l.m. |
| • quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta): | 146.00 m s.l.m. |
| • superficie alla quota di massima ritenuta: | 1 260 000 m ² |
| • volume alla quota di massima ritenuta: | 12 102 000 m ³ |
| • quota di massima piena: | 148.00 m s.l.m. |
| • superficie alla quota di massima piena: | 1 390 000 m ² |
| • volume alla quota di massima piena: | 14 779 000 m ³ |

In Figura 3 è riportato lo schema dell'idrografia e del bacino imbrifero afferente all'invaso di Castelnuovo.

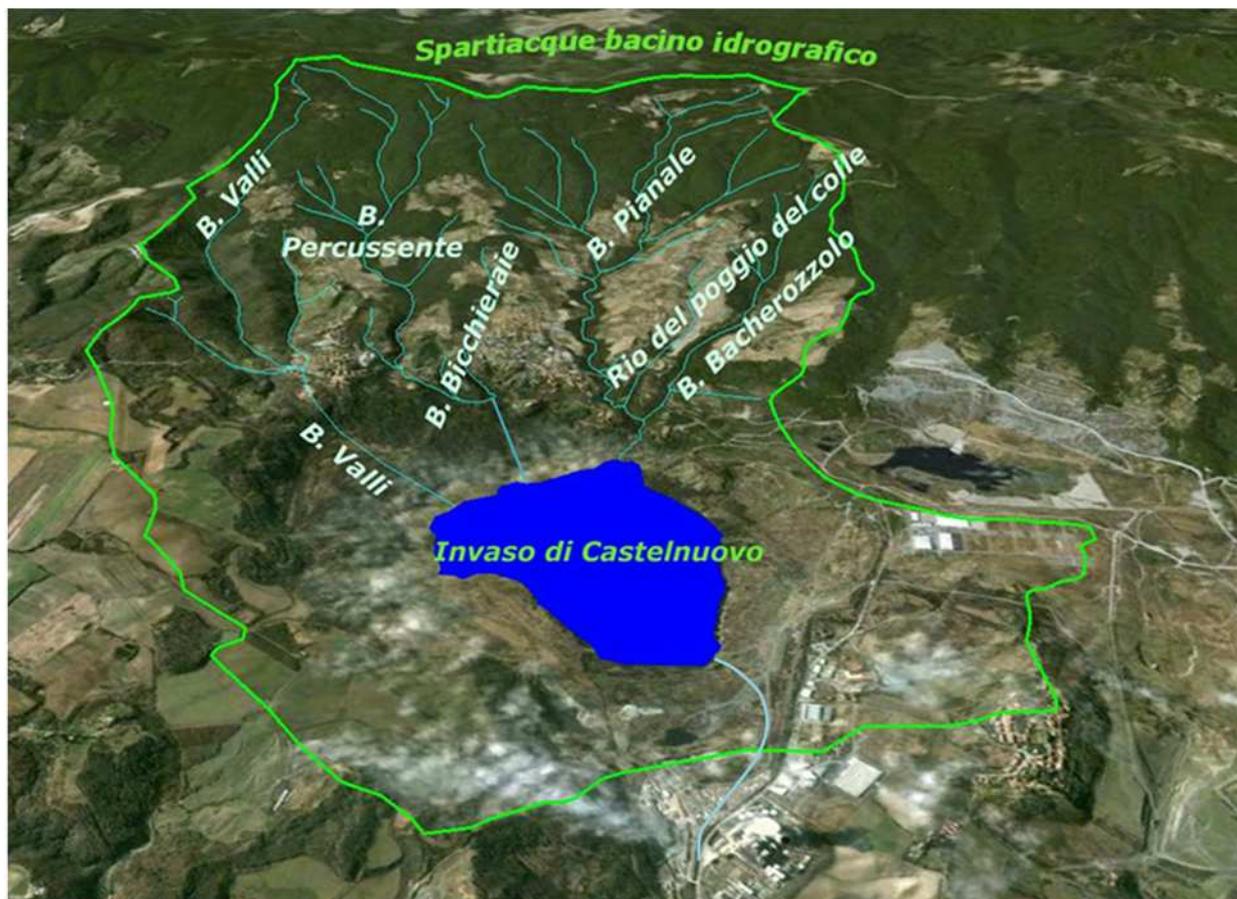


Figura 3 - Stato di progetto: morfologia e idrografia del bacino di Castelnuovo (fonte Google Earth).

2.1.4 Caratteristiche del sistema Allori-Castelnuovo-San Cipriano

Le principali caratteristiche morfologiche dei bacini in esame sono state esposte nei paragrafi precedenti; di seguito sono invece riassunte altre condizioni al contorno del sistema idraulico in esame, necessarie per le successive modellazioni, così come concordate con il Committente:

- trasferimento dal lago di Allori al lago di Castelnuovo di una eventuale portata con il fine di diluire le acque del lago di Castelnuovo; l'opera di derivazione è dotata di un manufatto di presa con soglia a quota 181.00 m s.l.m.;
- rilascio, dal lago di Allori, di una portata di DMV di 10 l/s nel corpo idrico ricettore quando disponibili (prescrizione A1.3, del MATTM, Commissione Tecnica per le Verifiche dell'Impatto Ambientale VIA-VAS - parere n. 224 del 19.12.2008);
- rilascio, dal lago di Castelnuovo, di una portata di DMV pari a 12 l/s nel corpo idrico ricettore quando disponibili (prescrizione A1.3, del MATTM, Commissione Tecnica per le Verifiche dell'Impatto Ambientale VIA-VAS - parere n. 224 del 19.12.2008);
- prelievo, dal lago di Castelnuovo, di una portata costante pari a 11.6 l/s (1000 m³/giorno) secondo richiesta del Comune di Cavriglia;
- prelievo dal fiume Arno, tramite pompaggio, e immissione nell'invaso di San Cipriano di portate di reintegro per garantire la disponibilità idrica necessaria al funzionamento della centrale; i

quantitativi prelevati hanno entità variabile e vengono calcolati come differenza tra i deflussi naturali in ingresso al bacino di San Cipriano e il fabbisogno idrico della centrale. Inoltre, in accordo con il relativo disciplinare di concessione, il prelievo dal fiume Arno è interdetto dal 1° luglio al 30 settembre a tutela delle condizioni di magra estiva del fiume Arno;

- rilascio, dal bacino di San Cipriano, di un deflusso minimo vitale pari a 10 l/s nel corpo idrico ricettore;
- prelievo, dal bacino di San Cipriano, di una portata mensilmente variabile utilizzata per il funzionamento della centrale di Santa Barbara.

Lo schema idraulico dell'area oggetto di studio è mostrato in Figura 4.

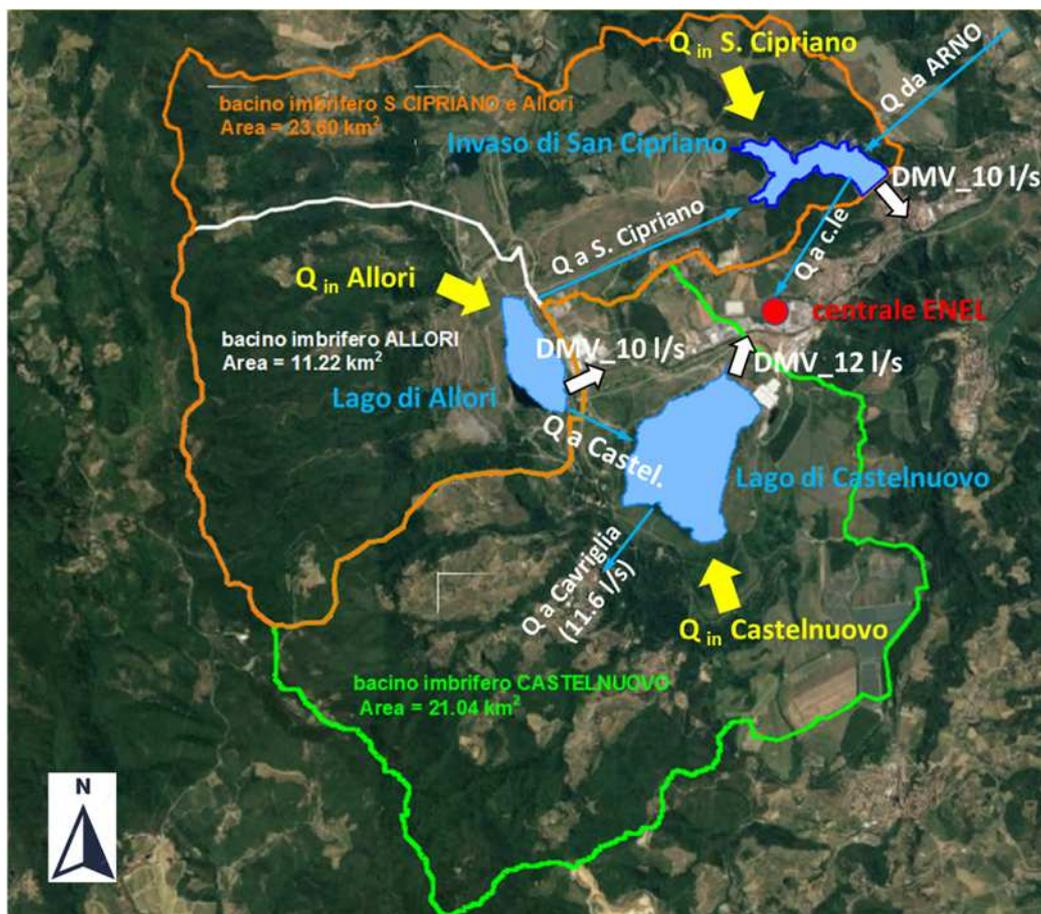


Figura 4 – Schema idraulico dei tre bacini.

Lo schema mostrato nell'immagine precedente si basa sul nuovo assetto idrografico previsto nel progetto di sistemazione della rete drenante esistente, ancora da realizzare al momento della stesura del presente documento.

3 PARAMETRI METEOCLIMATICI

I dati meteo climatici considerati per le verifiche numeriche riguardanti l'area mineraria di Santa Barbara fanno riferimento al periodo temporale di 27 anni e 4 mesi compreso tra il 1° settembre 1992 e il 31 dicembre 2019; si tratta di valori medi giornalieri di temperatura dell'aria, di umidità relativa, di irraggiamento solare, di velocità del vento, oltre, naturalmente, alle precipitazioni cumulate nell'arco della giornata. Nella Figura 5 sono presentate le posizioni geografiche delle stazioni complessivamente utilizzate per la definizione delle serie complete dei dati meteorologici per il periodo preso in esame.

Nel caso specifico si è fatto riferimento alle stazioni Enel (la stazione di Poggio al Vento, posta non lontano dalla Centrale di Santa Barbara in una posizione abbastanza centrale rispetto all'area studiata, e la stazione ubicata presso la Centrale) e alle stazioni del sistema regionale toscano (siti Servizio Idrologico Regionale, SIR e Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricoloforestale, ARSIA confluito nel SIR) più prossime e compatibili con il sito in questione, purché in grado di fornire i dati necessari.

Di seguito sono indicate le stazioni meteorologiche utilizzate per i parametri meteorologici elencati, esclusa la precipitazione, oggetto del successivo paragrafo.

3.1 Temperatura, umidità, vento, irraggiamento

Dati di TEMPERATURA DELL'ARIA

Per il periodo 1992 - 2000 i dati di Poggio al Vento sono integrati con i dati ARSIA della stazione di LAMOLE.

Per il periodo 2001 - 2010 i dati di Poggio al Vento sono integrati con i dati SIR della stazione di PIAN DI SCO' (in modo massiccio nelle annate 2006, 2008, 2009).

Per il periodo 2011 - 2014 i dati sono quelli forniti dalla centrale misurati al suolo, integrati con quelli rilevati in quota (fino al 2013) e con quelli SIR della stazione di PIAN DI SCO' per il 2014.

Per il periodo 2015 - 2019 si è fatto riferimento alla stazione SIR di CASA ROTA.

Dati di UMIDITA' RELATIVA

Per il periodo 1992 - 2010 i dati di Poggio al Vento sono integrati con i dati ARSIA della stazione di GREVE IN CHIANTI.

Per il periodo 2011 - 2014 i dati sono quelli forniti dalla centrale misurati al suolo, integrati con quelli rilevati in quota (fino al 2013) e con i dati ARSIA per la stazione di BAGNO A RIPOLI per il 2014.

Per il periodo 2015 - 2019 si è fatto riferimento alla stazione SIR di LAMOLE, con integrazione dei dati di CASA ROTA.

Dati di VELOCITA' DEL VENTO

Per il periodo 1992 - 2010 i dati di Poggio al Vento sono integrati con i dati ARSIA per la stazione di BAGNO A RIPOLI.

Per il periodo 2011 - 2014 i dati sono quelli forniti dalla centrale misurati al suolo, integrati con quelli rilevati in quota fino al 2013 (opportunosamente ridotti al suolo) e con i dati ARSIA per la stazione di BAGNO A RIPOLI per il 2014.

Per il periodo 2015 - 2019 si è fatto riferimento alla stazione SIR di CASA ROTA.

Dati di IRRAGGIAMENTO

Per il periodo 1992 - 2010 i dati di Poggio al Vento sono integrati con i dati ARSIA per la stazione di BAGNO A RIPOLI.

Per il periodo 2011 - 2014 i dati sono quelli forniti dalla centrale misurati al suolo, integrati con i dati ARSIA per la stazione di BAGNO A RIPOLI.

Per il periodo 2015 - 2019 si è fatto riferimento alle stazioni SIR di BAGNO A RIPOLI (da 1/1/2014 a 12/1/2017), LAMOLE (da 13/1/2017 a 14/10/2017) e CASA ROTA (da 15/10/2017 a 31/12/2019).

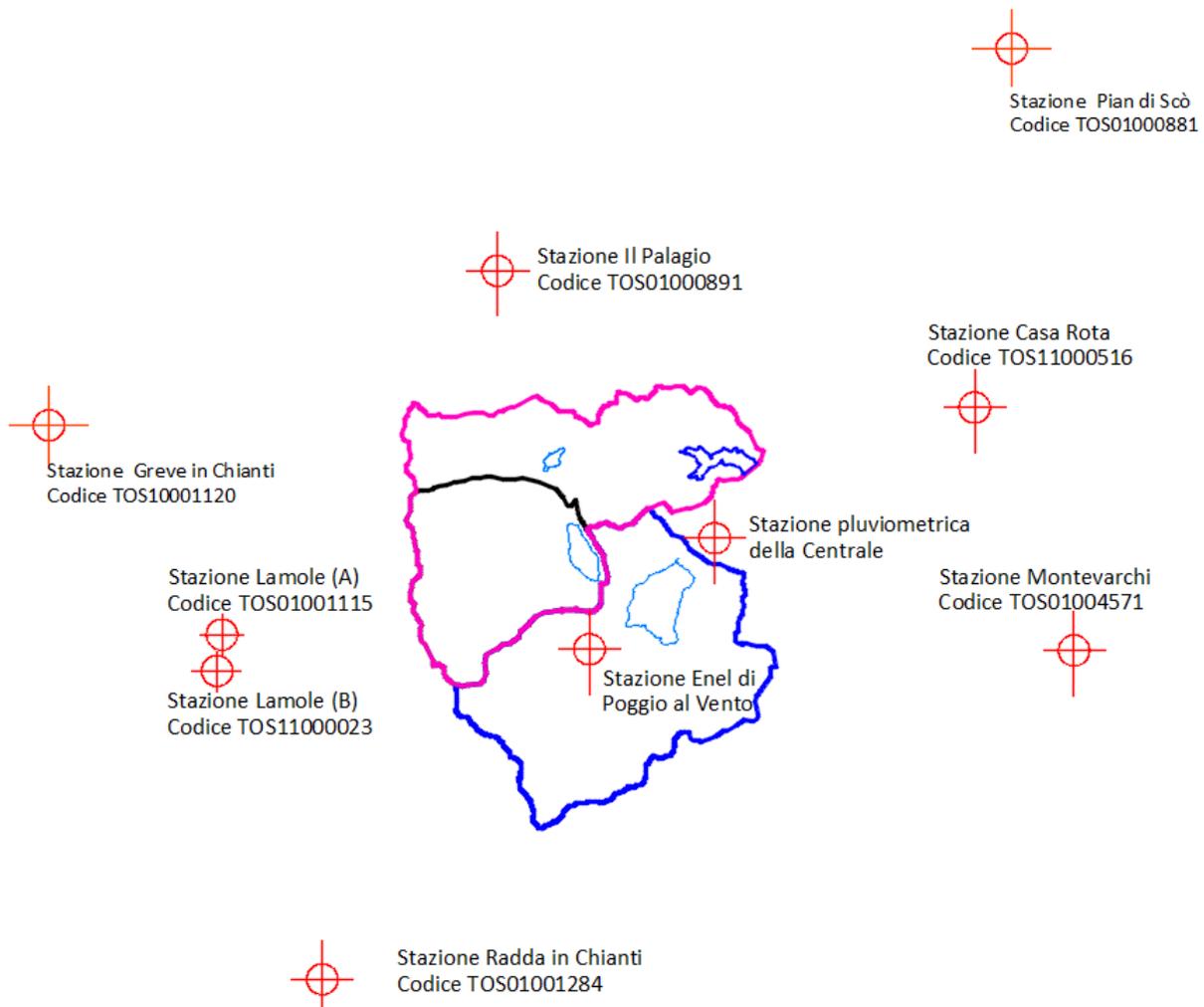


Figura 5 – Ubicazione delle stazioni (SIR e ARSIA, Regione Toscana) complessivamente utilizzate per integrare i dati meteorologici delle stazioni Enel di Poggio al Vento e di Centrale

Le serie finali dei parametri meteorologici così ricostruiti sono illustrati in grafico dalla Figura 6 alla Figura 9, mentre gli andamenti medi mensili per l'intero periodo considerato sono riassunti in TABELLA 1.

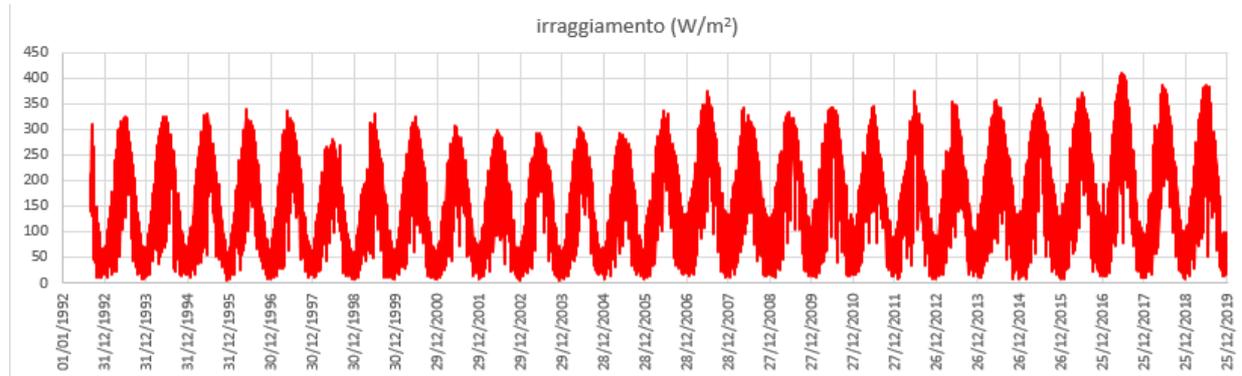


Figura 6 - Irraggiamento solare medio giornaliero.

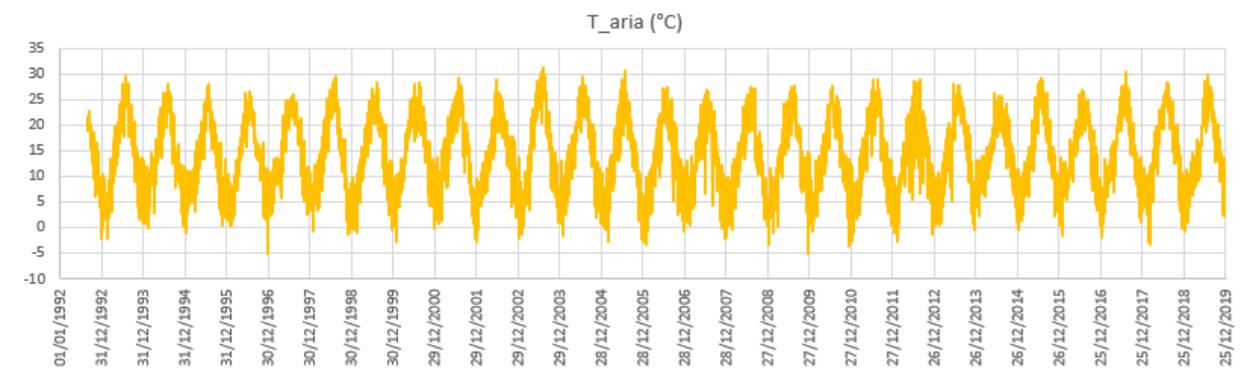


Figura 7 - Temperature dell'aria medie giornaliera.

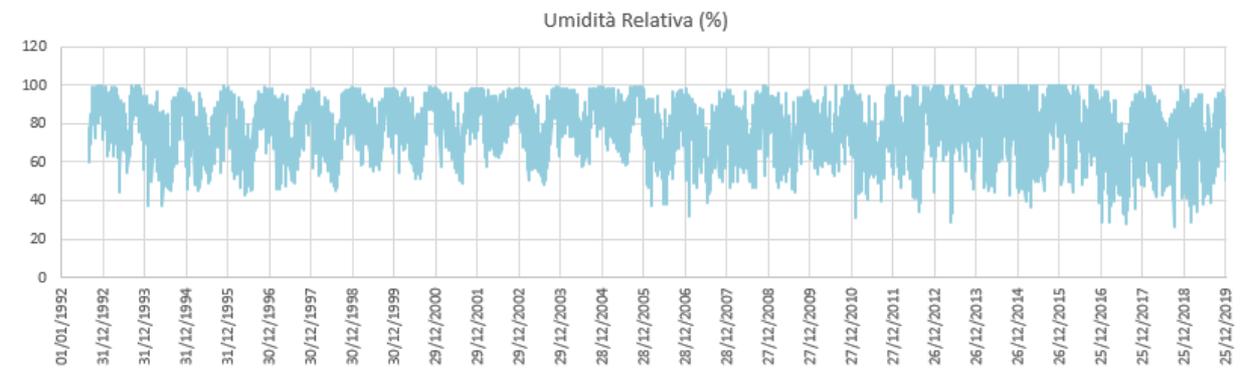


Figura 8 - Umidità relativa media giornaliera.

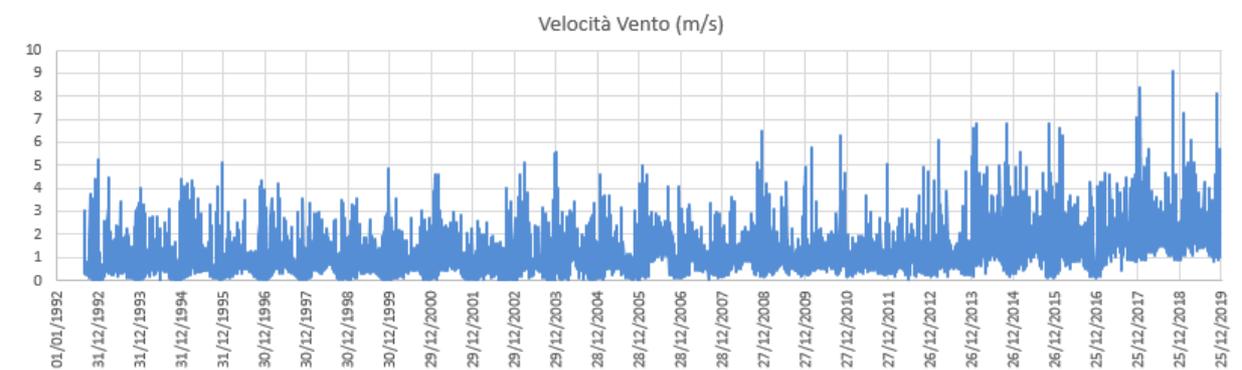


Figura 9 - Velocità del vento media giornaliera.

TABELLA 1 Valori medi mensili dei parametri meteorologici (periodo 1/9/1992 – 31/12/2020)

	VALORI MEDI MENSILI			
	irraggiamento (W/m ²)	T _{aria} (°C)	Umidità Relativa (%)	Vento (m/s)
GEN	61.1	5.1	85.9	1.0
FEB	96.1	6.1	81.1	1.2
MAR	142.8	9.5	75.4	1.4
APR	183.2	12.9	75.0	1.3
MAG	228.5	17.1	74.0	1.2
GIU	265.5	21.5	69.8	1.2
LUG	271.9	24.3	64.5	1.3
AGO	233.9	24.0	67.3	1.1
SET	175.9	19.2	76.5	1.1
OTT	112.9	14.8	84.8	0.8
NOV	67.0	9.8	88.8	1.0
DIC	53.0	5.9	86.9	1.0

3.2 Stima delle precipitazioni giornaliere

3.2.1 Premessa

Tra i dati meteorologici necessari per l'analisi idrologica di un sito, quello delle precipitazioni è di importanza fondamentale.

Tipicamente le misure delle altezze di pioggia sono disponibili in maniera puntuale all'interno o in prossimità di un bacino di interesse. Esistono diversi metodi per la stima della precipitazione media areale. Secondo quanto concordato con l'Autorità di bacino del fiume Arno per il presente studio è stato adottato il metodo di *Thiessen* o dei *topoietti*.

Si tratta di un metodo grafico per la determinazione delle piogge medie su un'area ben definita, come appunto quella di un bacino idrografico. L'area di interesse è suddivisa in *n* aree di influenza, una per ogni stazione di misura. Il metodo consiste nell'unire con segmenti tutte le stazioni tra loro contigue situate all'interno del bacino o nelle sue immediate vicinanze, così da ottenere un reticolo a maglie triangolari, e nel tracciare quindi le perpendicolari ai segmenti nel loro punto medio. Le perpendicolari così tracciate individuano dei poligoni irregolari, ciascuno contenente una stazione di misura. Una volta tracciati i *topoietti* si attribuisce ad ogni stazione come area di influenza quella compresa all'interno del poligono in cui la stazione ricade.

In ciascuna di queste aree si assume che l'altezza di pioggia sia costante e pari a quella della stazione ricadente all'interno del relativo *topoietto*. In generale l'area di interesse copre, anche solo parzialmente, l'area di influenza di più *topoietti*.

Il fatto che la rete dei poligoni risulti legata alla posizione delle stazioni può rappresentare un limite nel caso in cui una o più stazioni della rete non abbiano funzionato, il che capita frequentemente specie quando si stanno considerando, come in questo caso, intervalli piuttosto lunghi.

A seguire la descrizione della procedura utilizzata per la definizione delle serie pluviometriche per ciascuno dei bacini in esame. I grafici delle precipitazioni ricavate per ciascun bacino sono invece contenuti nel capitolo 4 insieme ai risultati del modello idrologico.

3.2.2 Il bacino del lago di Allori

Nel caso del bacino del lago di Allori è stato necessario riconfigurare i poligoni per tre distinti periodi temporali: 1992 – 2005, 2006 – 2010 e 2011 – 2019. Nel primo caso le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Poggio al Vento, Il Palagio, Montevarchi, Radda in Chianti e Lamole (A e B); la corrispondente costruzione di Thiessen, illustrata in Figura 10, evidenzia la creazione di un unico poligono afferente alla stazione di Poggio al Vento (area di 11.22 km², pari a quella totale del bacino). Nel secondo caso, per l'intervallo 2006 – 2010, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, Lamole (A e B), Radda in Chianti e Montevarchi; i poligoni risultanti, mostrati in Figura 11, sono due afferenti rispettivamente alla stazione de Il Palagio (area A1 di 5.277 km²) e di Lamole (area A2: 5.951 km²). Per il terzo intervallo, 2011 – 2019, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, la stazione di Centrale, Lamole e Radda in Chianti; i poligoni risultanti, in Figura 12, sono tre afferenti alla stazione del Palagio (area A1 di 0.875 km²), di Centrale (area A2 di 6.833 km²) e di Lamole (area A3 di 3.520 km²).

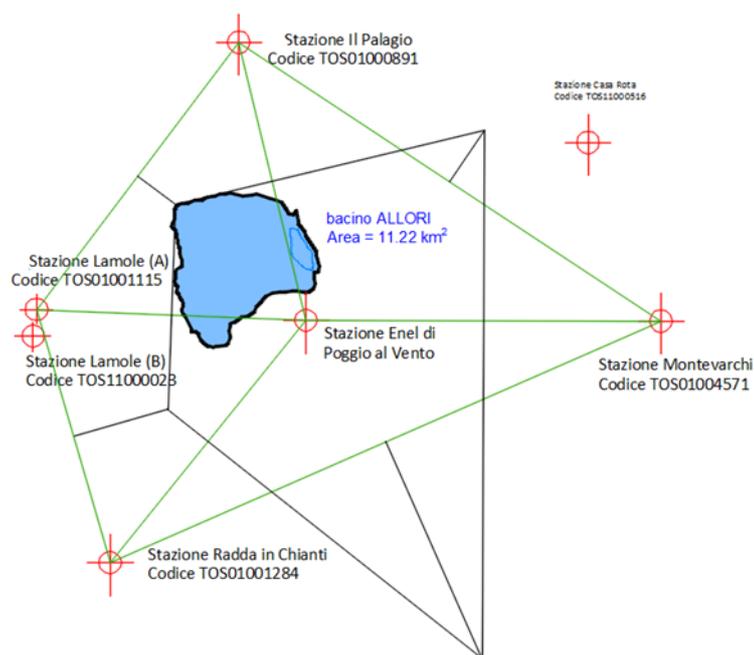


Figura 10 – Bacino del lago di Allori. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 1992 - 2005.

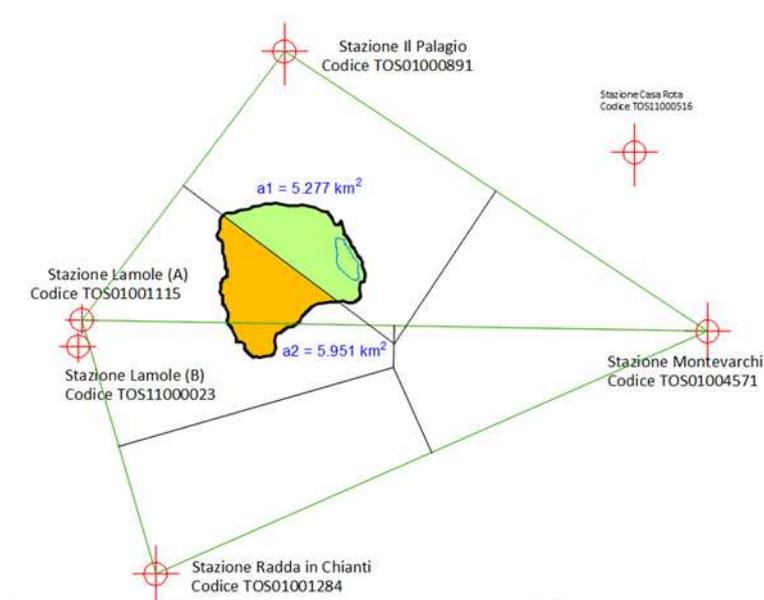


Figura 11 – Bacino del lago di Allori. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2006 - 2010.

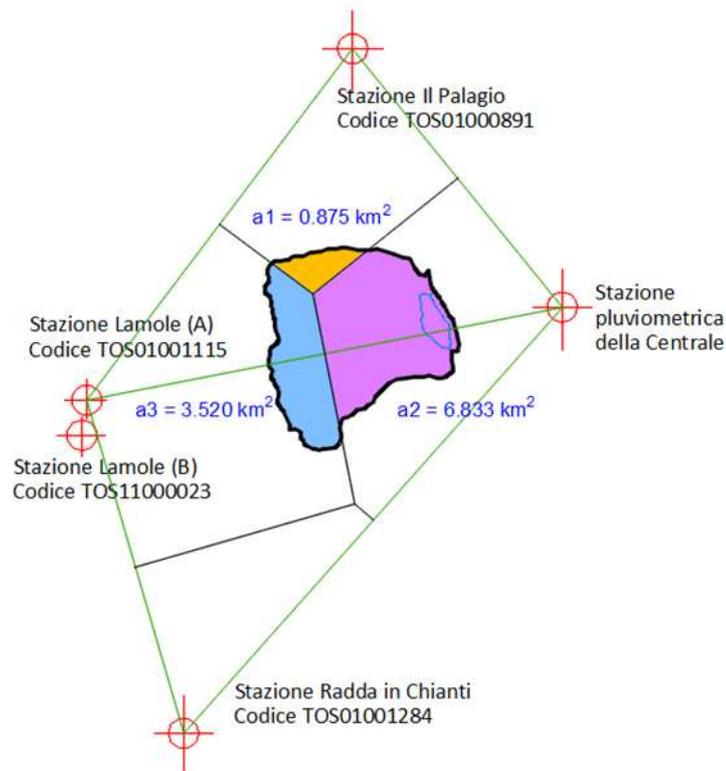


Figura 12 – Bacino del lago di Allori. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2011 - 2019.

3.2.3 Il bacino del lago di Castelnuovo

Anche per il bacino del lago di Castelnuovo è stato necessario riconfigurare i poligoni per tre distinti periodi temporali, gli stessi del bacino di Allori: 1992 – 2005, 2006 – 2010 e 2011 – 2019. Nel primo caso le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Poggio al Vento, Il Palagio, Montevarchi, Radda in Chianti e Lamole (A e B); la corrispondente costruzione di Thiessen, illustrata in Figura 13, evidenzia la creazione di un unico poligono afferente alla stazione di Poggio al Vento (area di 21.0 km², pari a quella totale del bacino). Nel secondo caso, per l'intervallo 2006 – 2010, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, Lamole (A e B), Radda in Chianti, Nusenna in Chianti e Montevarchi; i poligoni risultanti, mostrati in Figura 14, sono quattro afferenti rispettivamente alla stazione de Il Palagio (area A1 di 4.587 km²), di Montevarchi (area A2: 5.565 km²), di Radda in Chianti (area A3: 4.673 km²) e di Lamole (area A4: 6.175 km²). Per il terzo intervallo, 2011 – 2019, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, la stazione di Centrale, Montevarchi, Lamole e Radda in Chianti; i poligoni risultanti, in Figura 15, sono tre afferenti alla stazione di Centrale (area A1 di 19.769 km²), di Radda in Chianti (area A2 di 0.658 km²) e di Lamole (area A3 di 0.573 km²).

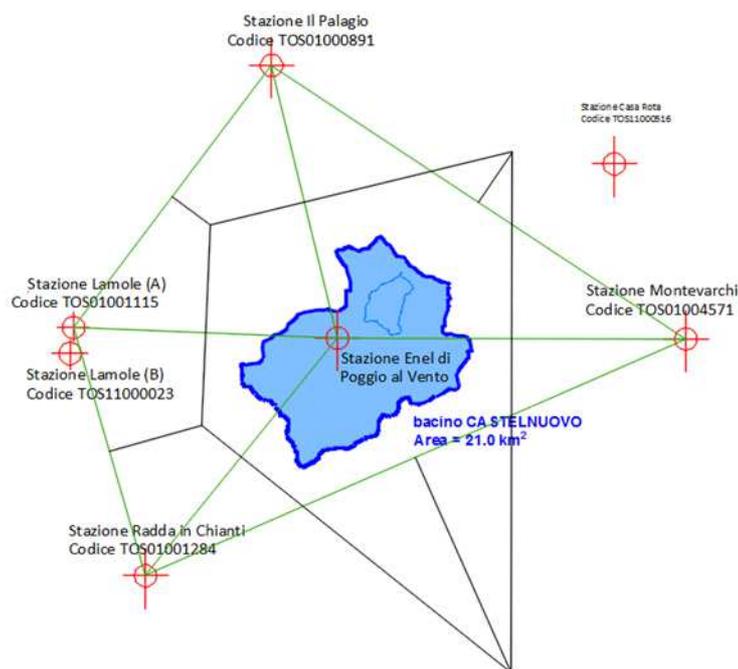


Figura 13 – Bacino del lago di Castelnuovo. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 1992 - 2005.

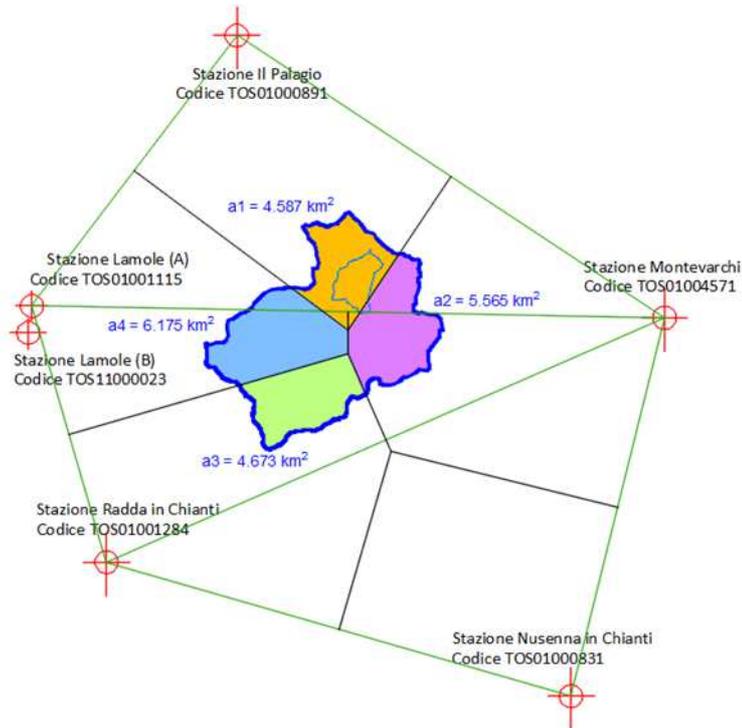


Figura 14 – Bacino del lago di Castelnuovo. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2006 - 2010.

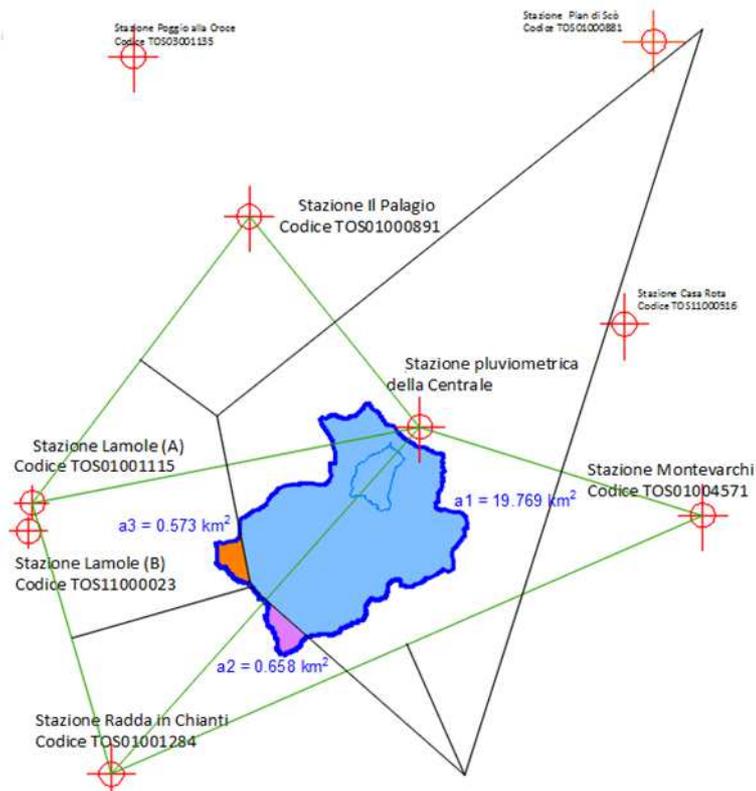


Figura 15 – Bacino del lago di Castelnuovo. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2011 - 2019.

3.2.4 Il bacino del lago di San Cipriano

Come per i due precedenti bacini, anche per quello del lago di San Cipriano è stato necessario riconfigurare i poligoni per tre distinti periodi temporali: 1992 – 2005, 2006 – 2009 e 2010 – 2019. Nel primo caso le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Poggio al Vento, Il Palagio, Montevarchi, Radda in Chianti e Lamole (A e B); la corrispondente costruzione di Thiessen, illustrata in Figura 16, evidenzia la creazione di due poligoni afferenti alla stazione de Il Palagio (area A1: 6.295 km²) e di Poggio al Vento (area A2: 17.293 km²). Nel secondo caso, per l'intervallo 2006 – 2009, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, Lamole (A e B), Radda in Chianti e Montevarchi; i poligoni risultanti, mostrati in Figura 17, sono due afferenti rispettivamente alla stazione de Il Palagio (area A1 di 17.636 km²) e di Lamole (area A2: 5.951 km²). Per il terzo intervallo, 2010 – 2019, le stazioni più vicine e con disponibilità di dati sono risultate essere Il Palagio, la stazione di Centrale, Montevarchi, Casa Rota, Lamole e Radda in Chianti; i poligoni risultanti, in Figura 18, sono tre afferenti alla stazione del Palagio (area A1 di 5.028 km²), di Centrale (area A2 di 15.054 km²) e di Lamole (area A3 di 3.518 km²).

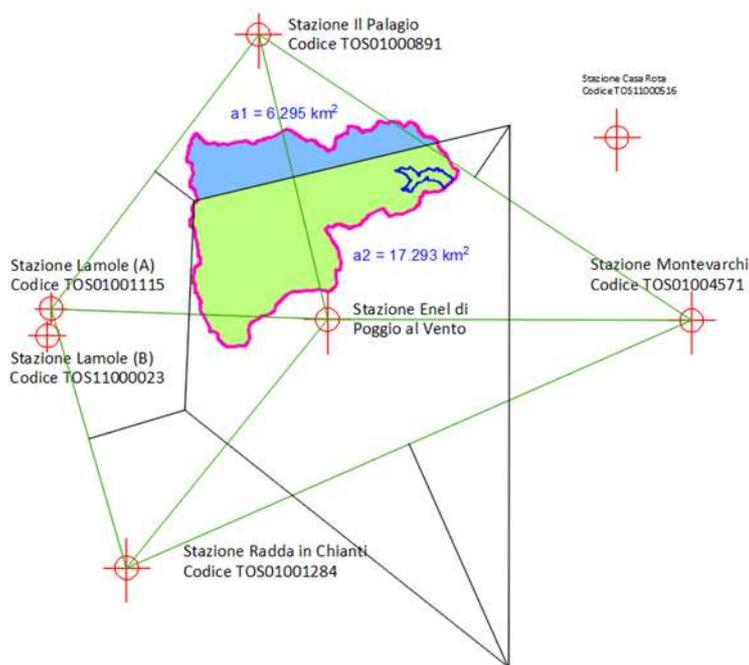


Figura 16 – Bacino del lago di San Cipriano. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 1992 - 2005.

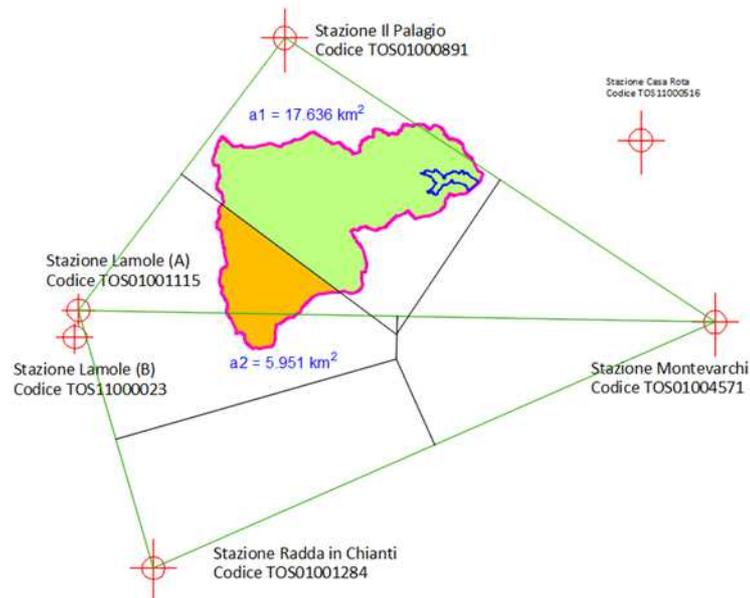


Figura 17 – Bacino del lago di San Cipriano. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2006 - 2009.

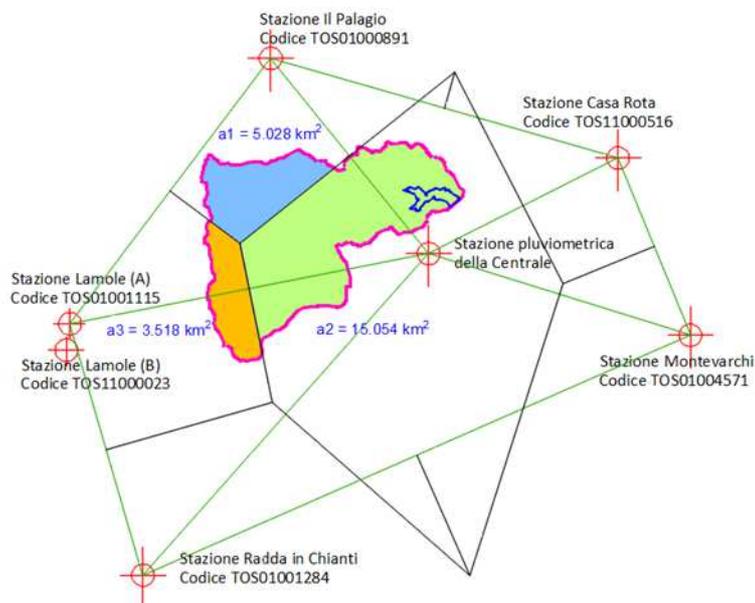


Figura 18 – Bacino del lago di San Cipriano. Costruzione dei poligoni di Thiessen per il periodo 2010 - 2019.

3.3 Omogeneità dei dati meteorologici

Sebbene le ricostruzioni temporali di medio-lungo periodo siano state effettuate a partire dalle registrazioni di stazioni differenti funzionanti per periodi alterni nell'area in esame, la preventiva analisi delle registrazioni disponibili per ciascuna delle stazioni utilizzate ha evidenziato una sostanziale omogeneità dell'informazione meteorologica da esse ricavabile.

Ciò ha consentito di escludere la possibilità d'insorgenza di differenze sistematiche tra un bacino e l'altro a causa della diversa omogeneità dell'informazione meteorologica di base.

La TABELLA 2 contiene i valori delle precipitazioni totali annue registrate alle stazioni meteorologiche utilizzate per la definizione delle piogge ragguagliate; la successiva Figura 19 mostra l'andamento delle precipitazioni medie annue ricavate dalle sei stazioni meteorologiche considerate. È evidente la maggiore dispersione della precipitazione media annua ricavata per gli ultimi anni del periodo considerato. È in questi anni che si sono registrati, tra l'altro, i valori massimi (1312 mm nel 2010) e minimi (565 mm nel 2011) assoluti dell'intero periodo esaminato, in sostanziale accordo con la "estremizzazione" degli eventi meteorologici che caratterizza le recenti tendenze del clima.

Tale circostanza si rifletterà nell'andamento dei coefficienti di deflusso annui ricavati per i tre laghi.

TABELLA 2 Precipitazione totale annua (mm) per ciascuna delle stazioni meteorologiche utilizzate (periodo 1993 –2019)

mm pioggia								
	IL PALAGIO	LAMOLE A	MONTEVARCHI	RADDA IN CHIANTI	POGGIO AL VENTO	CENTRALE	MEDIE	DEV STAN
1993	848		740		765		784	57
1994	697		658		543		633	80
1995	749		698		741		730	28
1996	952	1001	990		989		983	22
1997	931	951	920		848		912	45
1998	771	826	695		701		748	62
1999	847	952	871		800		867	64
2000 (*)	950 (*)	904 (*)	784 (*)		890		882	70
2001	789	931	738	870	778		821	78
2002	918	965	918	934	870		921	34
2003	722	679	628	760	643		686	55
2004	924	975	849	930	848		905	55
2005	1045	1188	899	1173	1006		1062	120
2006	638	788	574	691			673	90
2007	627	700	544	587			614	66
2008	966	1159	925	964			1003	105
2009	860	949	802	860			868	61
2010	1245	1458	1189	1356			1312	119
2011	397	703	516	671		537	565	124
2012	626	1061	865	987		741	856	177
2013		1258	1101	1141		860	1090	167
2014	1080		920	1015		778	948	131
2015	764		689	828			760	69
2016	1119		1040	1047		1025	1058	42
2017	704		551	706		629	647	74
2018	1028		900	1129		942	1000	101
2019	1160		1012	1185		1110	1117	76

(*) nell'anno 2000 la registrazione è incompleta per un totale di 22 gg alle stazioni Il Palagio e Montevarchi, e di 31 gg alla stazione di Lamole

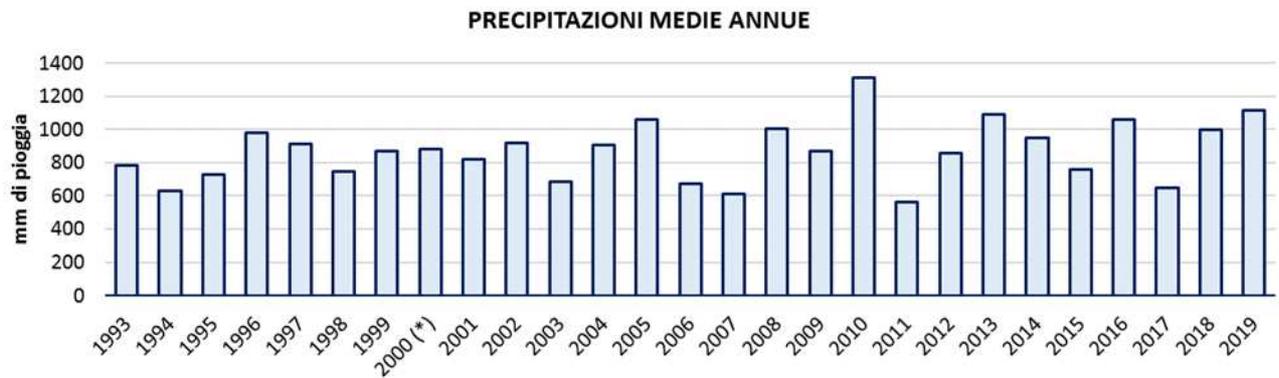


Figura 19 – Precipitazioni medie annue registrate alle stazioni meteorologiche (periodo 1993 – 2019).

4 ANALISI IDROLOGICA

La modellazione dell'idrologia dei bacini imbriferi dei laghi di San Cipriano, Allori e Castelnuovo è avvenuta attraverso l'uso del codice HEC-HMS dello *U.S. Army Corps of Engineers (HEC, Hydrologic Engineering Center – HMS, Hydrologic Modeling System)*, precedentemente calibrato e validato con riferimento al bacino imbrifero del lago di San Cipriano scelto, congiuntamente all'Autorità di Bacino del fiume Arno, grazie alla disponibilità di prolungate serie di misure giornaliere di livello, di volume dei prelievi ad uso della Centrale, di volumi pompati dal fiume Arno e di volumi scaricati attraverso le opere di alleggerimento eseguite nel corso degli ultimi 11 anni (2009 – 2019).

La fase di calibrazione e validazione dei parametri del modello idrologico è trattata nel rapporto CESI Prot. C0007404 a cui si rimanda per i necessari approfondimenti; nel seguito si illustra l'impostazione generale derivata dalla taratura del modello e adottata per ciascuno dei tre bacini oggetto della presente verifica.

4.1 Modellazione afflussi/deflussi – codice HEC-HMS

Il software *HEC HMS* consente la modellazione idrologica di un bacino, mediante la definizione degli elementi concettuali che lo rappresentano e dei processi fisici che avvengono in essi. Per la trasformazione degli afflussi pluviometrici in deflussi superficiali, il programma dispone, tra l'altro:

- di un'interfaccia di specificazione delle precipitazioni,
- di modelli di valutazione delle perdite attraverso cui stimare il volume dello scorrimento superficiale note le precipitazioni e le proprietà del bacino imbrifero,
- di modelli in continuo per tenere conto dell'umidità del suolo che possono essere utilizzati per simulare la risposta di un bacino imbrifero a variazioni meteorologiche stagionali o annuali.

L'elemento idrologico fondamentale utilizzato è denominato *Subbasin* e rappresenta il bacino idrografico; attraverso tale componente si esegue una rappresentazione fisica delle caratteristiche del bacino e si specificano i metodi di calcolo delle perdite di bacino e di trasformazione afflussi-deflussi.

Una volta fornite le precipitazioni che lo alimentano, le portate in uscita dal bacino imbrifero che alimentano il lago sono calcolate sottraendo le perdite per infiltrazione e per evaporazione, e aggiungendo il ruscellamento superficiale (*runoff*), quello ipodermico (*groundwater flow*) e il deflusso sotterraneo (*baseflow*).

Nello studio in oggetto sono stati adottati il modello di Clark (*Clark Unit Hydrograph*) per la trasformazione afflussi-deflussi (*Transform Method*) e il modello denominato *SMA, Soil Moisture Accounting* per il calcolo delle perdite (*Loss Method*).

Il *modello di trasformazione di Clark* viene schematizzato come collegamento in serie di un serbatoio e di un canale lineare con la funzione di rappresentare, rispettivamente, le dinamiche di invaso e attenuazione nel bacino imbrifero e di trasferimento delle portate liquide alla sezione di chiusura. L'applicazione dell'idrogramma unitario istantaneo di Clark richiede la conoscenza dei parametri t_c , tempo di corrvazione (*time of concentration*) e del coefficiente di stoccaggio del bacino (*storage coefficient*), un indice del deposito temporaneo dell'eccesso di precipitazioni nel bacino imbrifero durante il drenaggio verso il lago.

Il *modello SMA* per il calcolo delle perdite simula il completo ciclo idrologico dell'acqua, dalla fase iniziale di precipitazione fino all'infiltrazione nel terreno, tenendo conto dell'intercettazione di acqua da parte delle piante e dell'accumulo nelle depressioni superficiali. La Figura 20 mostra la schematizzazione a serbatoi del modello. Una volta fornita una precipitazione e una evapotraspirazione potenziale, il

modello simula il ruscellamento superficiale e quello ipodermico, le perdite dovute all'evapotraspirazione e la percolazione profonda sull'intero bacino.

Gli strati (serbatoi) che schematizzano il terreno sono:

- *Canopy (Interception Storage)*: rappresenta la precipitazione intercettata dalla vegetazione;
- *Surface (Depression Storage)*: è il volume d'acqua invaso nelle depressioni superficiali;
- *Soil (Profile Storage)*: rappresenta l'acqua immagazzinata nello strato sub-superficiale; la portata che raggiunge questo strato è costituita dall'acqua che si infiltra dalla superficie;
- *Groundwater Storage*: rappresenta i processi di portata infiltrata ed è stato schematizzato mediante due strati (GW1 e GW2); l'acqua percola dallo strato *soil* fino al primo livello di *groundwater*; le perdite derivanti da un *groundwater storage* sono costituite dalla portata ipodermica (*Groundwater Flow*) e dalla portata percolata da uno strato verso il sottostante. L'acqua che percola dal GW2 (*Deep percolation*) è considerata persa dal sistema, poiché il metodo SMA non tratta il deflusso profondo (*Baseflow*) ma quello ipodermico in aree sub-superficiali non sature.

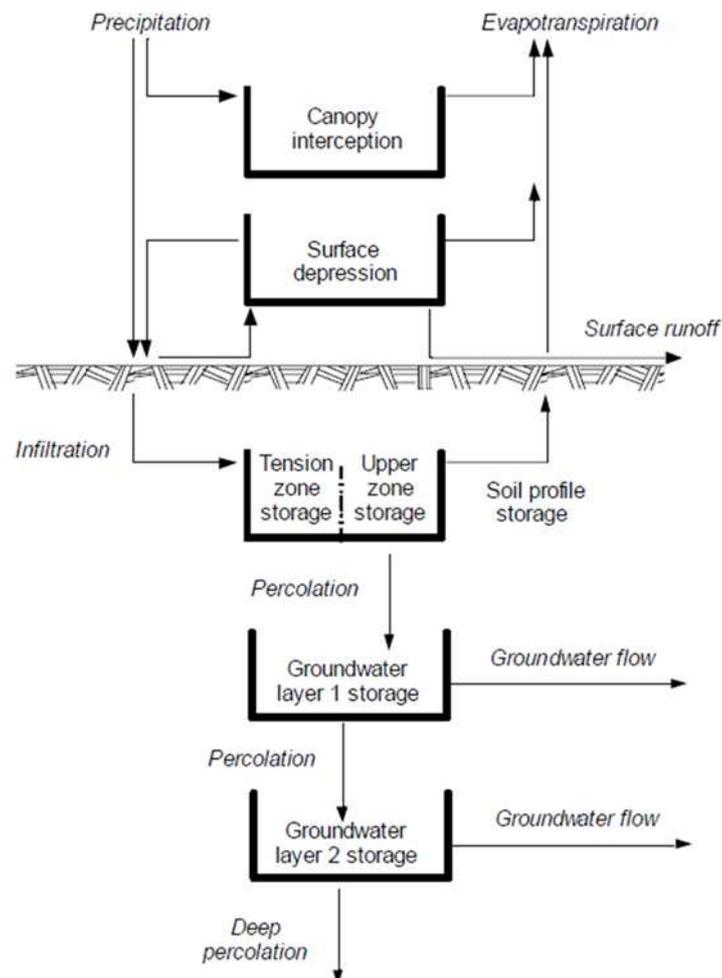


Figura 20 - Schema del modello SMA, *Soil Moisture Accounting*

Per quanto concerne il deflusso profondo (di base), il cosiddetto *Baseflow*, esso è in gran parte dovuto allo scorrimento sotterraneo e, pertanto, è solitamente caratterizzato da tempi molto lunghi: si manifesta anche mesi o anni dopo il termine delle precipitazioni che lo hanno originato, in quanto l'acqua può accumularsi nelle falde sotterranee ed in grandi quantità, muovendosi di solito lentamente. L'entità dei tempi di risposta è legata pertanto alle dimensioni degli acquiferi ed alla natura delle formazioni geologiche. Proprio in considerazione della conformazione geologica particolarmente articolata dell'area è stato assunto inizialmente un deflusso di base nullo.

Il confronto con le evidenze del Piano Stralcio del Bilancio Idrico (in particolare con il parametro chiave della portata minima annuale delle medie di 7 giorni consecutivi con 2 anni di tempo di ritorno, $Q_{7,2}$) ha successivamente suggerito l'opportunità di considerare anche il contributo degli acquiferi saturi profondi. È stato quindi inserito un apporto di *Baseflow*, scegliendo, tra i sei diversi metodi di calcolo resi disponibili da HEC-HMS, quello denominato *Linear Reservoir*. Il metodo, che conserva la massa all'interno del *Subbasin*, schematizza attraverso un serbatoio lineare il processo di esaurimento del deflusso profondo che segue l'evento intenso di precipitazione (*recession of baseflow*). Il deflusso generato dalle perdite per infiltrazione diviene afflusso al suddetto serbatoio lineare. In particolare, in connessione con la schematizzazione qui assunta per la definizione del metodo di calcolo delle perdite, *SMA*, il flusso laterale dei due serbatoi *GW1* e *GW2* diviene l'afflusso al serbatoio lineare di *Baseflow*. Tale collegamento ha dunque imposto che il serbatoio lineare del deflusso di base fosse schematizzato attraverso due strati, denominati appunto *GW1* e *GW2*.

L'esecuzione di una simulazione idrologica richiede, infine, la specificazione del modello meteorologico (*Meteorological Method*) e la compilazione delle serie temporali (*Time-Series*) delle precipitazioni.

Tramite il *Meteorological model* si definiscono le condizioni al contorno da applicare al bacino per l'esecuzione dell'analisi pluviometrica. Al suo interno si possono definire sia i dati di pioggia di riferimento che quelli relativi ad ulteriori processi come, ad esempio, l'evapotraspirazione o lo scioglimento della neve. È possibile inserire sia eventi registrati che ietogrammi sintetici, tra cui quelli definiti direttamente dall'utente o estrapolati dalle serie riferite a diversi pluviografi. Nella verifica in oggetto si è fatto riferimento alle tre serie (una per ciascun bacino) delle precipitazioni cumulate giornaliere (*Specified Hyetograph*) del periodo 1992-2019 (i dati dell'anno 1992 sono serviti alla inizializzazione del modello), ricavate come descritto al capitolo 3, e si è adottato il metodo denominato *Constant Monthly* per la definizione dei parametri dell'evapotraspirazione mensile. Quest'ultima, infatti, è necessaria per la simulazione in continuo, come nel caso in oggetto, mentre può essere trascurata nel caso di simulazione di singoli eventi (solitamente di piena e, dunque, della durata di qualche giorno).

L'*evapotraspirazione* è il processo attraverso cui l'acqua torna all'atmosfera; il codice tratta insieme i due fenomeni che contribuiscono alla sua formazione, vale a dire quello della *evaporazione* dell'acqua libera presente sulla superficie del terreno (dal suolo e dagli specchi liquidi) e su quella delle piante, e quello della *traspirazione* dalla vegetazione attraverso l'assorbimento dell'apparato radicale, prima, e il rilascio attraverso l'apparato fogliare, poi.

Sebbene siano trattate insieme, è la *traspirazione* quella che produce la perdita quantitativamente maggiore ed è anche quella più difficilmente stimabile essendo funzione della densità, della dimensione e della tipologia di copertura vegetale, oltre che della stagione e della durata delle giornate. Per tale motivo accanto alla definizione dell'evapotraspirazione costante mensile è necessario fornire anche la serie dei dodici coefficienti mensili che ne regolano il valore in base alla disponibilità di acqua al suolo, a sua volta funzione del *punto di appassimento* (*wilting point*) oltre il quale non c'è più passaggio di acqua dalle radici alle piante. La misura di questo parametro viene di solito stimata in laboratorio con l'ausilio di uno strumento chiamato *fitometro*.

Nella verifica in oggetto, l'evapotraspirazione è stata dunque definita in termini di tasso di evapotraspirazione potenziale ovvero di altezza d'acqua evapotraspirata in un mese (*Rate, mm/mese*); ciascun valore è moltiplicato per un coefficiente correttivo che sopperisce alla mancanza di stime approfondite dei valori della traspirazione. Tali coefficienti sono risultati tra i parametri di calibrazione più sensibili del modello. Il modello meteorologico calcola poi ogni giorno l'evapotraspirazione reale in funzione dell'acqua effettivamente disponibile in superficie e nel suolo.

La formula utilizzata per l'evapotraspirazione potenziale dell'area è quella di Thornthwaite (1948):

$$(ET_p)_i = 16.2 * b_i \left(\frac{10 * T_i}{I} \right)^a$$

dove:

- $(ET_p)_i$ = evapotraspirazione potenziale del mese i
- b_i : parametro che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera e dal numero di giorni nel mese i. Fissata la latitudine, per ogni mese i il valore è fornito in forma tabellare;
- $a = 0.5 + 0.016 I$, parametro che dipende dal numero medio di ore di insolazione giornaliera e dal numero di giorni nel mese i;
- T_i : temperatura media del mese i;
- I : indice termico annuale $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$

Il valore di evapotraspirazione potenziale totale annua, pari a circa 788 mm, e quelli mensili, sono risultati in linea con quelli ricavati da P. G. Megale (2008) con riferimento ad analogo procedimento, applicato alla Regione Toscana in uno studio volto alla definizione di corrette gestioni della risorsa idrica (base di dati riferita al decennio 1997-2006).

La combinazione dei parametri indicata in Figura 21, ricavata al termine delle fasi di calibrazione e di validazione del modello idrologico, è stata utilizzata anche per i tre bacini idrografici dei laghi di Allori, Castelnuovo e San Cipriano nella loro configurazione di progetto. L'esito della modellazione idrologica è illustrato nel seguito, separatamente per ciascun bacino.

	PARAMETRO DI CALIBRAZIONE	VALORE/METODO
CANOPY method: simple	STORAGE INIZ (%)	10
	MAX STORAGE (mm)	<u>4.63</u>
	CROP COEFFICIENT (-)	1
	EVAPOTRANSPIRATION	wet & dry periods
	UPTAKE METHOD	Tension Reducion
SURFACE method: simple	INITIAL STORAGE (%)	10
	MAX STORAGE (mm)	<u>19.67</u>
LOSS method: SMA	SOIL (%)	10
	GW 1 (%)	10
	GW 2 (%)	10
	MAX INFILTRATION (mm/h)	2
	IMPERVIOUS (%)	5
	SOIL STORAGE (mm)	<u>202.06</u>
	TENSION STORAGE (mm)	<u>116.68</u>
	SOIL PERCOLATION (mm/h)	0.015
	GW 1 STORAGE (mm)	<u>137.64</u>
	GW 1 PERCOLATION (mm/h)	0.015
	GW 1 COEFFICIENT (h)	<u>1.75</u>
	GW 2 STORAGE (mm)	<u>114.18</u>
	GW 2 PERCOLATION (mm/h)	0
	GW 2 COEFFICIENT (h)	<u>7.05</u>
TRANSFORM method : Clark Unit Hydrogra	TIME OF CONCENTRATION (h)	<u>1.1</u>
	STORAGE COEFFICIENT (h)	<u>2.65</u>
METEOROLOGY model:	PRECIPITATION	Specified Hyetograph
	EVAPOTRANSPIRATION	Montly Averaged
	Rate (mm/mese)	Coefficient
	gen	9.4
	feb	11.9
	mar	29.3
	apr	50.2
	mag	93.3
	giu	127.9
	lug	153.2
	ago	141.2
	set	84.3
	ott	52.4
	nov	23.9
	dic	10.9
BASEFLOW (mc/s)	LINEAR RESERVOIR	
	INITIAL TYPE	DISCHARGE (m ³ /s)
	GW1 INITIAL (m ³ /s)	0.035
	GW1 COEFFICIENT (h)	48
	GW1 RESERVOIRS (n°)	8
	GW2 INITIAL (m ³ /s)	0.035
	GW2 COEFFICIENT (h)	48
GW2 RESERVOIRS (n°)	8	

Figura 21 - Elenco dei metodi e dei parametri adottati nella modellazione idrologica del bacino di San Cipriano. I valori in **grassetto sottolineato** sono stati oggetto di ottimizzazione mediante le tecniche di *Model Optimization* di HEC-HMS. Le campiture a sfondo giallo indicano i parametri per cui è possibile procedere con tali tecniche di ottimizzazione.

4.2 Risultati del modello idrologico (HEC-HMS)

Si illustrano nel seguito i deflussi superficiali scaturiti dalla modellazione idrologica e le precipitazioni (ricavate come descritto al capitolo 3) che li hanno generati. I risultati su base mensile e annuale si riferiscono al periodo 1993-2019.

4.2.1 Il bacino del lago di Allori

La Figura 22 riporta i dati di pioggia relativi al bacino imbrifero di Allori e gli apporti naturali al lago stimati dal modello idrologico.

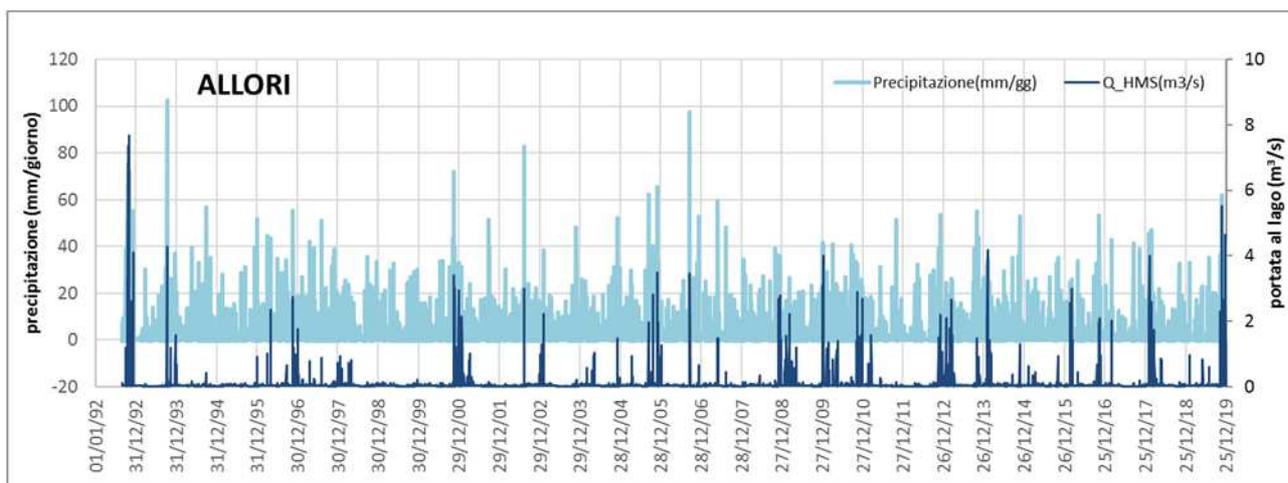


Figura 22 – Dato di pioggia e apporto naturale al lago di Allori stimato dal modello idrologico HEC-HMS.

La TABELLA 3 e il corrispondente istogramma di Figura 23 riportano le medie mensili di precipitazione e di apporto al lago; il coefficiente medio di deflusso mensile (in TABELLA 3) si conferma di poco inferiore a 0.3, come ricavato anche nella precedente fase di calibrazione del modello idrologico.

TABELLA 3 Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di Allori

	ALLORI - valori medi mensili		
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
GEN	67.13	29.41	0.44
FEB	75.15	31.93	0.42
MAR	64.66	25.29	0.39
APR	70.48	15.05	0.21
MAG	67.78	16.81	0.25
GIU	45.15	7.95	0.18
LUG	33.24	5.84	0.18
AGO	41.64	8.35	0.20
SET	75.76	10.99	0.14
OTT	94.26	11.41	0.12
NOV	135.15	34.46	0.25
DIC	88.47	32.59	0.37
media mensile	71.57	19.17	0.26
media annua	858.87	230.10	0.27

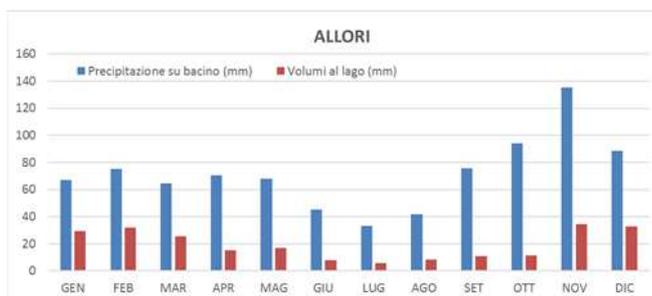


Figura 23 – Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di Allori.

La TABELLA 4 e il corrispondente istogramma di Figura 24 riportano i dati annuali di precipitazione e di apporto al lago; il coefficiente medio di deflusso annuale per il periodo in esame si mantiene di poco inferiore a 0.3 (0.27, in TABELLA 4).

TABELLA 4 Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di Allori nel periodo 1993 - 2019

anno	ALLORI		
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
1993	779.25	179.99	0.23
1994	627.35	98.11	0.16
1995	741.30	77.64	0.10
1996	989.00	279.53	0.28
1997	848.20	215.57	0.25
1998	700.75	152.03	0.22
1999	799.55	82.25	0.10
2000	890.45	260.41	0.29
2001	778.40	234.60	0.30
2002	870.00	114.02	0.13
2003	642.70	153.68	0.24
2004	849.60	154.46	0.18
2005	1006.45	350.55	0.35
2006	717.30	162.93	0.23
2007	665.57	103.40	0.16
2008	1068.00	277.62	0.26
2009	907.08	259.14	0.29
2010	1357.89	696.64	0.51
2011	578.07	123.92	0.21
2012	831.96	131.18	0.16
2013	1012.74	385.87	0.38
2014	944.92	328.63	0.35
2015	714.26	135.76	0.19
2016	1050.95	344.26	0.33
2017	674.82	90.70	0.13
2018	995.21	378.83	0.38
2019	1147.79	440.86	0.38
media	858.87	230.10	0.27

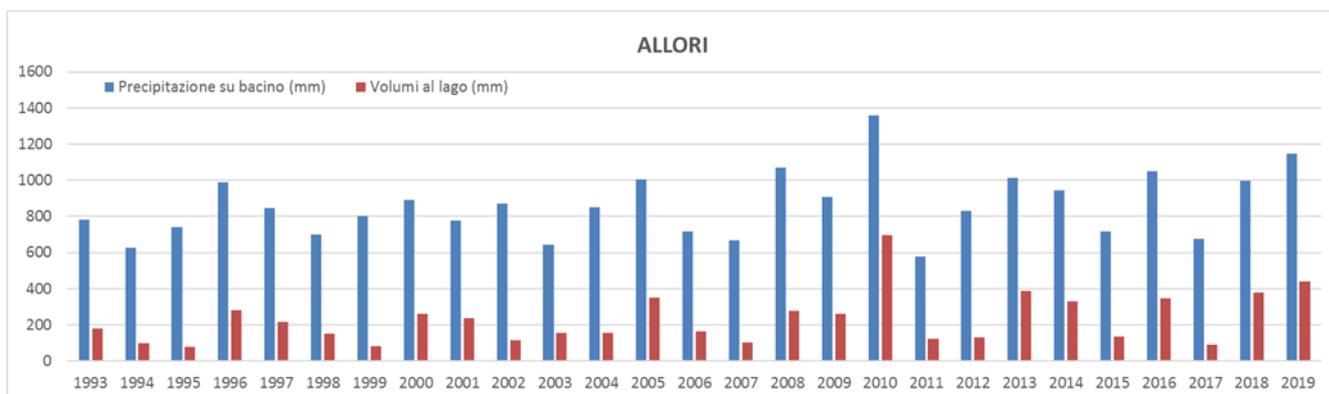


Figura 24 – Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di Allori nel periodo 1993 - 2019.

4.2.2 Il bacino del lago di Castelnuovo

La Figura 25 riporta i dati di pioggia relativi al bacino imbrifero di Castelnuovo e gli apporti naturali al lago stimati dal modello idrologico.

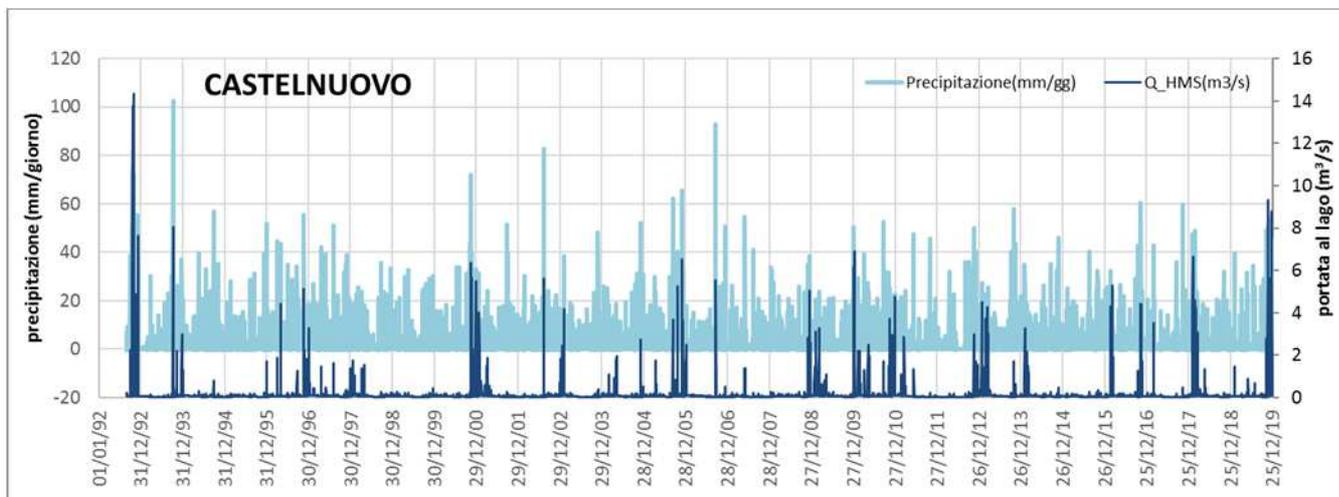


Figura 25 – Dato di pioggia e apporto naturale al lago di Castelnuovo stimato dal modello idrologico HEC-HMS.

La TABELLA 5 e il corrispondente istogramma di Figura 26 riportano le medie mensili di precipitazione e di apporto al lago; anche per il lago di Castelnuovo il coefficiente medio di deflusso mensile (in TABELLA 5) si conferma di poco inferiore a 0.3.

TABELLA 5 Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di Castelnuovo

CASTELNUOVO - valori medi mensili			
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
GEN	66.59	27.41	0.41
FEB	71.78	27.62	0.38
MAR	60.99	23.14	0.38
APR	67.38	13.69	0.20
MAG	64.60	14.89	0.23
GIU	43.26	7.28	0.17
LUG	31.52	4.97	0.16
AGO	40.50	7.57	0.19
SET	74.11	10.13	0.14
OTT	90.64	9.88	0.11
NOV	130.85	29.36	0.22
DIC	86.10	30.12	0.35
media mensile	69.03	17.17	0.25
media annua	828.31	206.06	0.25

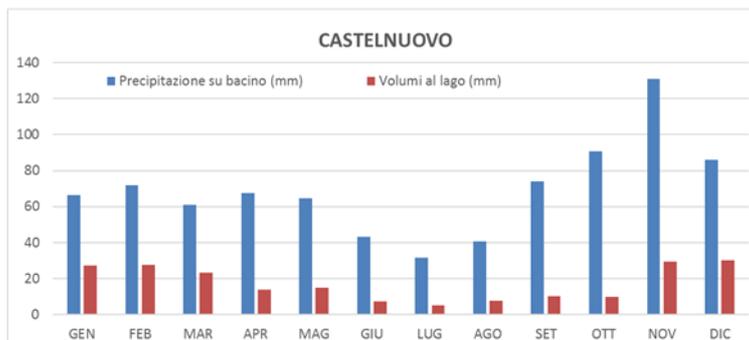


Figura 26 – Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di Castelnuovo.

La TABELLA 6 e il corrispondente istogramma di Figura 27 riportano i dati annuali di precipitazione e di apporto al lago; il coefficiente medio di deflusso annuale per il periodo in esame si mantiene inferiore a 0.3 e prossimo a quello ricavato per il lago di Allori (0.25, in TABELLA 6).

TABELLA 6 Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di Castelnuovo nel periodo 1993 - 2019

anno	CASTELNUOVO		
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
1993	779.25	179.98	0.23
1994	627.35	98.11	0.16
1995	741.30	77.64	0.10
1996	989.00	279.53	0.28
1997	848.20	215.57	0.25
1998	700.75	152.03	0.22
1999	799.55	82.25	0.10
2000	890.45	260.41	0.29
2001	778.40	234.60	0.30
2002	870.00	114.02	0.13
2003	642.70	153.68	0.24
2004	849.60	154.46	0.18
2005	1006.45	350.55	0.35
2006	676.62	139.69	0.21
2007	617.70	63.51	0.10
2008	1011.23	222.31	0.22
2009	870.81	231.70	0.27
2010	1317.60	646.67	0.49
2011	545.44	121.68	0.22
2012	756.97	86.98	0.11
2013	879.29	312.91	0.36
2014	797.72	183.56	0.23
2015	635.73	65.25	0.10
2016	1030.63	311.21	0.30
2017	634.54	85.37	0.13
2018	952.04	339.96	0.36
2019	1115.11	400.01	0.36
media annua	828.31	206.06	0.25

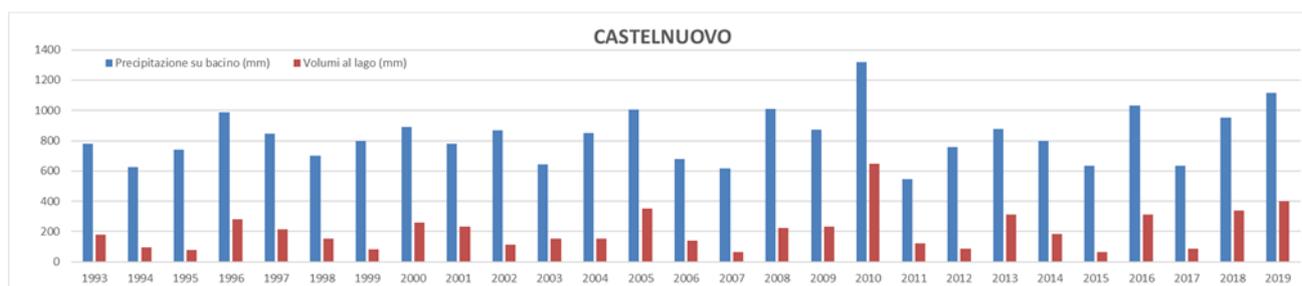


Figura 27 – Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di Castelnuovo nel periodo 1993 - 2019.

4.2.3 Il bacino del lago di San Cipriano

La Figura 28 riporta i dati di pioggia relativi al bacino imbrifero di San Cipriano e gli apporti naturali al lago stimati dal modello idrologico.

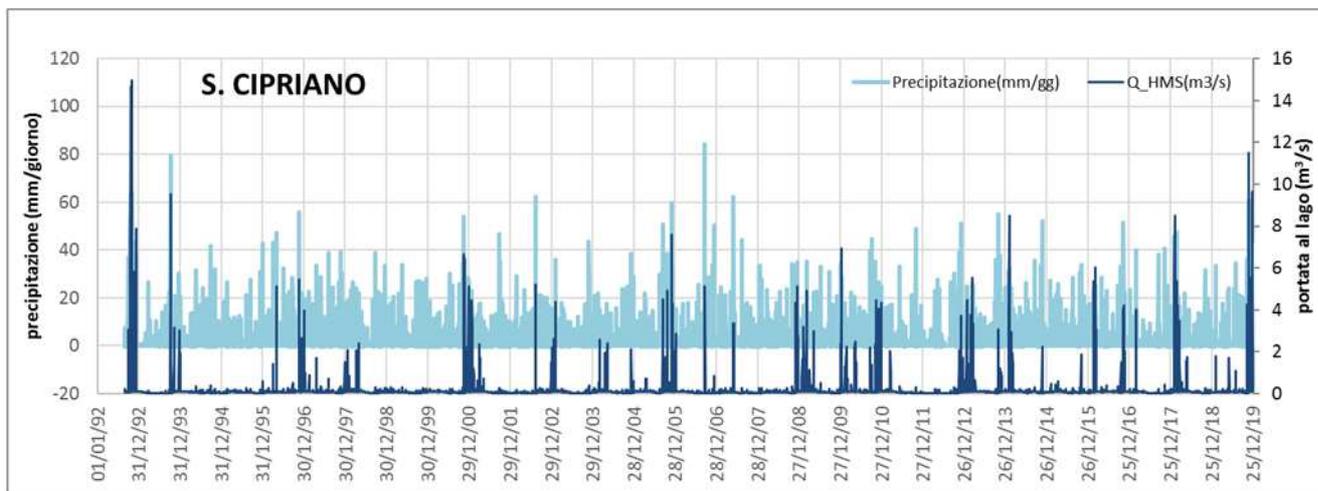


Figura 28 – Dato di pioggia e apporto naturale al lago di San Cipriano stimato dal modello idrologico HEC-HMS.

La TABELLA 7 e il corrispondente istogramma di Figura 29 riportano le medie mensili di precipitazione e di apporto al lago; il coefficiente medio di deflusso annuale per il periodo in esame si mantiene di poco inferiore a 0.3 (0.26, in TABELLA 7) come per i precedenti due laghi.

TABELLA 7 Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di San Cipriano

S. CIPRIANO - valori medi mensili			
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
GEN	66.75	28.03	0.42
FEB	73.50	30.33	0.41
MAR	63.48	24.58	0.39
APR	69.63	14.03	0.20
MAG	67.94	16.42	0.24
GIU	44.31	7.66	0.17
LUG	32.77	5.95	0.18
AGO	41.51	7.78	0.19
SET	75.45	10.23	0.14
OTT	94.94	11.91	0.13
NOV	131.10	31.93	0.24
DIC	86.42	30.93	0.36
media mensile	70.65	18.32	0.26
media annua	847.80	219.78	0.26

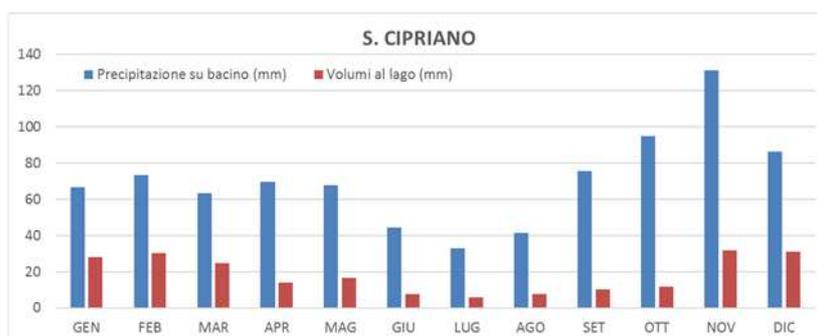


Figura 29 – Precipitazioni medie mensili e volumi in ingresso al lago di San Cipriano.

La TABELLA 8 e il corrispondente istogramma di Figura 30 riportano i dati annuali di precipitazione e di apporto al lago; il coefficiente medio di deflusso annuale per il periodo in esame si mantiene di poco inferiore a 0.3 (0.26, in TABELLA 8).

TABELLA 8 Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di San Cipriano nel periodo 1993 - 2019

S. CIPRIANO			
	Precipitazione su bacino (mm)	Volumi al lago (mm)	coeff.deflusso
1993	797.65	194.76	0.24
1994	645.83	105.57	0.16
1995	743.46	85.10	0.11
1996	979.02	261.67	0.27
1997	870.24	223.27	0.26
1998	719.60	169.78	0.24
1999	812.27	94.47	0.12
2000	910.51	265.59	0.29
2001	781.12	239.91	0.31
2002	882.91	123.86	0.14
2003	663.86	154.58	0.23
2004	869.45	176.50	0.20
2005	1016.63	361.65	0.36
2006	675.65	133.38	0.20
2007	645.46	94.09	0.15
2008	1014.35	231.33	0.23
2009	882.31	248.37	0.28
2010	1232.74	557.49	0.45
2011	531.79	93.01	0.17
2012	763.77	90.49	0.12
2013	995.91	373.77	0.38
2014	910.42	299.10	0.33
2015	708.65	123.34	0.17
2016	1053.88	346.50	0.33
2017	663.78	89.01	0.13
2018	982.53	370.00	0.38
2019	1136.77	427.53	0.38
medai annua	847.80	219.78	0.26

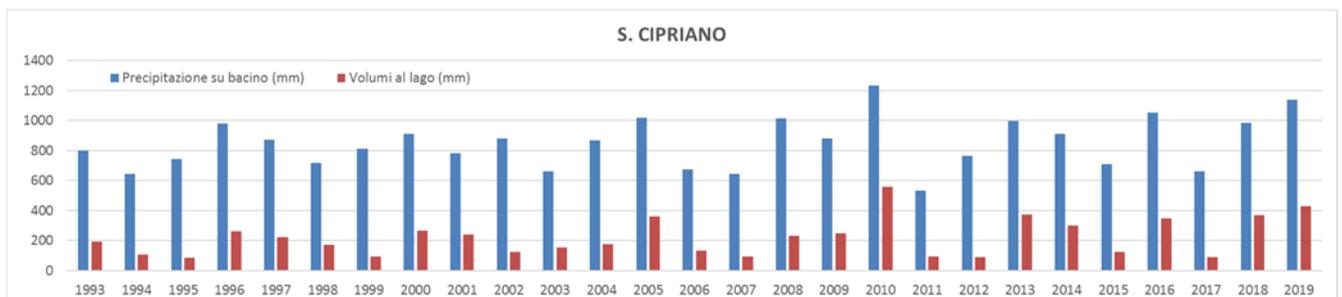


Figura 30 – Precipitazioni e volumi in ingresso al lago di San Cipriano nel periodo 1993 - 2019.

4.2.4 Considerazioni conclusive

L'andamento dei coefficienti di deflusso complessivamente ricavati per i tre laghi nel periodo esaminato è illustrato in Figura 31. Come osservato in precedenza (vedi paragrafo 3.3), l'aumento delle escursioni minimo-massimo riscontrabile nei coefficienti di deflusso degli ultimi anni del periodo esaminato riflette la corrispondente "estremizzazione" dei fenomeni meteorologici riscontrata dall'analisi delle registrazioni alle stazioni meteorologiche utilizzate.

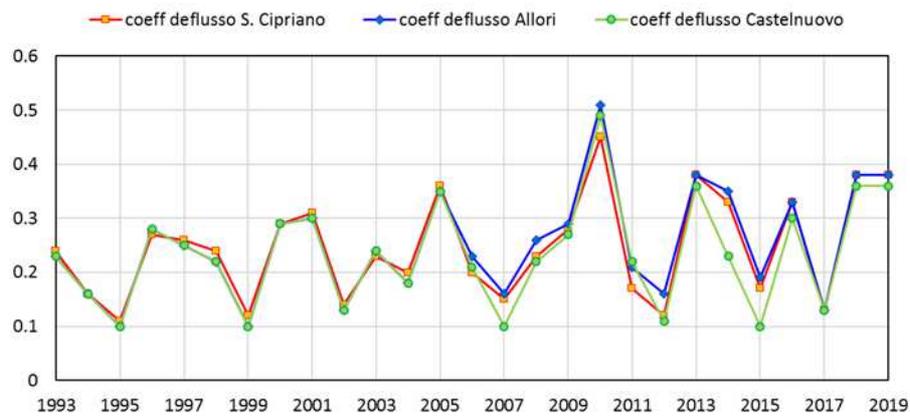


Figura 31 – Coefficienti di deflusso annuali dei tre laghi calcolati per il periodo 1993 - 2019.

4.3 Confronto con le evidenze del Piano Stralcio del Bilancio idrico della regione Toscana

4.3.1 Premessa

Il bilancio idrico dell'Arno è stato redatto dall'Autorità di Bacino ai sensi delle linee guida contenute nel DM 28/7/2004 ai fini di garantire la tutela della risorsa, la sostenibilità dell'utilizzo e consentire il raggiungimento degli obiettivi di qualità.

Uno dei temi strategici del Decreto, che ha indirizzato la realizzazione del lavoro, riguarda la *“componente fondamentale del modello qualiquantitativo di bacino destinato alla rappresentazione in continuo della dinamica idrologica e idrogeologica, degli usi delle acque e dei fenomeni di trasporto e trasformazione delle sostanze inquinanti nel suolo e nei corpi idrici”*, ove per predisposizione di un modello qualiquantitativo l'AdB ha inteso la messa a punto *“di un modello matematico quale pietra angolare indispensabile a valutare efficacemente la disponibilità della risorsa e consentire l'analisi dell'interazione con lo stato di qualità e lo sviluppo di scenari di gestione (AdB, 2008)”*.

Il Piano Stralcio Bilancio Idrico prodotto dall'Autorità di Bacino del Fiume Arno è un documento tecnico estremamente accurato che ha proficuamente accostato una profonda conoscenza del territorio ad un efficace ed avanzato approccio tecnico-scientifico.

Nel seguito, così come già fatto in fase di calibrazione (CESI, 2020), si presentano alcuni spunti di confronto tra tale strumento e lo studio in corso per l'area mineraria di Santa Barbara, secondo l'impostazione fornita da Enel (2020).

4.3.2 L'approccio tecnico-scientifico

Le elaborazioni del Piano Stralcio riguardanti l'intero bacino dell'Arno sono state eseguite con un modello *“allo stato dell'arte”*, molto avanzato tecnologicamente e appositamente sviluppato e messo a punto in sede regionale.

Da un punto di vista tecnico il modello del Piano è comparabile con la soluzione proposta da HEC-HMS di modello distribuito con il calcolo in continuo dello stato di umidità del suolo (*“Gridded Soil Moisture Accounting”*).

Nel presente studio si è però ritenuto che, vista l'esiguità territoriale dei bacini dell'area di Santa Barbara, l'approccio a parametri concentrati con cui è sviluppata la modellazione *“a serbatoi”* implementata nel metodo *“Soil Moisture Accounting”* di HEC-HMS, sia pienamente giustificabile e idoneo alla descrizione delle fenomenologie in gioco. Tale impostazione, tarata e validata in CESI (2020), è stata mantenuta anche per l'analisi idrologica di verifica della configurazione di progetto approvata per il riassetto dell'area di Santa Barbara, come descritto ai precedenti paragrafi.

4.3.3 I parametri del confronto

L'Autorità di Bacino ha chiesto un confronto tra i risultati della modellazione idrologica dell'area di Santa Barbara e le valutazioni del Piano Stralcio, con riferimento alle scale di durata delle portate. Le curve di durata delle portate prodotte dal Piano Stralcio sono però riferite all'intero interbacino Valdarno Superiore e non appare possibile un raffronto diretto all'area di Santa Barbara.

Nondimeno nel Piano Stralcio è proposta una formula di regionalizzazione finalizzata a ricostruire i dati caratteristici delle magre estive, rappresentati in particolare dalla portata $Q_{7,2}$ (portata minima di 7 giorni

consecutivi con 2 anni di tempo di ritorno assunta come portata di Deflusso Minimo Vitale⁴ su base idrologica), in tutte le sezioni del bacino idrografico dell'Arno.

Per l'applicazione di tale regionalizzazione è stato necessario ricostruire il valore dell'*Infiltrazione Efficace* sui bacini dell'area di Santa Barbara attraverso la georeferenziazione e successiva analisi delle carte prodotte dall'Autorità di Bacino.

Per mezzo dei valori dell'*Infiltrazione Efficace* è stato possibile ricostruire, per i tre bacini in esame, un valore di riferimento del coefficiente di deflusso e i valori della $Q_{7,2}$ da utilizzare per confronto con i risultati del Piano Stralcio, così come richiesto dall'Autorità di Bacino e come già fatto in fase di taratura del modello idrologico (CESI, 2020).

La procedura è descritta in dettaglio qui di seguito.

4.3.3.1 *Infiltrazione Efficace e Coefficiente di Deflusso*

Il modello di calcolo per l'infiltrazione efficace adottato nel Piano Stralcio, dipende dalle caratteristiche geologiche del substrato, di copertura e pendenza del suolo, ed è finalizzato alla determinazione di quanta parte delle acque percola verso il sottosuolo e alimenta le falde. Il Piano Stralcio produce la carta dell'*Infiltrazione Efficace* su tutto il territorio del bacino dell'Arno.

L'applicazione del metodo di calcolo all'intero territorio di Santa Barbara è stata eseguita, con una certa approssimazione, georeferenziando su *Google Earth* le carte pubblicate nello studio di Piano Stralcio. Sono state georeferenziate sia la carta dell'*Infiltrazione Efficace*, sia quella dei bacini idrografici afferenti ai laghi dell'area di Santa Barbara (Figura 32).

Sono poi state calcolate le medie areali dell'*Infiltrazione Efficace* sui bacini afferenti ai laghi; dal dettaglio in basso della Figura 32 si osserva che l'area dei bacini in esame è caratterizzata da due fasce di infiltrazione efficace, rispettivamente comprese tra 0-50 mm (colore rosso) e 50-100 mm (colore ocra). Ipotizzando che ciascuna fascia sia rappresentata dal suo valore centrale, 25 mm per la prima e 75 mm per la seconda, e calcolando le aree dei singoli bacini caratterizzate dalle due differenti fasce si ottiene una *Infiltrazione Efficace* media pari a circa 59 mm per il bacino del lago Allori, a circa 34 mm per il bacino del lago Castelnuovo e a circa 50 mm per il bacino del lago di San Cipriano.

Il valore di *Infiltrazione Efficace* medio annuo calcolato sul periodo 1993-2006 per l'interbacino della Valdarno Superiore, in cui si colloca l'area mineraria di Santa Barbara (Figura 33), è pari a 110 mm (Figura 34) dunque superiore a quelli ricavati per la stessa area, secondo la procedura appena descritta. Va però sottolineato che il valore di 110 mm medi annui è il risultato di *Infiltrazione Efficace* per un'area complessiva, quella dell'intero interbacino di Valdarno Superiore, caratterizzata anche da zone ad elevata permeabilità, mentre l'area in esame costituisce una porzione dell'interbacino sicuramente meno permeabile, come testimonia la presenza stessa dei depositi di lignite.

Considerando, infine, la simulazione del periodo 1993-2019 del modello idrologico HEC-HMS, per i valori di precipitazione totale (*Prec*) forniti in input si ricavano i valori di perdita (*Loss*), precipitazione efficace (*Excess = Prec-Loss*), deflusso diretto (*Direct Flow*), deflusso di base (*Baseflow*) e deflusso totale (*Total Flow*) indicati nella TABELLA 9.

⁴ Deflusso Minimo Vitale (DMV): portata istantanea, caratteristica di ogni tratto omogeneo del corso d'acqua, che garantisce il mantenimento delle peculiarità fisiche del corpo idrico, dei caratteri chimico-fisici delle acque, nonché la salvaguardia delle biocenosi tipiche delle condizioni naturali locali (AdB, 2008).

Nei 27 anni del periodo 1993 - 2019, secondo la ricostruzione delle piogge illustrata al paragrafo 3.2 sono caduti complessivamente 23189.6 mm di pioggia pari a 858.9 mm/anno, sul bacino del lago di Allori, 22364.4 mm di pioggia pari a 828.3 mm/anno, sul bacino del lago di Castelnuovo e 22890.6 mm di pioggia pari a 847.8 mm/anno, sul bacino del lago di San Cipriano; di questi il modello stima che circa 75 mm/anno, 70 mm/anno e 76 mm/anno sono stati trasformati in deflusso di base (*Baseflow*) rispettivamente per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano. I deflussi di base così calcolati, uniti ai deflussi diretti (circa 155, 137 e 144 mm/anno, rispettivamente per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano), hanno composto il deflusso totale verso i rispettivi laghi.

Le *Infiltrazioni Efficaci* calcolate dal modello idrologico, pari a 75 mm/anno, 70 mm/anno e 76 mm/anno rispettivamente per i bacini di Allori, Castelnuovo e di San Cipriano, si pongono dunque in posizione intermedia tra quella calcolata, con procedura semplificata, utilizzando le carte di infiltrazione del Piano Stralcio stesso (59, 34 e 50 mm/anno, per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano) e quella calcolata nell'ambito del Piano Stralcio stesso con riferimento all'intera area dell'Interbacino della Valdarno Superiore (110 mm/anno).

Il rapporto tra i deflussi totali ai laghi e la precipitazione totale caduta sui bacini consente, infine, di ricavare i coefficienti di deflusso per i tre bacini, rispettivamente pari a 0.27, 0.25 e 0.26 per Allori, Castelnuovo e San Cipriano. Il modello idrologico HEC-HMS, secondo cui le uniche perdite sono riconducibili all'evapotraspirazione, fornisce dunque un valore medio del coefficiente di deflusso per i tre bacini pari a 0.26.

TABELLA 9 Esito del modello idrologico HEC-HMS per i tre bacini

	Precip	Loss (ET)	Excess (WS)		Direct Flow	Base Flow	Total Flow
ALLORI							
tot 27 anni (1993-2019)	mm: 23189.6	19012.3	4177.2	m ³ /s:	542.9	264.5	807.3
	mm / anno: 858.9	704.2	154.7	mm / anno (*):	154.8	75.4	230.3
(*) Superficie del bacino di Allori = 11.22 km ²							
CASTELNUOVO							
tot 27 anni (1993-2019)	mm: 22364.4	18675.9	3688.5	m ³ /s:	896.5	455.8	1352.3
	mm / anno: 828.3	691.7	136.6	mm / anno (*):	136.6	69.5	206.1
(*) Superficie del bacino di Castelnuovo = 21.0 km ²							
SAN CIPRIANO							
tot 27 anni (1993-2019)	mm: 22890.6	19001.1	3889.5	m ³ /s:	1062.4	558.5	1620.9
	mm / anno: 847.8	703.7	144.1	mm / anno (*):	144.1	75.7	219.8
(*) Superficie del bacino di San Cipriano = 23.6 km ²							

La definizione dell'*Infiltrazione Efficace* nel Piano Stralcio è propedeutica al calcolo del *Coefficiente di Deflusso*, così come quella della *precipitazione efficace* differenza tra la *precipitazione lorda* e l'*evapotraspirazione totale*.

L'*evapotraspirazione* reale (E, in mm) è la quantità di acqua evaporata dal suolo e dalle piante quando il suolo si trova al suo tasso di umidità naturale. Il Piano Stralcio utilizza un metodo indiretto per la stima di E; si tratta della formula di Turc (1948) particolarmente semplice poiché considera solo l'altezza totale di precipitazione media annua (P in mm) e la temperatura media dell'aria (T in °C):

$$E = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

in cui L *potere evaporante dell'atmosfera* è ricavata da

$$L^5 = 300 + 15 T + 0.05 T^3$$

Per stimare il *coefficiente di deflusso* si sottrae dalla *precipitazione efficace*, anche detta *water surplus*, WS (in mm) pari a ciò che resta della precipitazione totale dopo le perdite dovute all'evapotraspirazione ($WS = P - E$), anche la quota dell'*infiltrazione efficace*, IE (in mm) che si considera perduta rispetto al ciclo dell'acqua superficiale che alimenta i laghi, ovvero la quantità di acqua che effettivamente si rende disponibile per il ravvenamento delle falde acquifere.

In tal modo si definiscono due coefficienti di deflusso: il coefficiente di deflusso *primario*, pari a WS/P , e quello *secondario*, uguale a R/P , dove R (in mm) è il contributo al ruscellamento superficiale, ricavato sottraendo l'infiltrazione efficace, IE alla precipitazione efficace, WS .

La TABELLA 10 riassume la procedura per il calcolo dei coefficienti di deflusso secondo le ipotesi e la metodologia adottate nella stesura del Piano Stralcio. La temperatura media dell'aria di 14.2 °C è stata ricavata dalla serie delle temperature adottate per la simulazione del periodo 1992-2109 con il modello idrologico (paragrafo 3.1). I coefficienti di deflusso secondario così calcolati (0.23, 0.25 e 0.24, rispettivamente per i bacini di Allori, Castelnuovo e San Cipriano) risultando molto prossimi ai valori dei coefficienti di deflusso ottenuti dalle simulazioni mediante il modello idrologico HEC-HMS (0.27, 0.25 e 0.26), oltre ad assumere un valore medio identico a quello ottenuto dal modello idraulico di bilancio (0.24) basato sulle misure eseguite sul bacino di San Cipriano nel periodo 2009-2019 (CESI, 2020).

TABELLA 10 Calcolo del coefficiente di deflusso secondo la metodologia adottata nel Piano Stralcio

		ALLORI	CASTELNUOVO	SAN CIPRIANO
T, temperatura media annua	°C	14.2	14.2	14.2
L, potere evaporante dell'atmosfera		798.2	798.2	798.2
P, precipitazione media annua	mm	858.9	828.3	847.8
ET, evapotraspirazione	mm	598.7	589.1	595.3
WS = P-ET, water surplus (pr. eff.)	mm	260.2	239.2	252.5
C' = WS/P, coeff di deflusso primario		0.30	0.29	0.30
IE, infiltrazione efficace	mm	59.0	33.9	50.3
R = WS-IE (contributo ruscell superf)	mm	201.2	205.3	202.2
C'' = coeff di deflusso secondario		0.23	0.25	0.24

⁵ Il potere evaporante dell'atmosfera può essere calcolato anche secondo la versione modificata da Santoro (1970) ricavata per l'ambiente siciliano da un'analisi di 192 bacini in Sicilia:

$L = 586 - 10T + 0.05T^3$ con validità per $10\text{ °C} < T < 18\text{ °C}$

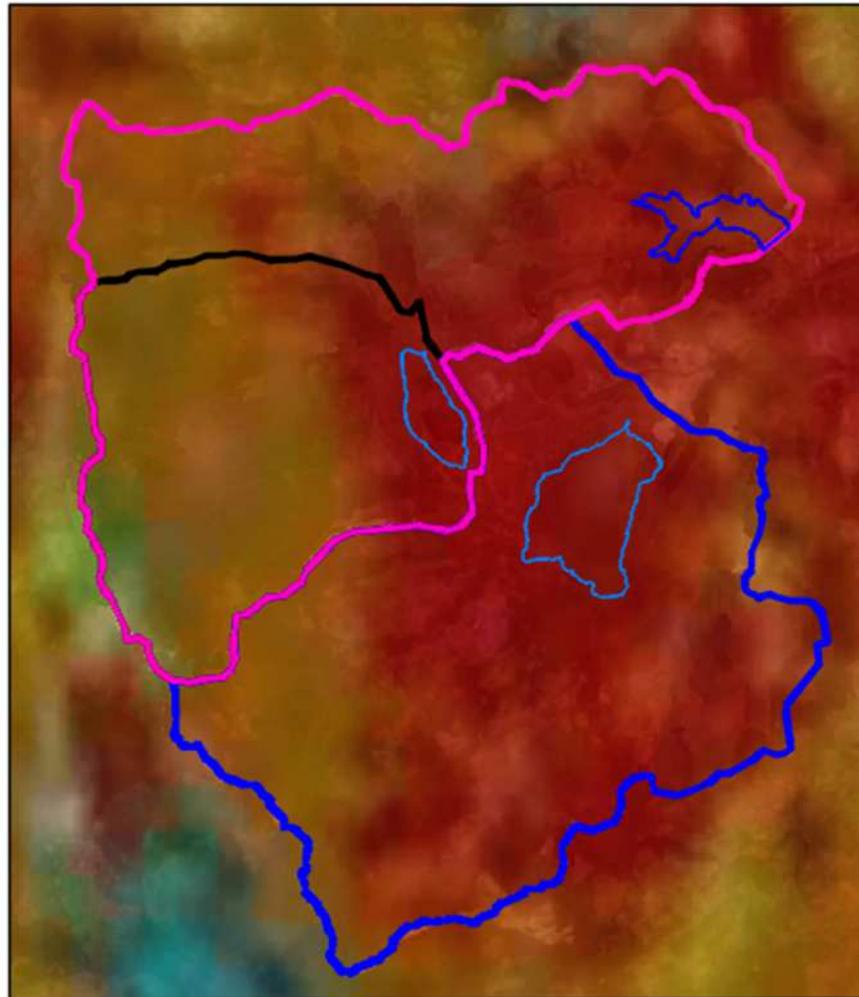


Figura 32 Georeferenziazione della carta dell'*Infiltrazione Efficace* tratta dal Piano Stralcio (AdB, 2008) e dei bacini idrografici dell'area di Santa Barbara (in alto: generale; in basso: dettaglio).



Figura 33 Il bacino dell'Arno (AdB, 2008) con indicazione dell'area mineraria di Santa Barbara

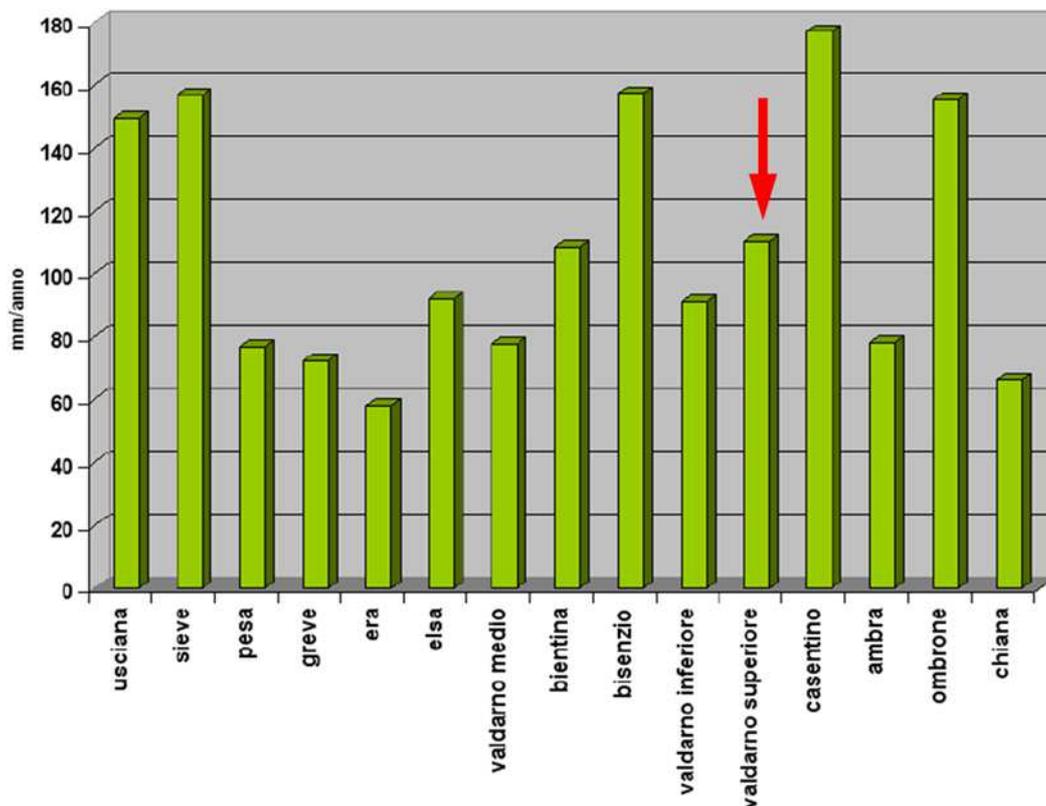


Figura 34 Infiltrazione efficace media annua sui sottobacini dell'Arno (Brugioni et al., 2008)

4.3.3.2 Il Deflusso Minimo Vitale

Una volta terminati il *ruscellamento pluviale* (superficiale) e il *deflusso ipodermico* (sub-superficiale) negli strati superiori del suolo, che sono immediatamente conseguenti alle precipitazioni, le portate di tempo asciutto sono fornite soltanto dagli apporti sotterranei. L'entità di tali contributi dipende dalle caratteristiche idrogeologiche del bacino che condizionano in modo determinante le portate di tempo asciutto dei corsi d'acqua.

Una prima valutazione globale dell'importanza del deflusso di base rispetto al suo deflusso totale è fornita dall'*indice di deflusso di base*, indicato, con notazione anglosassone, BFI (*Base Flow Index*). Il BFI viene definito in modo da assumere valori elevati nei bacini in cui i deflussi si mantengono consistenti anche nei periodi non piovosi e valori bassi nei bacini con caratteristiche opposte, in cui i contributi profondi sono scarsi e le portate di tempo asciutto modeste.

Il metodo per il calcolo del BFI adottato nel Piano Stralcio è quello di Lovovitch (1972) che utilizza il diagramma annuo delle portate medie giornaliere di un corso d'acqua per determinare le minime medie mobili su 5 giorni. Nell'applicazione del Piano Stralcio è stato utilizzato nel processo di calcolo e regionalizzazione del BFI modificando da 5 a 7 la dimensione dei gruppi contigui di suddivisione delle portate, probabilmente in considerazione dell'aumento del 100% riscontrato negli ultimi 20 anni della frequenza dei giorni consecutivi di magra come riscontrabile dalla Figura 35.

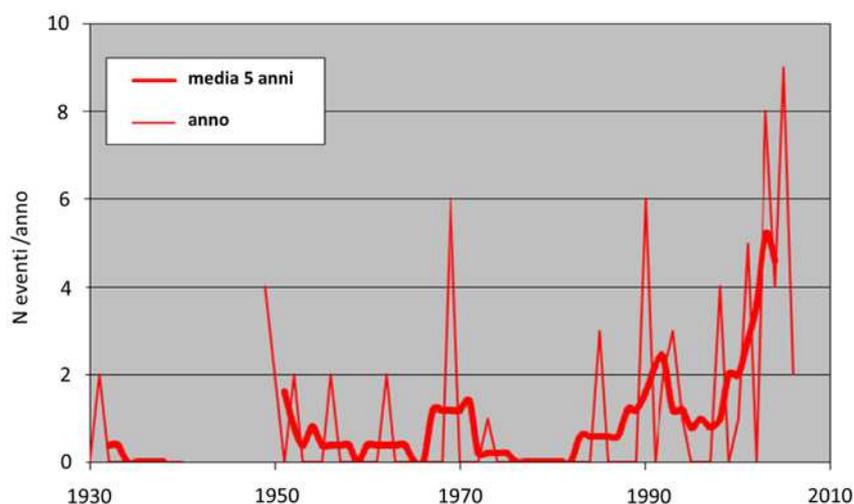


Figura 35 Frequenza dei giorni consecutivi di magra (Menduni, 2008)

Le curve di durata delle portate permettono di utilizzare una procedura di regionalizzazione basata sulla sola conoscenza di due parametri: l'*indice del deflusso di base*, BFI e la superficie drenata entrambi nel complesso di facile valutazione (il primo attraverso corrispondenze numeriche con le caratteristiche idrogeologiche di bacino e la seconda attraverso misure planimetriche).

A seguito delle opportune analisi critiche sui regimi annui nel loro complesso, è stato assunto quale indicatore sintetico di riferimento la $Q_{7,2}$, vale a dire la portata minima di 7 giorni consecutivi con 2 anni di tempo di ritorno. Il Piano Stralcio assume dunque che il Deflusso Minimo Vitale su base idrologica sia la portata $Q_{7,2}$ privilegiando l'aspetto naturalistico relativo alla conservazione della biocenosi acquatica.

La scelta appare in accordo con la letteratura e la prassi tecnica, per cui è possibile (e sensato) associare la condizione di stress al non superamento di una soglia predefinita di portata per un numero assegnato di giorni consecutivi. Attraverso la ricostruzione di un numero significativo di anni, è altrettanto possibile

individuare la frequenza di successioni di minimi annuali e associare a tali sequenze una adeguata distribuzione di probabilità. Individuata dunque una soglia di riferimento, ad esempio in termini di tempo di ritorno, si può ottenere un indicatore ragionevolmente efficiente. Il tempo di ritorno considerato, due anni, si riferisce ad eventi tutt'altro che estremi a garanzia di forte cautela nei confronti delle biocenosi.

Per la determinazione del Deflusso Minimo Vitale, DMV sono proposte delle formule di regionalizzazione cui si accede con il valore dell'indice BFI, a sua volta funzione del *coefficiente di infiltrazione potenziale*, CIP che dipende dal rapporto tra l'*Infiltrazione Efficace*, IE e il *water surplus*, WS precedentemente descritti e calcolati per i bacini dei tre laghi considerati.

In particolare, è stato prima eseguito il processo di regionalizzazione della portata minima di 7 giorni con tempo di ritorno 10 anni che ha condotto alla definizione di una relazione polinomiale generale i cui coefficienti si assumono costanti per la gran parte delle sezioni di chiusura dell'Arno e degli affluenti. La relazione polinomiale generale è del tipo illustrato in Figura 36.

$$\frac{Q_{7,10_{\text{Area}}}}{\text{Area}} = a_1 \cdot \text{BFI}^2 + a_2 \cdot \text{BFI} + a_3$$

per la quale si hanno i seguenti coefficienti:

$$a_1 = 4.62214 \text{ E-07}$$

$$a_2 = -6.67244 \text{ E-06}$$

$$a_3 = 2.35804 \text{ E-05}$$

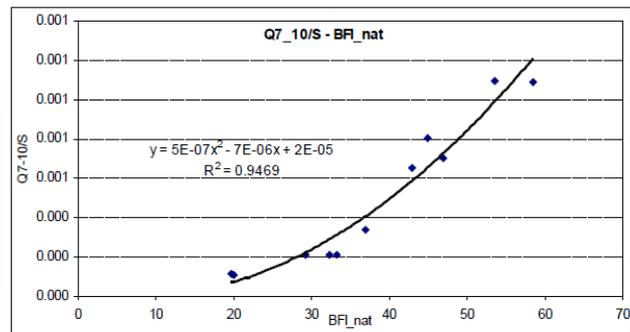


Figura 118 - Curva interpolare $Q_{7,10}/\text{Area} - \text{BFI}_{\text{nat}}$

Figura 36 Formula di regionalizzazione delle $Q_{7,10}$ (AdB, 2008)

In analogia alla metodologia utilizzata per la regionalizzazione della $Q_{7,10}$ si è valutato l'indice idrologico per 2 anni di tempo di ritorno, $Q_{7,2}$. L'analisi di correlazione tra i dati di $Q_{7,10}$ e $Q_{7,2}$ per diverse sezioni dell'intero bacino dell'Arno evidenziano un legame pressoché lineare tra i due indici. Considerando la $Q_{7,10}$ quale variabile indipendente il rapporto lineare è caratterizzato da un coefficiente di correlazione pari a 1.5833. Per cui risulta:

$$Q_{7,2} = 1.5833 * Q_{7,10}$$

La TABELLA 11, che contiene la precedente TABELLA 10 di cui utilizza alcuni parametri, illustra il calcolo del DMV per i tre bacini in esame che, secondo le procedure adottate nel Piano Stralcio risulterebbe pari a circa 5.1, 5.3 e 9.0 l/s per, nell'ordine, i laghi di Allori, Castelnuovo e San Cipriano.

Si osserva che i DMV così ricavati risultano tutti inferiori a quelli simulati nella presente verifica del progetto di riassetto dell'area che assume come deflussi minimi 10 l/s per i laghi di Allori e San Cipriano, e 12 l/s per il lago di Castelnuovo come richiesto dalla prescrizione A1.3 del MATTM (Commissione Tecnica per le Verifiche dell'Impatto Ambientale VIA-VAS - parere n. 224 del 19.12.2008) emessa prima della redazione definitiva del Piano Stralcio del Bilancio Idrico, e perciò quando non erano ancora disponibili i metodi di calcolo che sono stati applicati per la valutazione del DMV.

TABELLA 11 Calcolo del Deflusso Minimo Vitale ($Q_{7,2}$) secondo la metodologia adottata nel Piano Stralcio

		ALLORI	CASTELNUOVO	SAN CIPRIANO
T, temperatura media annua	°C	14.2	14.2	14.2
L, potere evaporante dell'atmosfera		798.2	798.2	798.2
P, precipitazione media annua	mm	858.9	828.3	847.8
ET, evapotraspirazione	mm	598.7	589.1	595.3
WS = P-ET, water surplus (pr. eff.)	mm	260.2	239.2	252.5
C' = WS/P, coeff di deflusso primario		0.30	0.29	0.30
IE, infiltrazione efficace	mm	59.0	33.9	50.3
R = WS-IE (contributo ruscell superf)	mm	201.2	205.3	202.2
C'' = coeff di deflusso secondario		0.23	0.25	0.24
CIP = (IE/WS)*100, coeff. infiltr. potenz.				
		22.7	14.2	19.9
BFI = 15.455 + CIP/1.3636, coeff. defl. di base				
		32.1	25.9	30.1
S, sup. bacino	km ²	11.22	21	23.6
a1		4.62214E-07	4.62214E-07	4.62214E-07
a2		-6.67244E-06	-6.67244E-06	-6.67244E-06
a3		2.35804E-05	2.35804E-05	2.35804E-05
Q_{7,10nat} = S * (a1 BFI² + a2 BFI + a3) (*)	l/s	3.20	3.36	5.68
Q_{7,2nat} = 1.5833 * Q_{7,10nat}	l/s	5.07	5.32	9.00

(*) da regionalizzazione

Il DMV calcolato secondo la procedura adottata dal Piano Stralcio è stato quindi confrontato con quello risultante dall'analisi della serie dei deflussi giornalieri totali calcolati dal modello idrologico calibrato e validato in HEC-HMS, come descritto in CESI, 2020.

Il campione dei valori minimi ricavati per ciascuno dei 28 anni del periodo 1992-2019 dai deflussi giornalieri totali medi di 7 giorni consecutivi è illustrato in TABELLA 12 per ognuno dei bacini considerati.

La distribuzione di probabilità adottata per rappresentarne le frequenze di accadimento è quella di Gumbel, tipicamente usata per i valori estremi siano essi massimi o, come in questo caso, minimi. La funzione densità di probabilità $f(x)$ ed il suo integrale $F(x)$ secondo tale distribuzione sono

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$$

in cui:

$$w = \frac{x-u}{\alpha}$$

è la variabile ridotta definita attraverso i parametri u e α della distribuzione a loro volta funzione della media, m e dello scarto, s del campione (TABELLA 12) attraverso le seguenti formulazioni:

$$\alpha = \frac{s * \sqrt{6}}{\pi}$$

$$u = m - 0.5772 * \alpha$$

TABELLA 12 Campione delle Q_7 minime calcolate dalle serie annuali dei deflussi ricavati con il modello idrologico HEC-HMS.

anno	min Q_7 (l/s)		
	Allori	Castelnuovo	San Cipriano
1992	0	0	0
1993	0	0	0
1994	0.3571	0.6714	6.4571
1995	0	0	0
1996	10.4000	19.4571	23.4000
1997	0	0	0
1998	0	0	0
1999	0	0	0.0428
2000	0	0	0
2001	1.4571	2.7142	8.1142
2002	0	0	0
2003	0	0	0
2004	0	0	0
2005	0.3714	0.6857	0.7714
2006	0	0	0
2007	0	0	0
2008	0.6714	1.0571	1.1714
2009	0	0	0.3714
2010	35.1571	62.5571	72.5571
2011	0	0	0
2012	0	0	0
2013	8.8285	0.7000	6.8285
2014	1.1142	0.0571	0.6714
2015	2.0428	0	4.7285
2016	19.6285	23.6142	42.2428
2017	0	0	0
2018	0.0285	0	0.0285
2019	13.2142	0.2571	11.7714
media, m	3.3311	3.9918	6.3984
scarto, s	7.8871	12.7851	15.8323

La verifica di adattabilità dei campioni alla distribuzione prescelta è stata eseguita attraverso il test di Kolmogorov-Smirnov ed ha avuto esito positivo per i campioni riferiti ai laghi di Allori e San Cipriano. La massima differenza tra il valore di probabilità osservato nel campione (OBS CFD) e quello teorico della distribuzione di Gumbel ($F(x)$) è risultata infatti pari a 0.29 e 0.26, rispettivamente per il lago di Allori e di San Cipriano, e dunque inferiore al valore critico di 0.31 (livello di significatività pari a 1%).

Il DMV ricavato dai risultati del modello idrologico per questi due laghi, cioè la minima Q_7 ricavata in corrispondenza di un tempo di ritorno di 2 anni è risultata pari a 2.04 l/s, per il lago di Allori e a 3.80 l/s, per il lago di San Cipriano. I valori del DMV appaiono in accordo con quelli ricavati per gli stessi laghi mediante l'approccio adottato dal Piano Stralcio, sebbene si evidenzia una riduzione rispetto a questi ultimi.

La verifica di adattabilità del campione non ha avuto esito positivo per il lago di Castelnuovo per il quale si ritiene dunque meno attendibile il valore del DMV ricavato dal campione delle Q_7 minime pari a 1.89 l/s.

Così come osservato per i DMV ricavati secondo la metodica utilizzata nel Piano Stralcio, anche l'analisi dei campioni delle minime portate di sette giorni consecutivi (min Q_7) ha prodotto valori inferiori a quelli simulati nella presente verifica del progetto di riassetto dell'area che assume come deflussi minimi 10 l/s per i laghi di Allori e San Cipriano, e 12 l/s per il lago di Castelnuovo secondo quanto prescritto dal Ministero (prescrizione A1.3 del MATTM Commissione Tecnica per le Verifiche dell'Impatto Ambientale VIA-VAS - parere n. 224 del 19.12.2008).

Nelle more delle inevitabili incertezze legate alle schematizzazioni modellistiche, il confronto con le evidenze del Piano Stralcio del Bilancio Idrico della Regione Toscana ha avuto esito positivo.

4.4 Verifica di ottemperanza alla prescrizione ministeriale A1.3 MATTM

La Commissione Tecnica per le Verifiche dell'Impatto Ambientale VIA-VAS, con parere n. 224 del 19.12.2008 (prescrizione A1.3 del MATTM) chiedeva:

- *“devono essere redatti un nuovo bilancio idrologico dei bacini afferenti ai laghi e un nuovo bilancio idrico dei laghi, strutturati su base mensile, in cui siano esplicitati, sempre su base mensile, il modello afflussi/deflussi e le singole componenti dei bilanci”*;
- *“in particolare devono essere indicati i dati mensili relativi a precipitazioni, temperature, evaporazione potenziale e reale, deficit e surplus mensile, coefficienti di deflusso, altezza d'acqua per evaporazione diretta dagli specchi d'acqua, riserva idrica dei suoli”*.

A corredo dell'analisi dei risultati del modello HEC-HMS descritta ai precedenti capitoli, avendo utilizzato un modello a serbatoi sono disponibili tutti i dati che rappresentano le singole componenti dei bilanci. Per quanto concerne il secondo punto si rimanda alle analisi contenute nei precedenti capitoli con l'esclusione delle indicazioni relative alla riserva idrica dei suoli trattata in dettaglio qui di seguito.

4.4.1 La riserva idrica dei suoli

La riserva idrica dei suoli o capacità d'acqua disponibile rappresenta la massima quantità di acqua in un suolo che può essere utilizzata dalle piante. È data dalla differenza tra la quantità di umidità presente nel suolo alla capacità di campo e quella relativa al punto di appassimento permanente.

La Figura 37 e la Figura 41 mostrano il contenuto idrico alla tensione di 1500 kpa (punto di appassimento permanente) e alla tensione di 33 kpa (capacità di campo) secondo quanto ricavato dalle carte pedologiche della regione Toscana. L'analisi delle figure consente di ricavare valori di riserva idrica dei suoli per le aree in esame variabili da 0 a 300 mm circa con valori maggiori nella parte più a valle dei bacini.

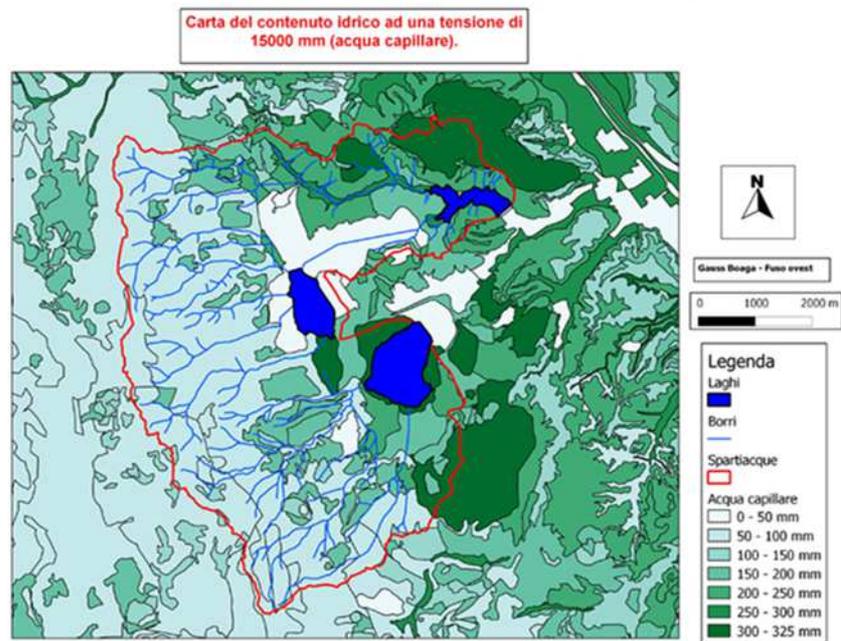


Figura 37 Contenuto idrico ad una tensione di 1500 kpa nei bacini imbriferi dei 3 laghi (fonte “carte pedologiche della regione Toscana”).

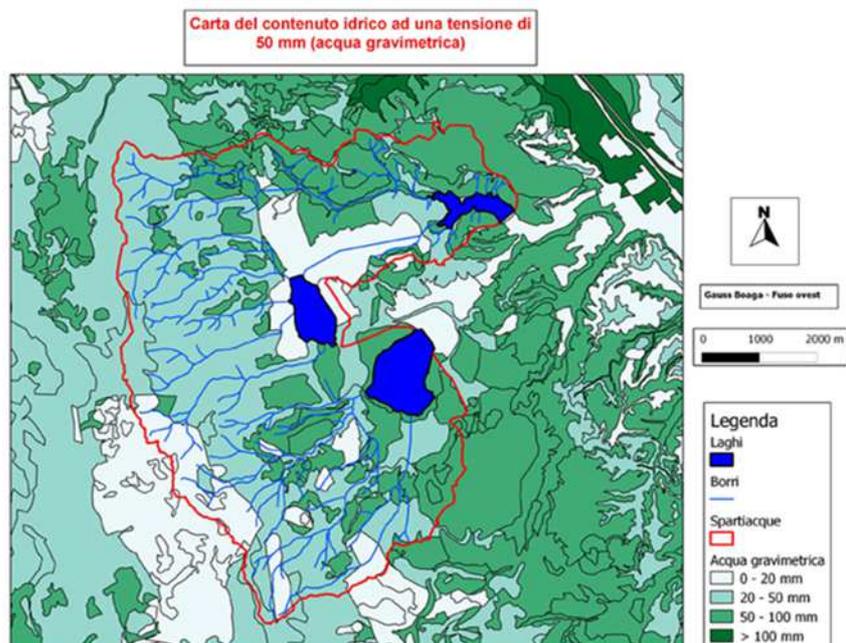


Figura 38 Contenuto idrico ad una tensione di 33 kpa nei bacini imbriferi dei 3 laghi (fonte “carte pedologiche della regione Toscana”).

I valori di riserva idrica ricavati dalla cartografia regionale di settore sono stati confrontati con quelli calcolati dalla modellazione idrologica HEC-HMS in termini di *Soil Profile Storage* (acqua immagazzinata nello strato sub-superficiale costituita dall'acqua che si infila dalla superficie) inteso come somma dei contributi denominati *Tension zone storage* e di *Upper zone storage* (si veda la schematizzazione a

serbatoi di Figura 20). Il primo contributo costituisce il contenuto di acqua che non drena per gravità ma si perde solo per evapotraspirazione poiché aderente ai granuli; il secondo contributo rappresenta, invece, l'acqua interstiziale. Al termine della procedura di calibrazione del modello idrologico (CESI, 2020) la massima capacità di *Storage* nello strato sub-superficiale è risultata di circa 200 mm, di cui 117 mm di acqua adesa ai granuli (*Tension zone storage*) (Figura 21). Tale valore massimo appare perfettamente comparabile con quanto ricavato dalla cartografia regionale di settore qui sopra illustrata.

La Figura 39 mostra l'andamento nel periodo simulato della riserva d'acqua complessivamente immagazzinata nello strato sub-superficiale dei tre bacini esaminati.

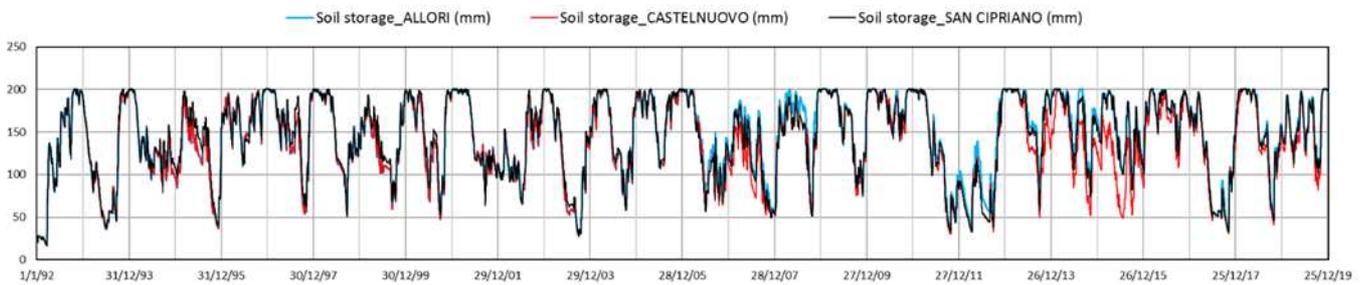


Figura 39 Riserva d'acqua dei suoli dei tre bacini (*Soil storage*, mm)

5 ANALISI TERMO-IDRAULICA

5.1 Descrizione del modello termo-idraulico utilizzato

Il modello utilizzato per la ricostruzione di andamenti temporali della temperatura dell'acqua e del bilancio idrico si basa sulle equazioni di bilancio di massa e di bilancio energetico applicate all'invaso in esame e simula il comportamento termo-idraulico di un generico bacino idrico del quale siano note le caratteristiche geometriche, le portate degli immissari ed emissari e i principali parametri meteorologici influenzanti.

Il modello è di tipo zero-dimensionale, cioè si basa sull'ipotesi che il lago risulti completamente rimescolato e le variabili modellate siano uniformi su tutto il volume. Nei laghi dell'area mineraria di Santa Barbara in esame questa condizione è sostanzialmente verificata in quanto la profondità dei bacini idrici è piuttosto limitata (9.3 m per il San Cipriano, 13 m per l'Allori e 9.6 m per il Castelnuovo – cfr. par. 2.1.1, 2.1.2, 2.13) e tale da escludere significativi fenomeni di stratificazione permanente (meromissi). Inoltre, anche sulla base dei dati di monitoraggio raccolti da CESI e dalla società CIERRE è plausibile ritenere che si tratti di laghi olomittici, che presentano almeno una fase di piena circolazione con rimescolamento verticale nel corso dell'anno.

L'equazione di bilancio di massa è la seguente:

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{evap}} \quad (1)$$

dove:

V	volume di acqua invasata nel lago;
Q_{in} e Q_{out}	portate liquide in ingresso e in uscita dal lago (nel caso comprendenti non solo quelle degli immissari e degli emissari ma anche le portate scaricate dal lago di Allori verso il lago di Castelnuovo, i deflussi minimi rilasciati a valle dei tre laghi, la portata in arrivo dall'Arno e la portata destinata al funzionamento della centrale di Santa Barbara);
Q_{evap}	flusso evaporativo netto (tolte le precipitazioni) dalla superficie verso l'atmosfera.

L'equazione base di bilancio termico utilizzata dal modello è la seguente:

$$\boxed{\rho C_w dT_w/dt = \varphi_{netto} A + \rho C_w Q_{imm} (T_{imm} - T_w) / V} \quad (2)$$

dove i diversi termini che compaiono hanno il seguente significato:

ρ	densità del liquido
C_w	calore specifico del liquido
T_w	temperatura dell'acqua del bacino lacustre
Q_{imm} e T_{imm}	portata e temperatura dell'immissario
φ_{netto}	flusso termico netto da o verso l'atmosfera
A	superficie del bacino.

La temperatura dell'acqua dell'immissario (T_{imm}) è posta pari alla temperatura di bulbo bagnato utilizzando i parametri meteorologici disponibili.

Il **flusso termico netto** è rappresentato dalla seguente equazione:

$$\Phi_{\text{netto}} = \Phi_{\text{sol}} + \Phi_{\text{LW}} + \Phi_{\text{irr}} + \Phi_{\text{s}} + \Phi_{\text{L}}$$

dove:

Φ_{sol} flusso dall'atmosfera verso la terra (ricavato dalle registrazioni dei parametri meteo)

Φ_{LW} flusso radiativo di onda lunga = $-5.18 \cdot 10^{-13} \cdot (1+0.17 \cdot C^2) \cdot (273+T)^6$
in cui

C copertura nuvolosa [%]
T temperatura dell'aria [°C]

Φ_{irr} flusso riflesso dalla superficie dell'acqua = $5.23 \cdot 10^{-8} \cdot (273+T_w)^4$

Φ_{s} flusso di trasferimento del calore sensibile = $C_s \cdot \rho_a \cdot C_p \cdot U \cdot (T_w-T)$
in cui

C_s coefficiente = $1.45 \cdot 10^{-3}$
 ρ_a densità dell'aria = $1.2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
 C_p calore specifico dell'aria [$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$]
U velocità del vento [m/s]

Φ_{L} flusso di calore perso per evaporazione = $C_L \cdot \rho_a \cdot L_w \cdot U \cdot (Q_0-Q)$
in cui

Q_0 umidità specifica di saturazione
Q umidità corrente
 L_w calore latente di evaporazione = $2.4 \cdot 10^6 \text{ [J/kg]}$
 C_L coefficiente = $1.45 \cdot 10^{-3}$

Le equazioni sopra riportate sono dedotte da letteratura (FISCHER, 1979) così come tutti i parametri e i coefficienti utilizzati (FISCHER, 1979).

Per il calcolo dell'**umidità specifica** in condizioni di saturazione si ricorre alla formulazione:

$$Q_0 = 622 \cdot E / (P - 0.378 E)$$

dove:

E tensione di vapor saturo alla temperatura t dell'aria [mbar]

P pressione atmosferica [mbar]

La stima della portata di evaporazione Q_{evap} è stata effettuata attraverso l'applicazione di una delle formulazioni suggerite da Dragoni e Valigi (1994) scaturite da uno studio che ha interessato l'Italia Centrale. Il lavoro ha analizzato, a scala mensile, un insieme di dati evaporimetrici (da evaporimetri di classe A) misurati nell'Italia Centrale, sul versante tirrenico, nella zona compresa all'incirca fra la latitudine di 41° 50' N e 43° 00' N, quindi in area decisamente prossima al sito in esame.

La formula empirica adottata è la seguente:

$$E_n = b (i_m)^{a_1} (t_n)^{a_2} \left(1 - \frac{U_n}{100}\right)^{a_3} (R_n)^{a_4}$$

in cui:

- E_n = evaporazione (mm/mese);
- n = indice relativo al mese;
- i_m = indice di insolazione mensile di Thornthwaite;
- t_n = temperatura media mensile della superficie liquida;
- R_n = radiazione globale media mensile (cal/(cm² giorno));
- U_n = umidità relativa percentuale media mensile;
- $b = 1.46$;
- $a_1 = 1.11$;
- $a_2 = 0.537$;
- $a_3 = 0.287$;
- $a_4 = 0.51$.

Il parametro i_m varia a seconda della latitudine e del mese. La seguente TABELLA 13 riporta tali dati riferiti alla latitudine 43° 00' N.

TABELLA 13 Indice di insolazione mensile di Thornthwaite.

Mese	m	i_m
gennaio	1	0.81
febbraio	2	0.82
marzo	3	1.02
aprile	4	1.12
maggio	5	1.26
giugno	6	1.28
luglio	7	1.29
agosto	8	1.2
settembre	9	1.04
ottobre	10	0.95
novembre	11	0.81
dicembre	12	0.77

Disponendo dei dati medi giornalieri di umidità relativa, radiazione solare e temperatura del lago la formulazione sopra descritta, riferita a valori mensili, è stata convertita ad evaporazione giornaliera:

$$E_g = \frac{E_n}{n. \text{giorni mese}}$$

dove E_g è espresso in mm/giorno.

La portata di evaporazione in m³/s è quindi data dalla relazione

$$Q_{evap} = E_g \frac{10^{-3}}{86400} sup$$

dove 'sup' è la superficie del lago alla quota corrente.

Le equazioni differenziali (1) e (2) vengono risolte in modo disaccoppiato:

- l'equazione dell'energia (2) viene integrata con il metodo di Runge-Kutta con passo temporale di un giorno, e fornisce i valori medi giornalieri della temperatura del lago (Tw);
- l'equazione di continuità (1) viene integrata con il metodo di Eulero assumendo un passo di integrazione di un'ora (invece di un giorno) per meglio rappresentare la fase di rilascio dei volumi

in eccesso che avviene utilizzando curve di deflusso che tengono conto delle specificità delle opere di rilascio di ciascun lago. Da questa equazione si ottiene il volume corrente del lago e quindi, attraverso la curva di invaso, il livello.

I dati di input per il modello sono le grandezze significative per il bilancio energetico e idraulico e precisamente:

INPUT	temperatura dell'aria
INPUT	umidità relativa
INPUT	radiazione solare
INPUT	velocità del vento
INPUT	portata immissario (da modello idrologico)
INPUT	temperatura dell'immissario
INPUT	geometria dell'invaso (curva di invaso) e curva di deflusso (dedotta dalla geometria delle opere di alleggerimento)
INPUT	condizioni iniziali dei parametri

Come già indicato, non essendo disponibili dati sperimentali sulle portate affluenti ai tre bacini, l'andamento dei deflussi in ingresso è stato ricostruito sulla base delle precipitazioni giornaliere sui relativi bacini imbriferi, con il modello idrologico di trasformazione afflussi-deflussi presentato in precedenza.

Inoltre, non avendo a disposizione misure di temperatura dell'acqua dell'immissario, questa è stata posta pari alla temperatura di bulbo bagnato, calcolata con i parametri meteorologici disponibili.

Infine, ai fini del corretto funzionamento del codice di calcolo, è stata garantita una soglia minima di portata costante in ingresso ai bacini pari a 1 l/s. Si tratta di un contributo di 1.7 mm/anno di afflussi al sistema dei tre laghi (94608 m³/anno rapportati alla superficie complessiva di 55.82 km²) completamente trascurabile rispetto agli afflussi medi nell'area che sfiorano i 900 mm/anno, oltre che abbondantemente ricadente, ad esempio, nell'imprecisione legata all'applicazione del metodo dei topoi di Thiessen.

L'output della modellazione è costituito dagli andamenti temporali delle seguenti grandezze:

OUTPUT	temperatura media del lago
OUTPUT	portata dell'emissario
OUTPUT	portata evaporata
OUTPUT	livello
OUTPUT	superficie
OUTPUT	volume

Le modellazioni dei bilanci idrologici e idraulici del sistema Allori – Castelnuovo descritte nel seguito sono state eseguite secondo due differenti ipotesi di connessione tra i due laghi. La prima ipotesi (denominata A) non prevede alcun rilascio di portata dal lago di Allori a quello di Castelnuovo, mentre la seconda ipotesi (denominata B) considera il rilascio di 10 l/s, quando disponibili, dall'Allori al Castelnuovo.

I grafici che mostrano i risultati della modellazione termica dei tre laghi contengono anche le temperature medie dei profili termici misurati nei monitoraggi più recenti (2018 e 2019).

Tenendo presente che le temperature del modello sono medie giornaliere dell'intero volume del lago (si ricorda la significatività zero-dimensionale del modello), mentre le misure sono effettuate in un punto preciso del lago e ad un'ora precisa (probabilmente con una temperatura superficiale, specie nei periodi estivi, influenzata dall'ora del rilievo), il confronto tra i valori medi misurati e quelli calcolati ha dato esito positivo.

5.2 Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di San Cipriano

5.2.1 Dati di input utilizzati

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di San Cipriano utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago 143.00 m s.l.m.
- quota alla massima ritenuta 152.30 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta 472 948 m²
- volume alla quota di massima ritenuta 2 183 039 m³
- superficie bacino imbrifero 23.60 km²

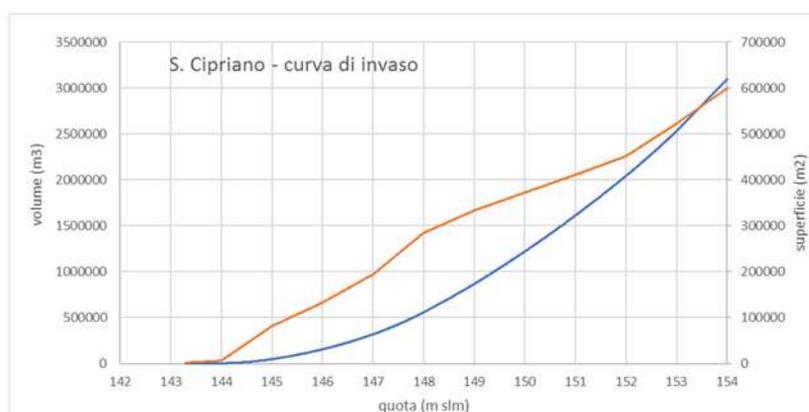


Figura 40 – Lago di San Cipriano: curva di invaso.

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno rilevate nel “Disciplinare della Concessione delle derivazioni di acqua dal Fiume Arno e dal bacino di accumulo di S. Cipriano” registrato con n. rep. 627 del 07/10/2005 oppure, come nel caso del fabbisogno della centrale, indicate da Enel:

- rilascio di una portata di DMV pari a 10 l/s per l’alimentazione del borro San Cipriano (si assume che tale DMV sia sempre garantito);
- rilascio di una portata per il fabbisogno della centrale pari a:
 - 75 l/s nel quadrimestre estivo (da giugno a settembre);
 - 55 l/s nei rimanenti mesi⁶;
- portata integrativa autorizzata da disciplinare in arrivo dall’Arno (tramite pompaggio) per garantire i volumi necessari al funzionamento della centrale. Il pompaggio è interdetto tra il 1° luglio e il 30 settembre;
- al fine di assicurare il massimo invaso prima del periodo di interdizione per il prelievo da Arno (1° luglio-30 settembre) nei mesi di aprile, maggio e giugno viene effettuato un pompaggio da Arno con portata massima di 500 l/s. Se il livello nel lago è superiore a 151.30 m slm il pompaggio è interrotto;

⁶ La regola operativa indicata da Enel deriva dall’analisi dei prelievi della centrale degli ultimi 4 anni. I prelievi così ricostruiti appaiono sufficientemente conservativi (la portata media di 61.7 l/s è superiore a ogni valore degli ultimi 4 anni) e tengono conto degli effettivi utilizzi.

- si assume che il lago non debba scendere sotto quota 147.5 m slm. In tale eventualità si ipotizza l'avvio del prelievo dall'Arno (con esclusione del periodo di interdizione);
- nell'ipotesi che il livello del lago superi la quota di massima ritenuta (152.3 m slm) il volume in eccesso sarà scaricato mediante opportuna opera di rilascio mediante la seguente legge di deflusso:

$$Q_{scar} = 0.395 L (Z_{lago} - Z_{soglia}) \sqrt{2 g (Z_{lago} - Z_{soglia})}$$

dove : Q_{scar} = portata rilasciata (m³/s);

L = lunghezza soglia (7 m, lunghezza della paratoia centrale di regolazione);

Z_{lago} = livello di invaso;

Z_{soglia} = quota soglia di sfioro (152.30 m slm);

g = accelerazione di gravità (9.81 m/s²)

L'applicazione del modello termo-idraulico è stata effettuata per il lago di San Cipriano utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare e velocità del vento) e le precipitazioni trasformate presentate al paragrafo 3.2.4.

La modellazione matematica è stata effettuata dal 1° settembre 1992 al 31 dicembre 2019.

5.2.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idraulico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di S. Cipriano sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le grandezze più significative.

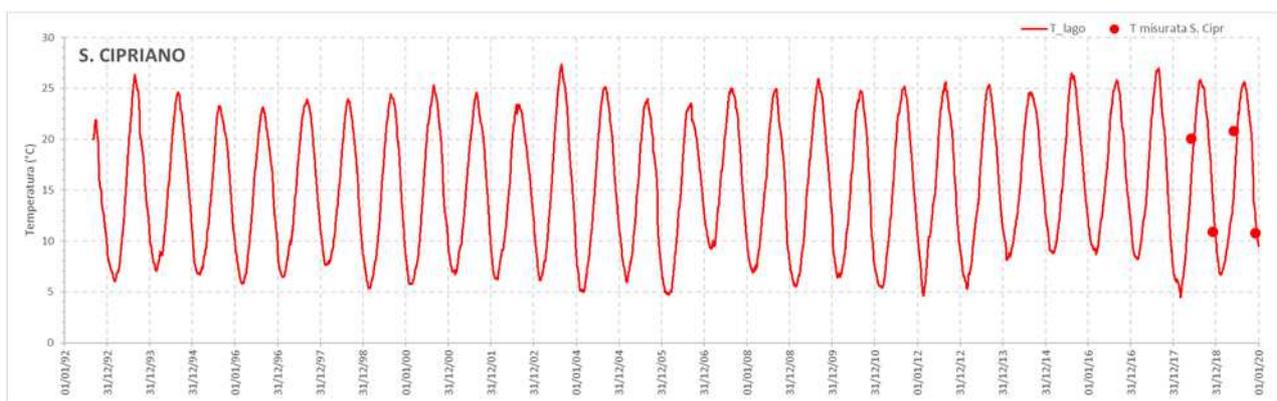


Figura 41 – Temperatura dell'acqua nel lago di S. Cipriano.

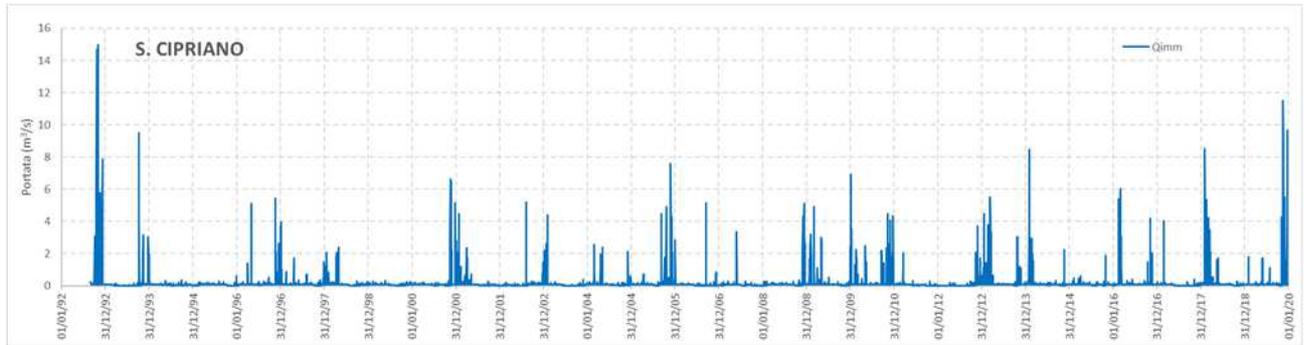


Figura 42 – Portata naturale in ingresso nel lago di S. Cipriano.

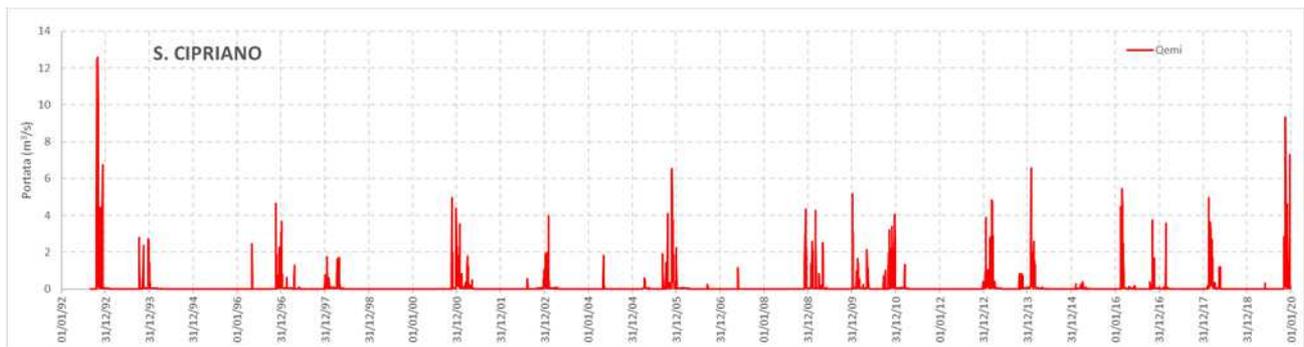


Figura 43 – Portata rilasciata per DMV o per superamento soglie.

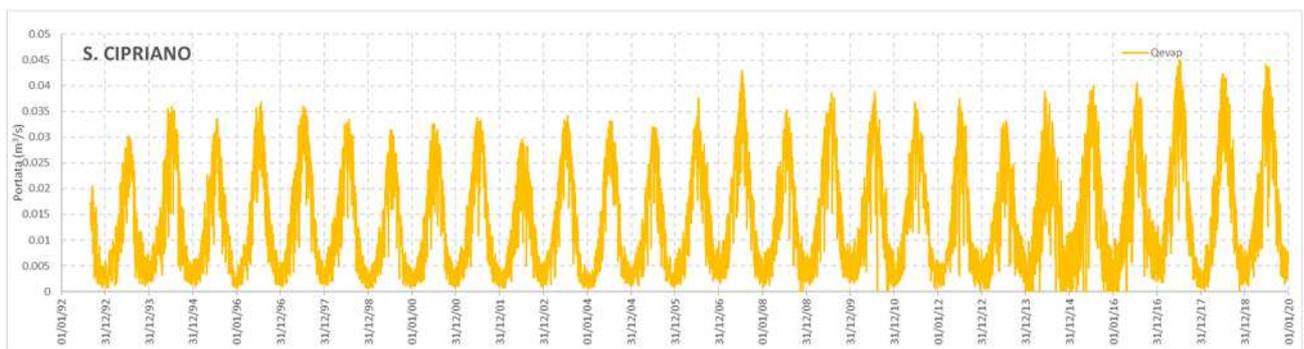


Figura 44 – Portata di evaporazione.

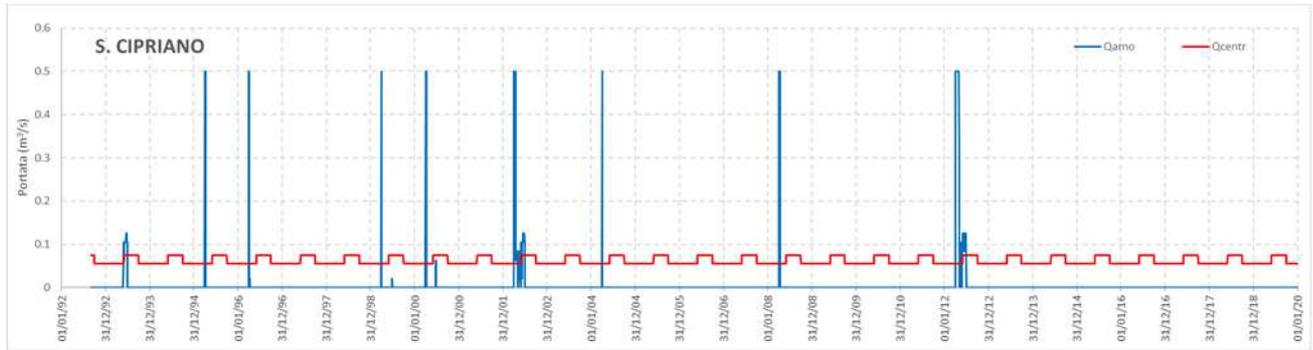


Figura 45 – Portata pompata da Arno e prelevata dalla Centrale.

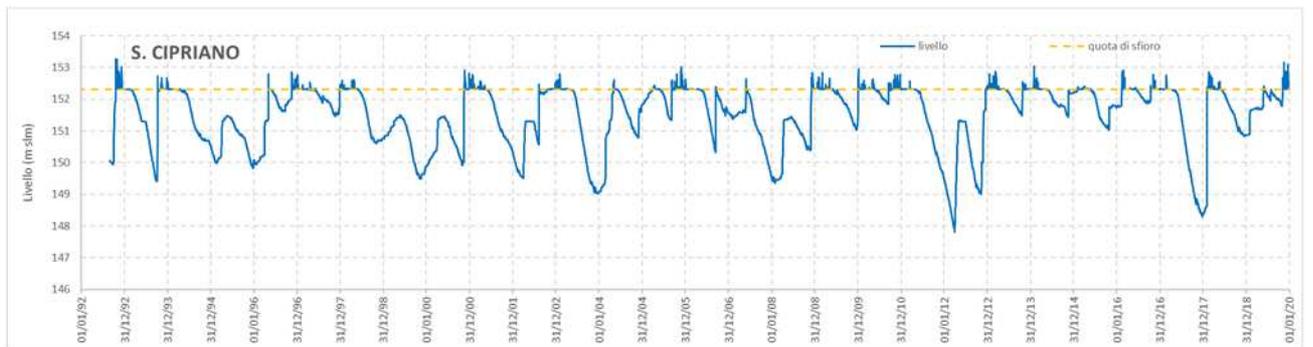


Figura 46 – Livello nel lago di S. Cipriano con indicazione della quota della soglia di tracimazione (152.3 m slm).

Dalla Figura 47 alla Figura 54 sono riportate le medie mensili dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di San Cipriano per il periodo 1/1/1993 – 31/12/2019.

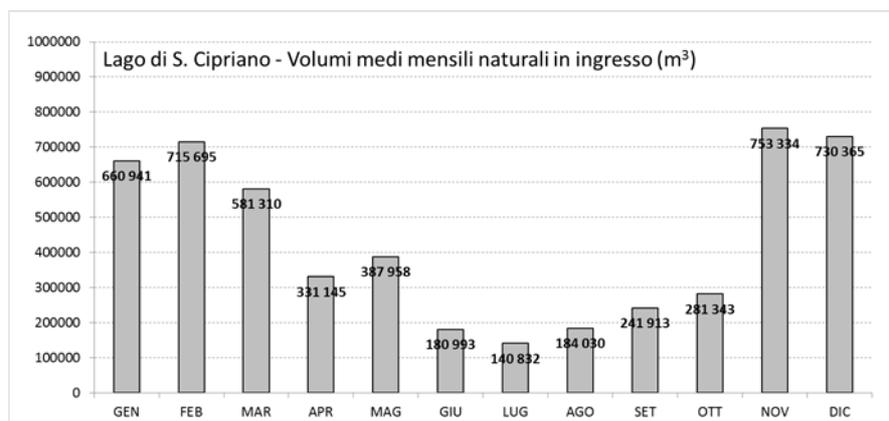


Figura 47 – Lago di S. Cipriano. Volumi naturali in ingresso medi mensili.

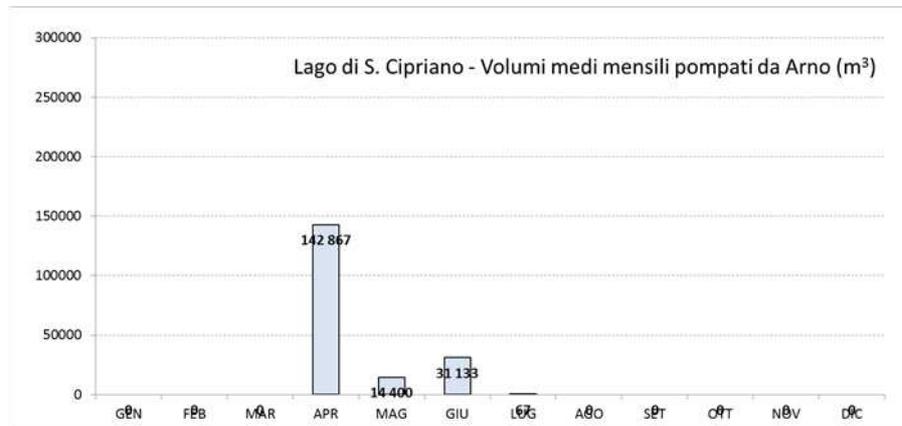


Figura 48 – Lago di S. Cipriano. Volumi medi mensili pompanti da Arno.

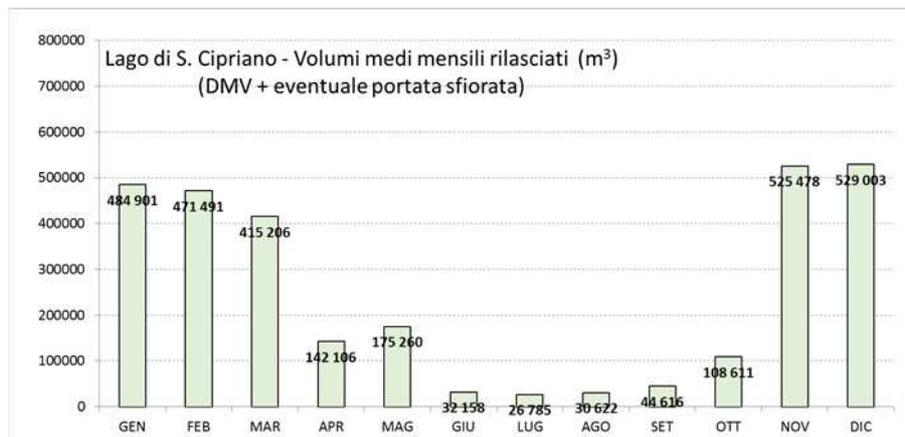


Figura 49 – Lago di S. Cipriano. Volumi medi mensili rilasciati.

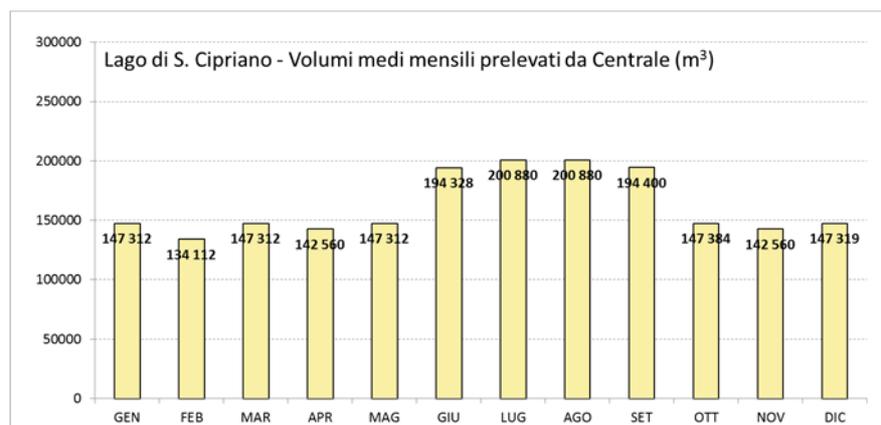


Figura 50 – Lago di S. Cipriano. Volumi medi mensili prelevati dalla Centrale.

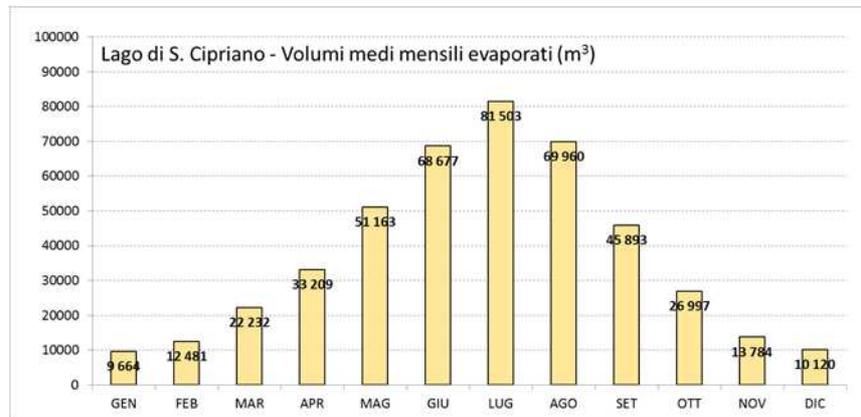


Figura 51 – Lago di S. Cipriano. Volumi medi mensili evaporati.

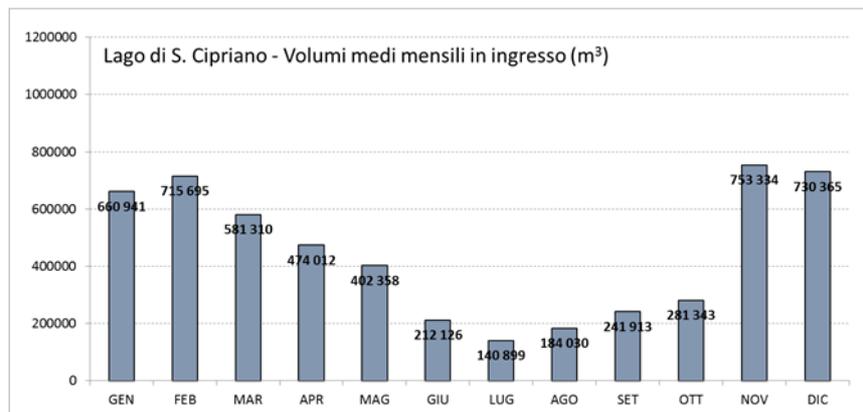


Figura 52 – Lago di S. Cipriano. Volumi medi mensili in ingresso (naturali + Arno).

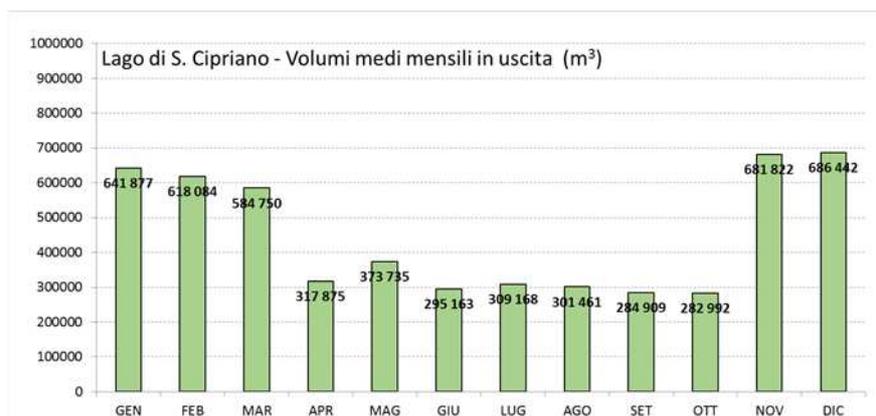


Figura 53 – Lago di S. Cipriano. Volumi totali medi mensili in uscita (rilasciati, alla Centrale ed evaporati).

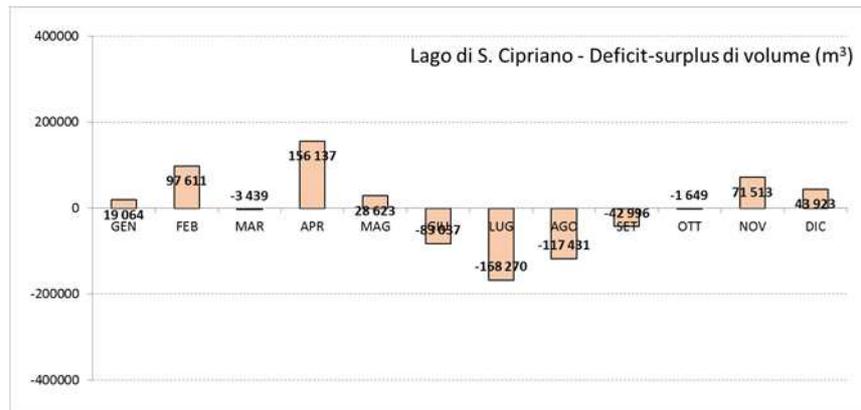


Figura 54 – Lago di S. Cipriano. Deficit e surplus medi mensili.

Dalla Figura 55 alla Figura 62 sono riportati i valori annuali dei volumi d’acqua in ingresso e in uscita dal lago di San Cipriano per gli anni dal 1993 al 2019.

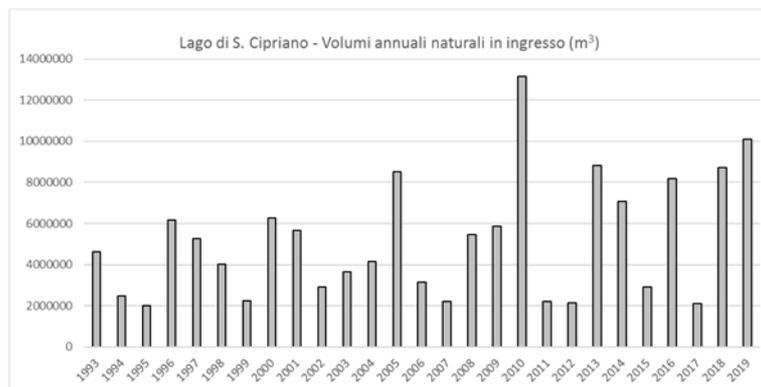


Figura 55 – Lago di S. Cipriano. Volumi annuali naturali in ingresso.

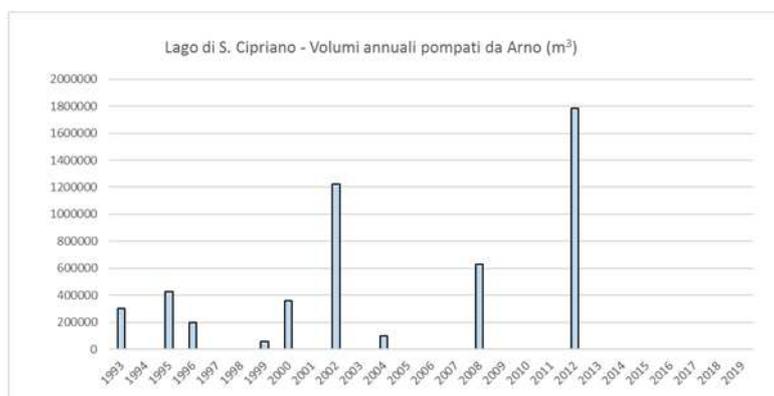


Figura 56 – Lago di S. Cipriano. Volumi annuali pompate da Arno.

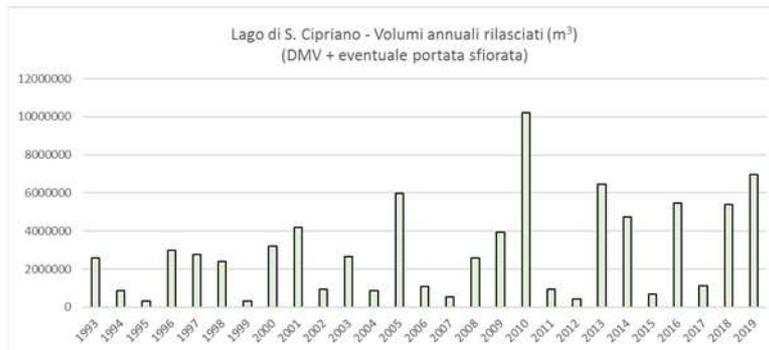


Figura 57 – Lago di S. Cipriano. Volumi annuali rilasciati.

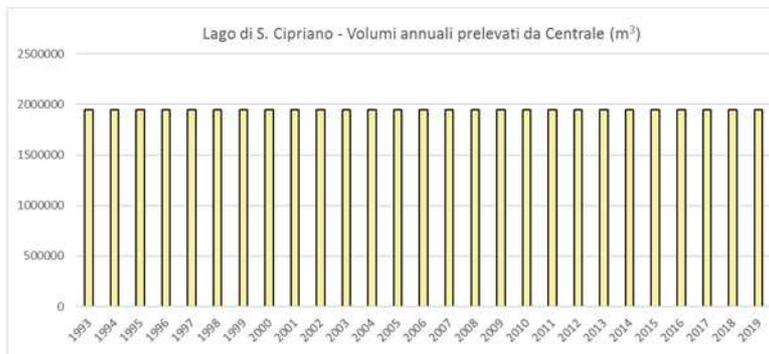


Figura 58 – Lago di San Cipriano. Volumi annuali prelevati dalla Centrale.

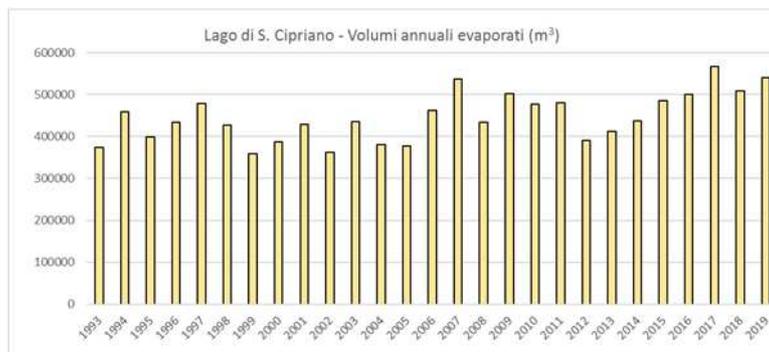


Figura 59 – Lago di S. Cipriano. Volumi annuali evaporati.

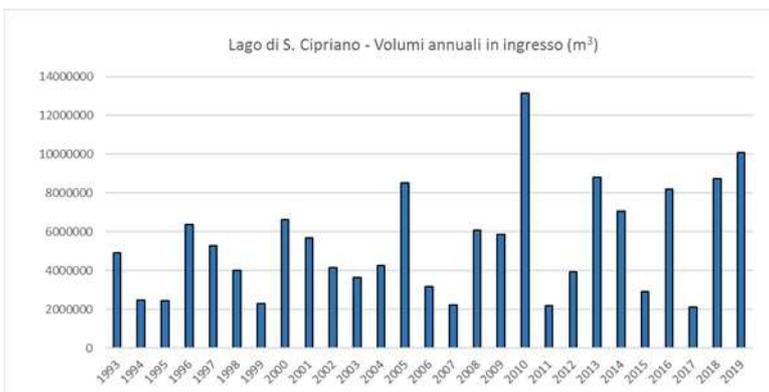


Figura 60 – Lago di S. Cipriano. Volumi annuali in ingresso (naturali + Arno).

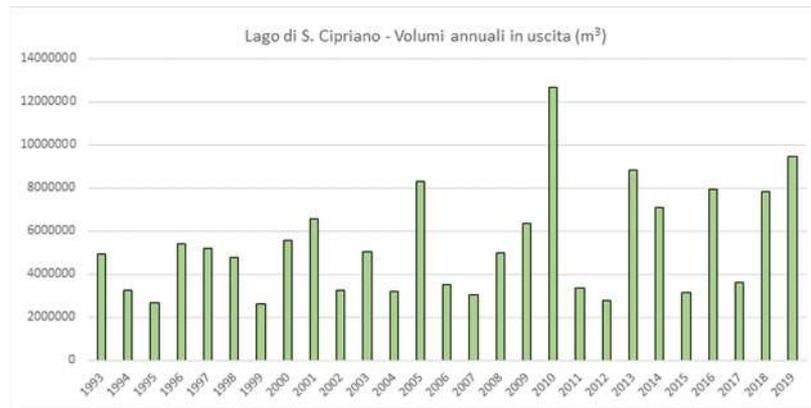


Figura 61 – Lago di S. Cipriano. Volumi totali annuali in uscita (rilasciati, alla Centrale ed evaporati).

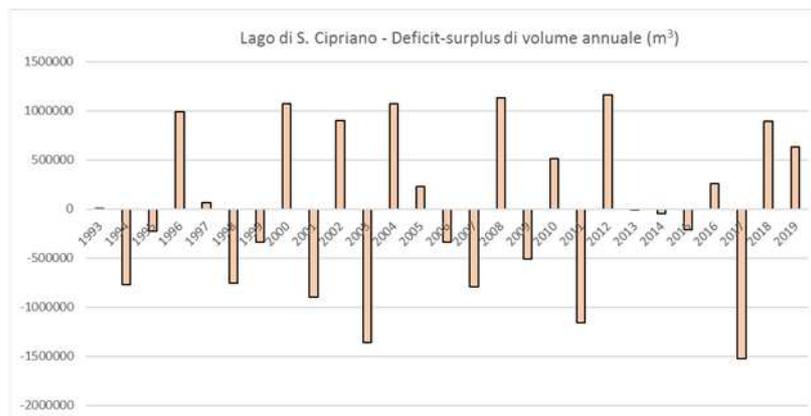


Figura 62 – Lago di S. Cipriano. Deficit e surplus annuali.

5.3 SCENARIO A - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Allori

5.3.1 Dati di input utilizzati

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Allori utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago 169.00 m s.l.m.
- quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta) 182.00 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta 530 470 m²
- volume alla quota di massima ritenuta 4 409 684 m³
- superficie bacino imbrifero 11.228 km²

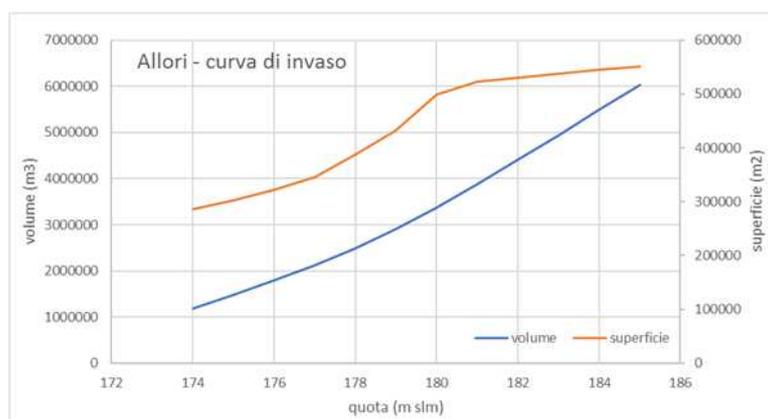


Figura 63 – Lago di Allori: curva di invaso.

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- **nessun rilascio verso il lago di Castelnuovo;**
- rilascio di una portata di DMV pari a 10 l/s tramite un'opera di derivazione con soglia della presa a quota 181 m s.l.m. Al di sotto di tale soglia non vi è rilascio;
- nell'ipotesi che il livello del lago superi la quota di massima ritenuta (182 m s.l.m.) il volume in eccesso sarà scaricato mediante un'opera di rilascio secondo la legge di deflusso riportata in Figura 64.

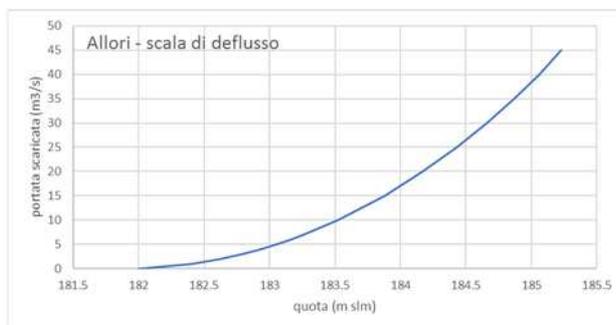


Figura 64 – Lago di Allori: scala di deflusso.

L'applicazione del modello termo-idraulico è stata eseguita per il lago di Allori utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare e velocità del vento) e le precipitazioni trasformate presentate al paragrafo 3.2.2.

La modellazione matematica è stata effettuata dal 1° settembre 1992 al 31 dicembre 2019.

5.3.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idraulico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le grandezze più significative. In particolare, la Figura 65 che mostra l'andamento della temperatura nel periodo simulato, evidenzia un buon riscontro con le misure delle campagne più recenti (punti rossi).

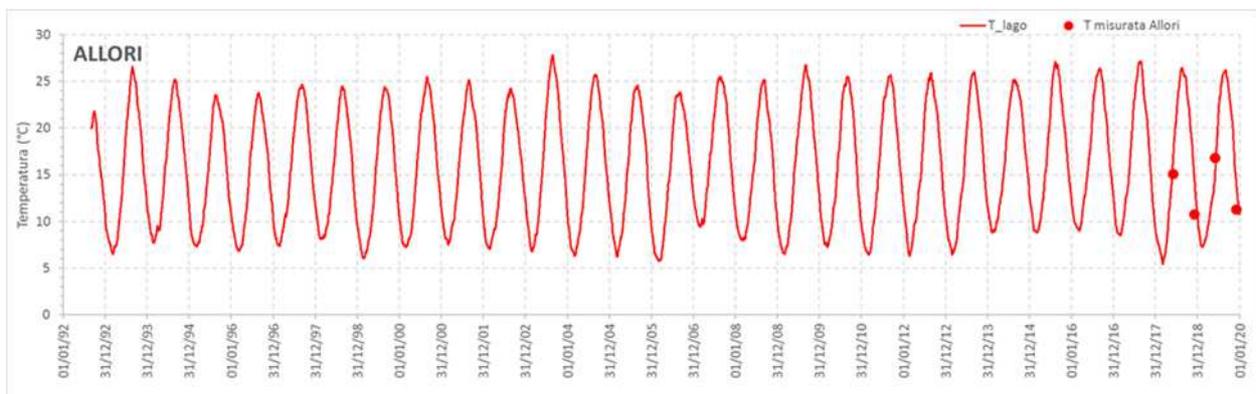


Figura 65 – Temperatura dell'acqua nel bacino di Allori.

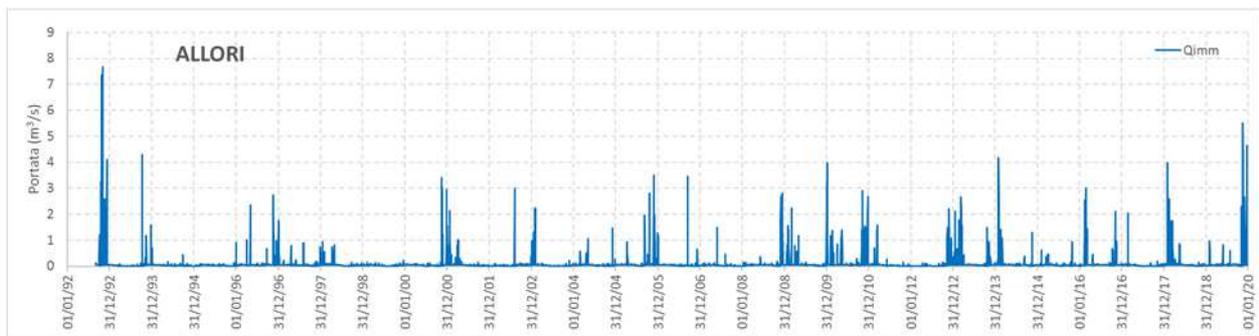


Figura 66 – Portata naturale in ingresso nel bacino di Allori.

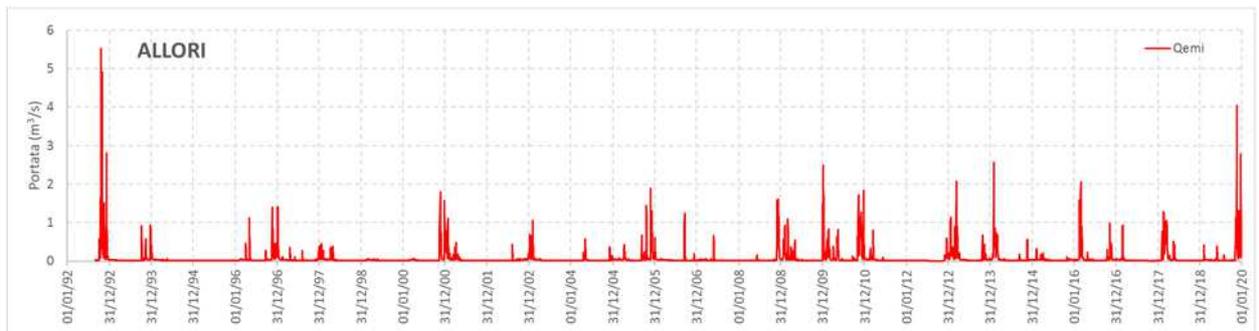


Figura 67 – Portata rilasciata per DMV o per superamento soglie.

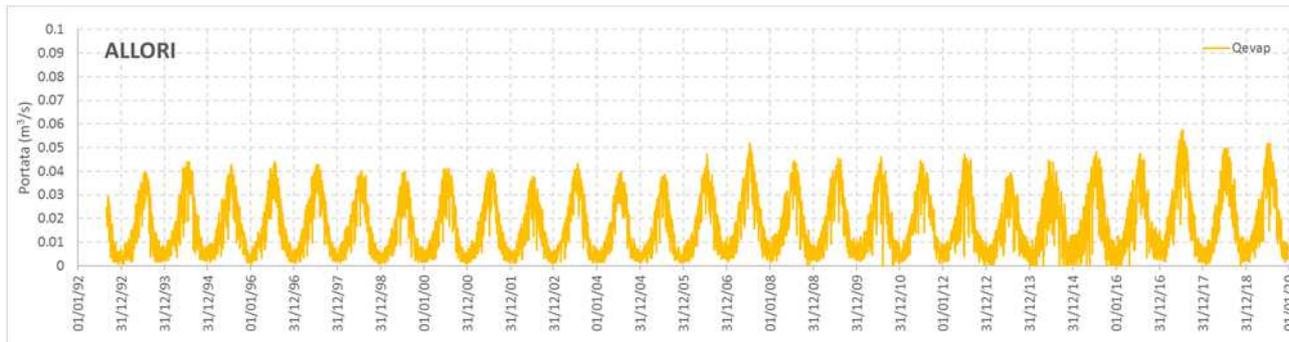


Figura 68 – Portata di evaporazione.

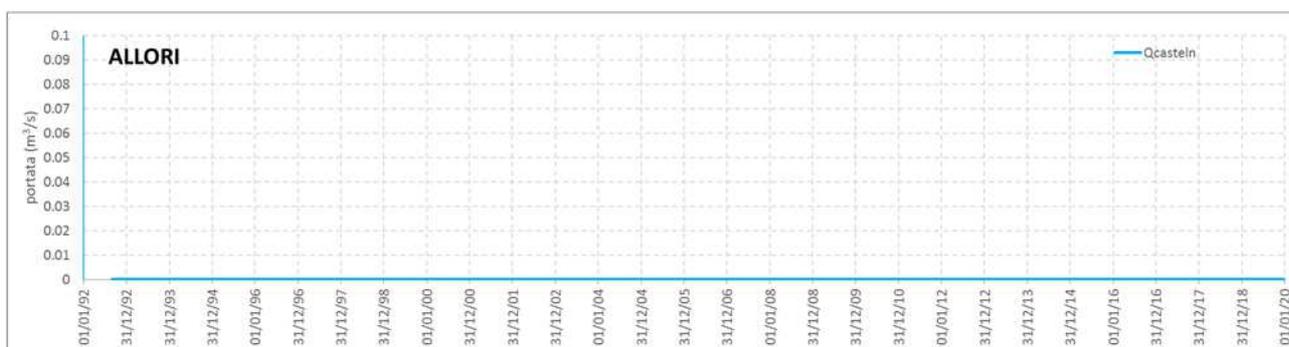


Figura 69 – Portata rilasciata verso il lago di Castelnuovo.

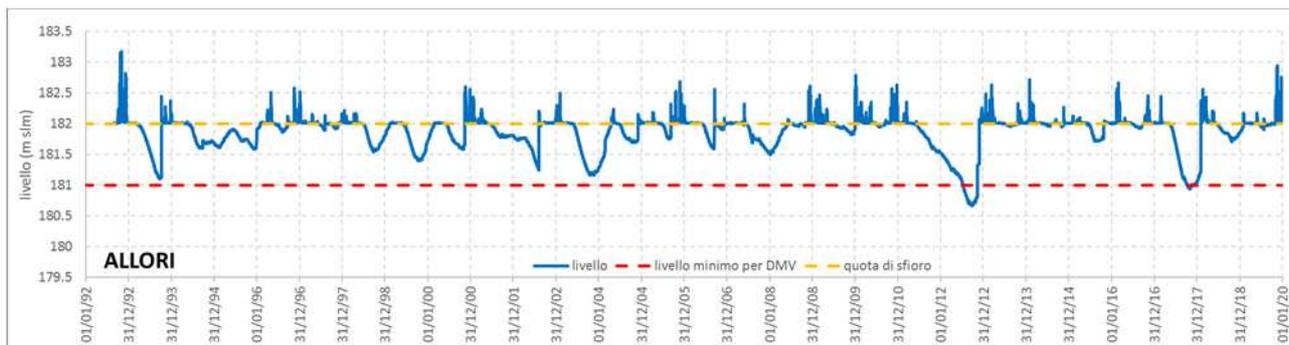


Figura 70 – Livello nel lago di Allori con indicazioni relative alla quota minima per rilascio del DMV e verso Castelnuovo (181 m slm) e della soglia di tracimazione (182 m slm).

L'analisi della Figura 70 evidenzia che durante il lasso temporale considerato il rilascio del DMV non sarebbe stato possibile in due soli periodi negli anni 2012 e 2017; si tratta precisamente di 187 giorni complessivi compresi tra il 12/7/2012 e il 12/11/2012 (124 giorni) e tra il 10/10/2017 e l'11/12/2017 (63 giorni).

Dalla Figura 71 alla Figura 76 sono riportate le medie mensili dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Allori per il periodo 1/1/1993 – 31/12/2019.

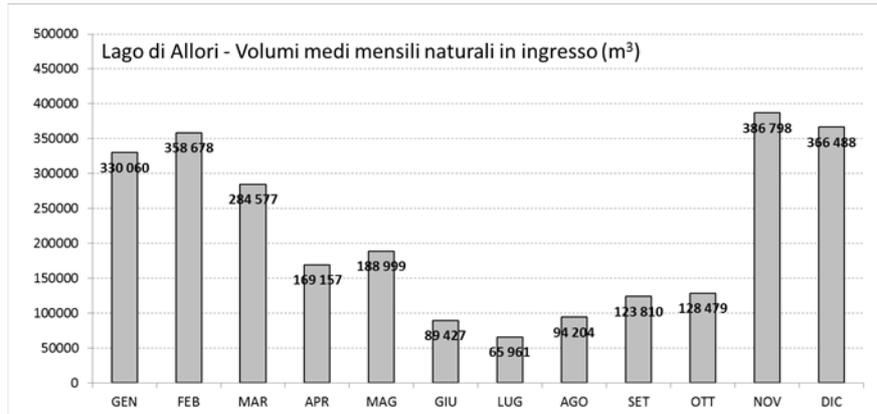


Figura 71 – Lago di Allori. Volumi naturali in ingresso medi mensili.

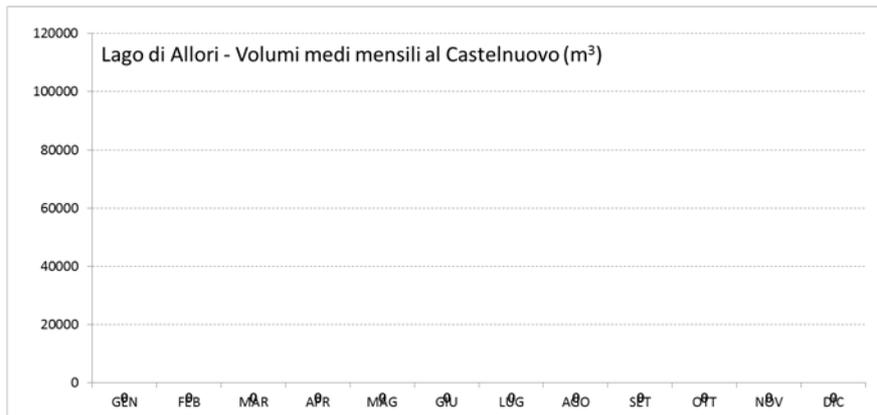


Figura 72 – Lago di Allori. Volumi medi mensili al Castelnovo.

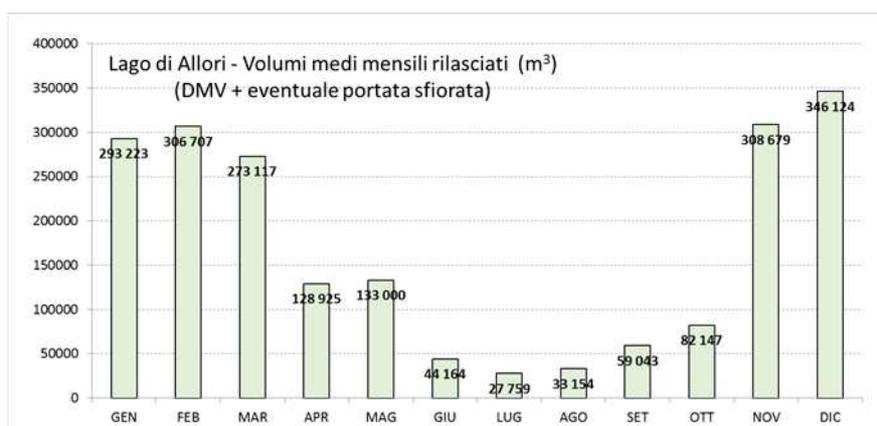


Figura 73 – Lago di Allori. Volumi medi mensili rilasciati.

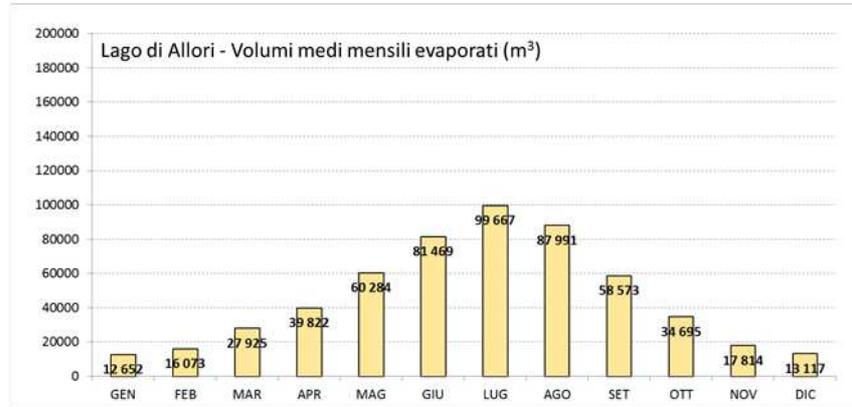


Figura 74 – Lago di Allori. Volumi medi mensili evaporati.

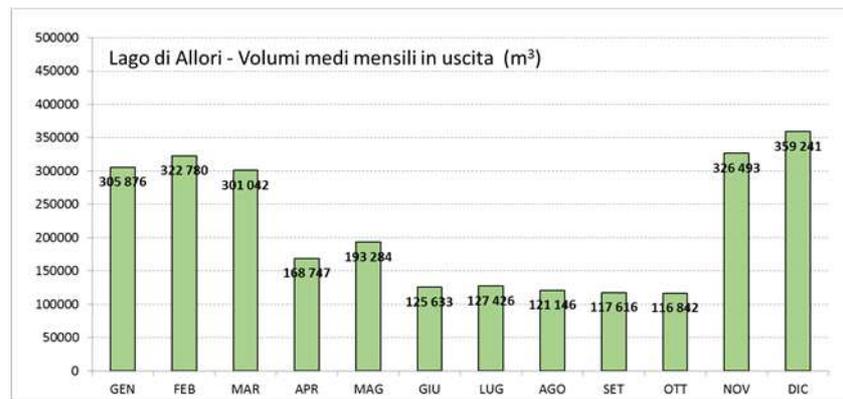


Figura 75 – Lago di Allori. Volumi totali medi mensili in uscita (al Castelnuovo, rilasciati ed evaporati).

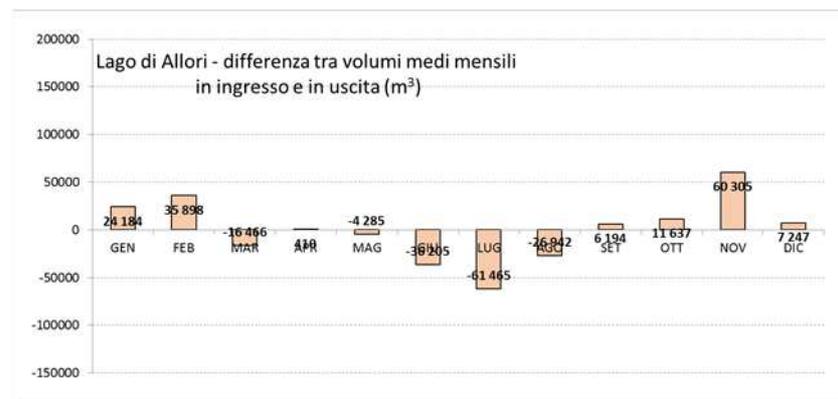


Figura 76 – Lago di Allori. Deficit e surplus medi mensili.

Il grafico di Figura 77 riporta le medie mensili delle portate scaricate per superamento della soglia (182 m slm).

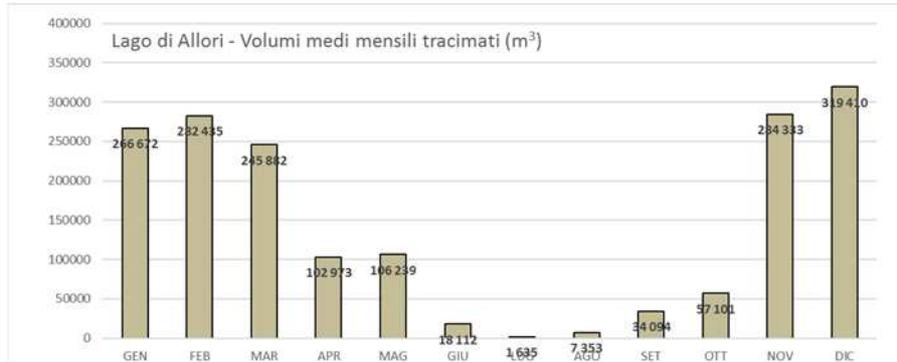


Figura 77 – Lago di Allori. Volumi medi mensili scaricati per superamento della soglia.

Dalla Figura 78 alla Figura 83 sono riportati i valori annuali dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Allori per gli anni dal 1993 al 2019.

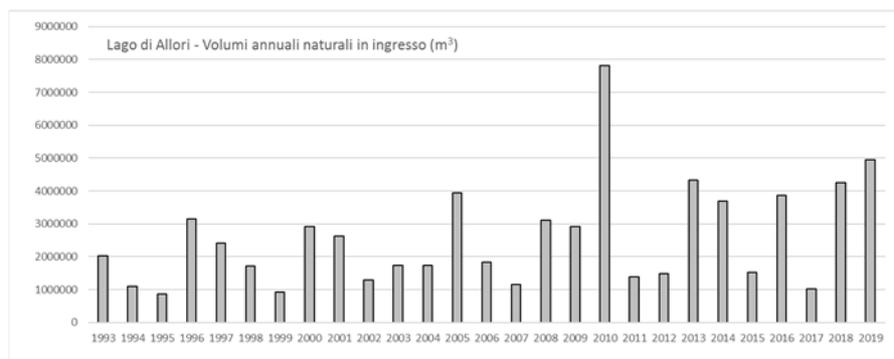


Figura 78 – Lago di Allori. Volumi annuali naturali in ingresso.

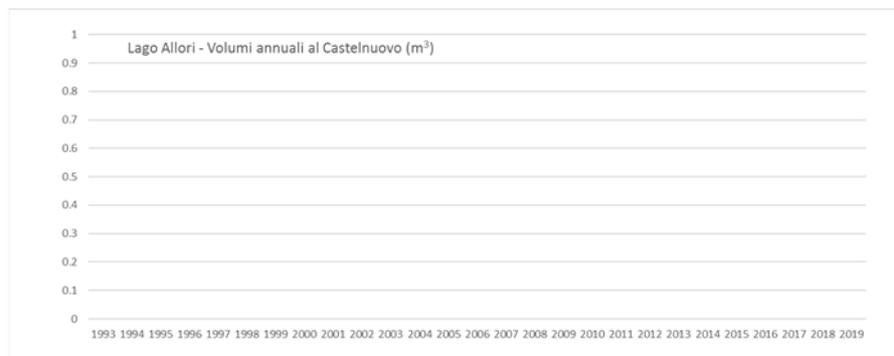


Figura 79 – Lago di Allori. Volumi annuali al Castelnuovo (nulli nell'ipotesi A in esame).

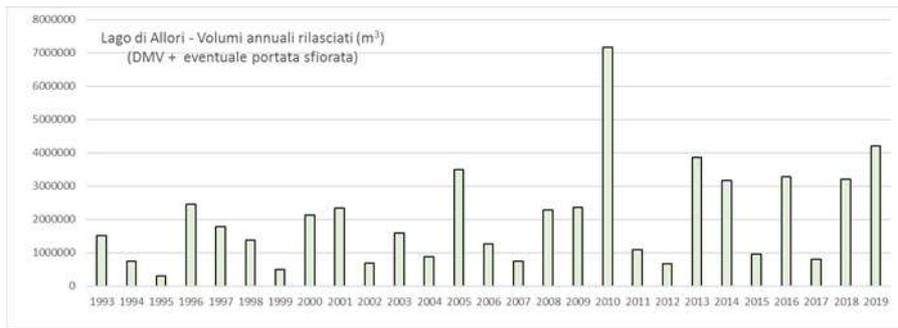


Figura 80 – Lago di Allori. Volumi annuali rilasciati.

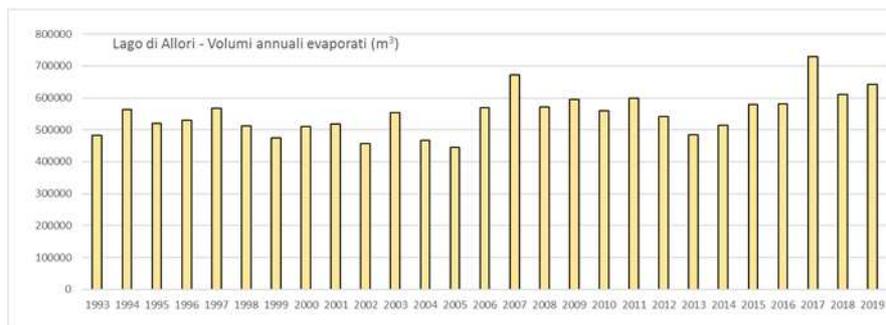


Figura 81 – Lago di Allori. Volumi annuali evaporati.

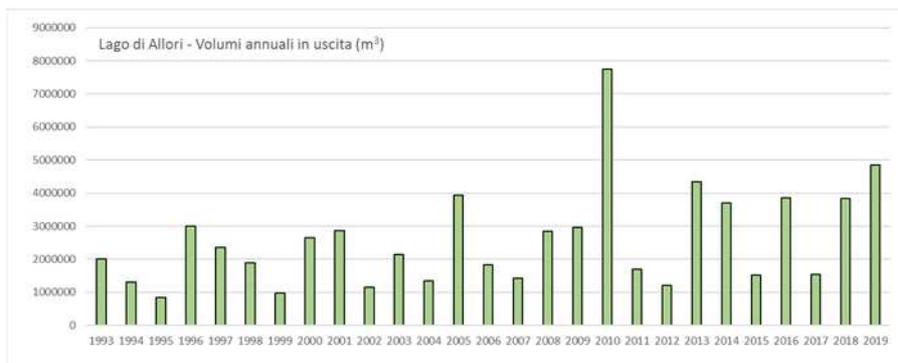


Figura 82 – Lago di Allori. Volumi totali annuali in uscita (al Castelnuovo, rilasciati ed evaporati).

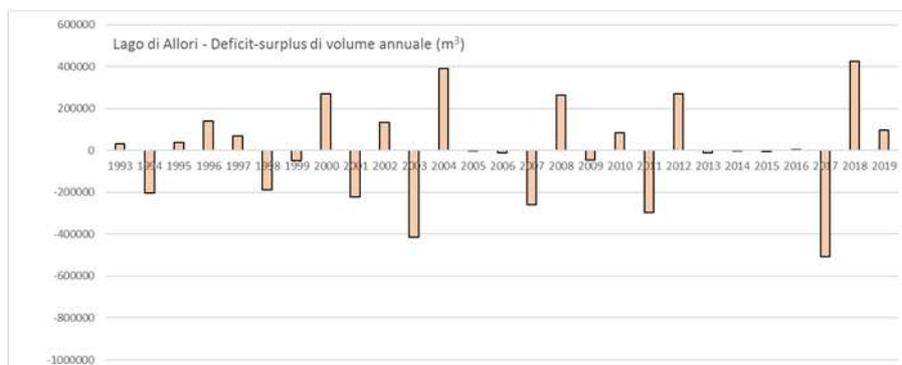


Figura 83 – Lago di Allori. Deficit e surplus annuali.

5.4 SCENARIO A - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Castelnuovo

5.4.1 Dati di input utilizzati

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Castelnuovo utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago 136.40 m s.l.m.
- quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta) 146.0 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta 1 260 000 m²
- volume alla quota di massima ritenuta 12 102 000 m³
- superficie bacino imbrifero 21 km²

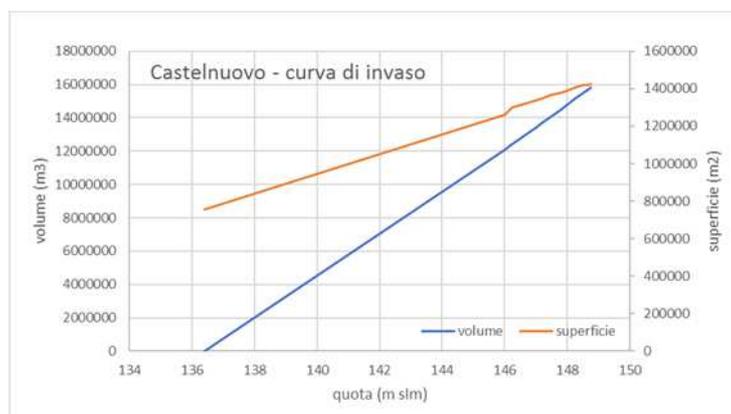


Figura 84 – Lago di Castelnuovo: curva di invaso.

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- **nessuna immissione dal lago di Allori;**
- rilascio di una portata minima di DMV pari a 12 l/s tramite un'opera di derivazione con soglia di presa a quota 145.15 m s.l.m. Al di sotto di tale quota non vi è rilascio;
- nell'ipotesi che il livello del lago superi la quota di massima ritenuta (146 m s.l.m.) il volume in eccesso sarà scaricato mediante opportuna opera di rilascio la cui curva di deflusso è riportata in Figura 85.



Figura 85 –Lago di Castelnuovo: scala di deflusso.

- prelievo di una portata costante pari a 11.6 l/s (1000 m³/giorno) secondo richiesta del Comune di Cavriglia.

L'applicazione del modello termo-idrologico è stata effettuata per il lago di Castelnuovo utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare, precipitazioni e velocità del vento) presentate al paragrafo 3.2.3.

La modellazione matematica è stata effettuata dal 1° settembre 1992 al 31 dicembre 2019.

5.4.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idraulico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le grandezze più significative. In particolare, la Figura 86 che mostra l'andamento della temperatura nel periodo simulato, evidenzia un buon riscontro con le misure delle campagne più recenti (punti rossi).

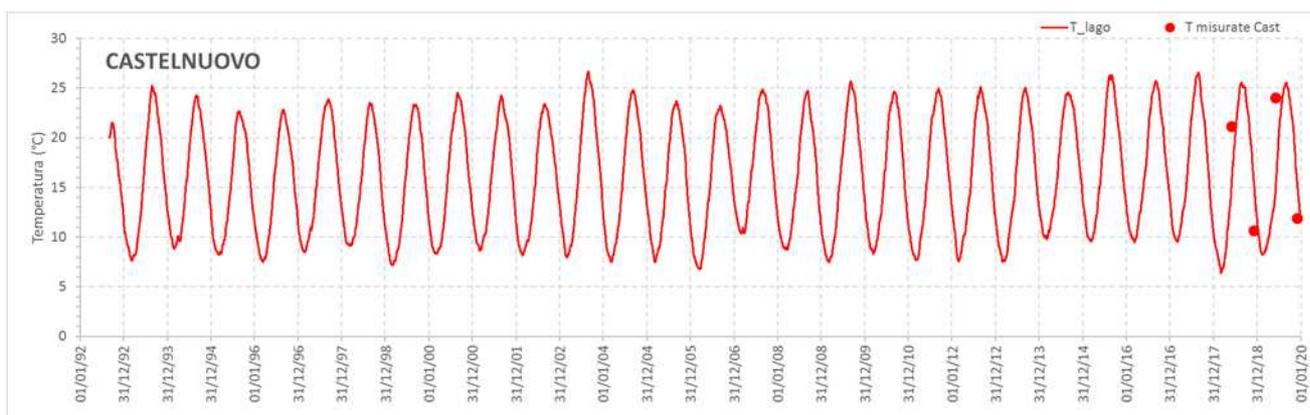


Figura 86 – Temperatura dell'acqua nel lago di Castelnuovo.

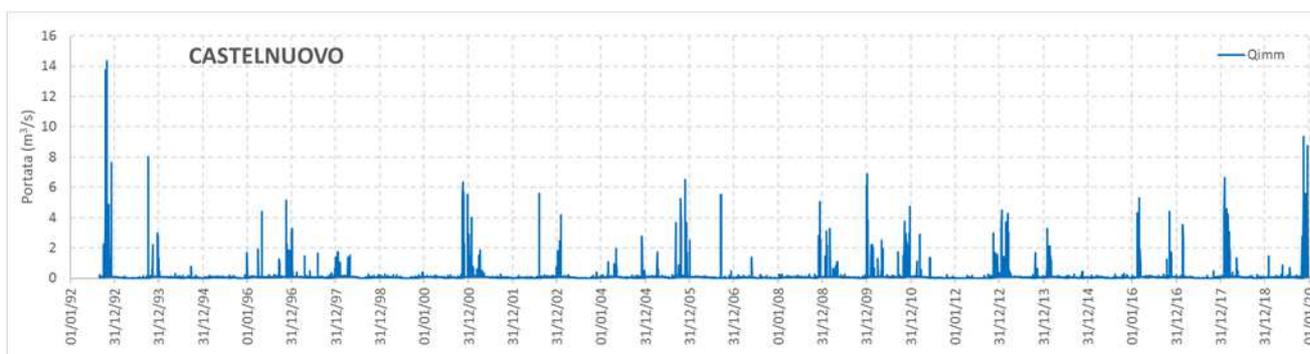


Figura 87 – Portata naturale in ingresso nel lago di Castelnuovo.

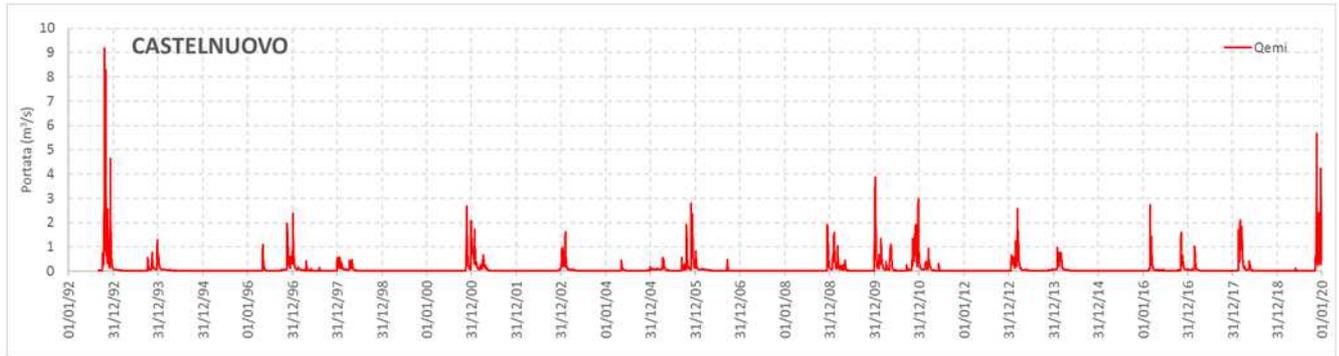


Figura 88 – Portata rilasciata per DMV o per superamento soglie.

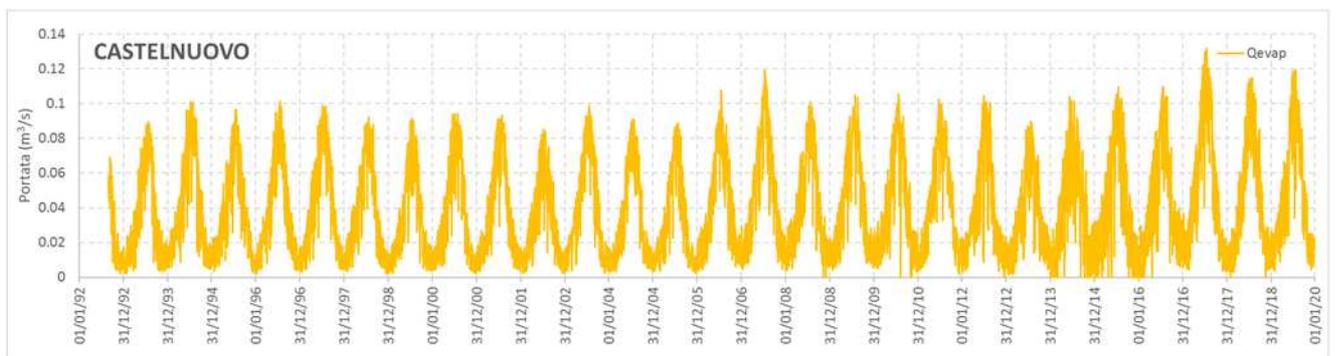


Figura 89 – Portata di evaporazione.

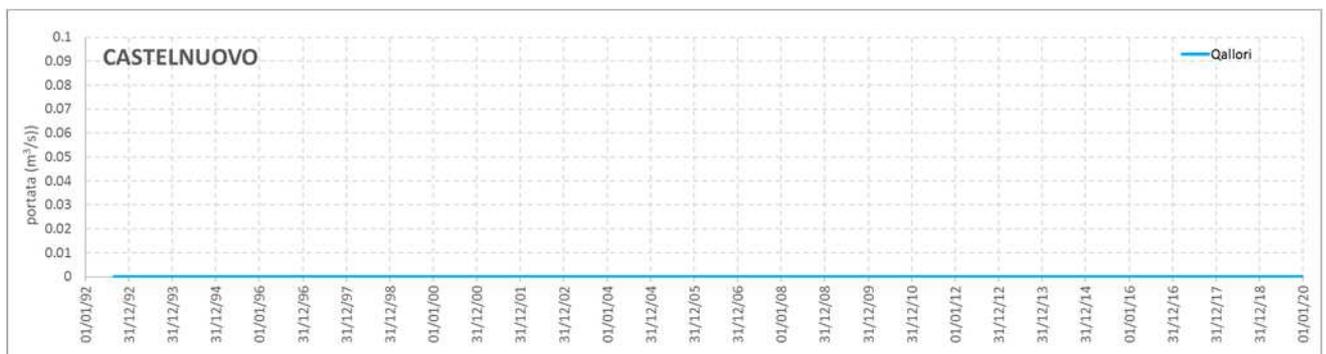


Figura 90 – Portata dal lago di Allori.

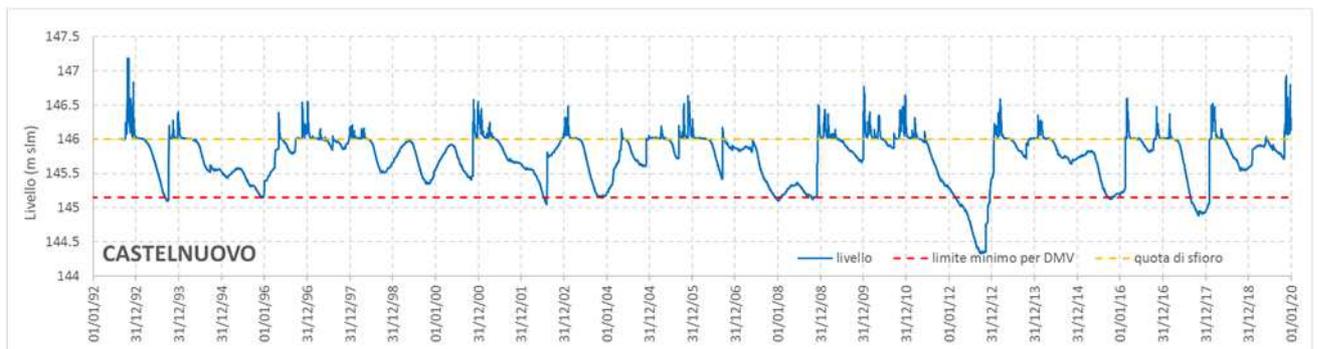


Figura 91 – Livello nel lago di Castelnuovo con indicazioni relative alla quota minima per rilascio del DMV (145.15 m slm) e della soglia di tracimazione (146 m slm).

L'analisi della Figura 91 evidenzia che durante il lasso temporale considerato 1992 - 2019 il rilascio del DMV non sarebbe stato possibile per un totale di 647 giorni nei seguenti periodi:

- dal 8/9/1993 al 7/10/1993 (30 giorni consecutivi)
- dal 10/12/1995 al 12/12/1995 (3 giorni consecutivi)
- dal 13/7/2002 al 9/8/2002 (28 giorni consecutivi)
- dal 17/11/2003 al 25/11/2003 (9 giorni consecutivi)
- dal 14/12/2007 al 2/2/2008 (51 giorni consecutivi)
- dal 17/10/2008 al 23/11/2008 (38 giorni consecutivi)
- dal 27/2/2012 al 16/12/2012 (294 giorni consecutivi)
- dal 26/9/2015 al 28/10/2015 (33 giorni consecutivi)
- dal 26/8/2017 al 1/2/2018 (161 giorni consecutivi)

Come già osservato per l'esito delle precedenti simulazioni del lago di Allori, gli anni 2012 e 2017 si confermano come più critici anche per il lago Castelnuovo; è in tali anni, infatti, che si presentano i periodi più prolungati durante i quali si sarebbe manifestata l'impossibilità di rilascio del DMV di 12 l/s qui ipotizzato.

Dalla Figura 92 alla Figura 98 sono riportate le medie mensili dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Castelnuovo per il periodo 1/1/1993 – 31/12/2019.

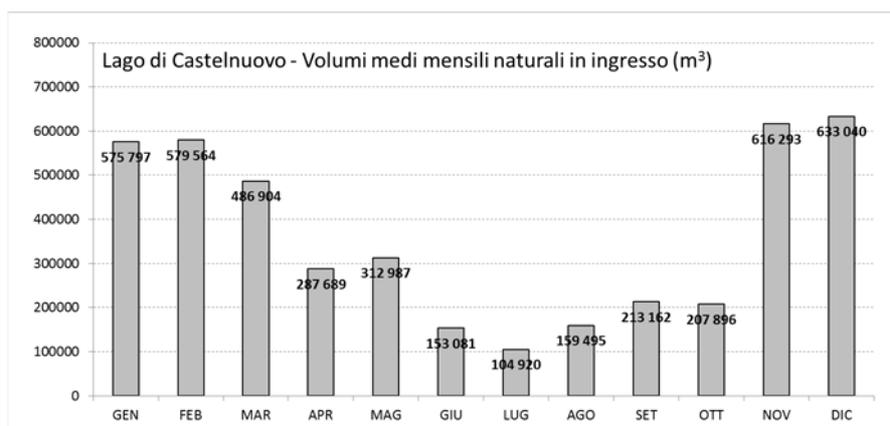


Figura 92 – Lago di Castelnuovo. Volumi naturali in ingresso medi mensili.



Figura 93 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili da Allori (nulli nell'ipotesi A in esame).

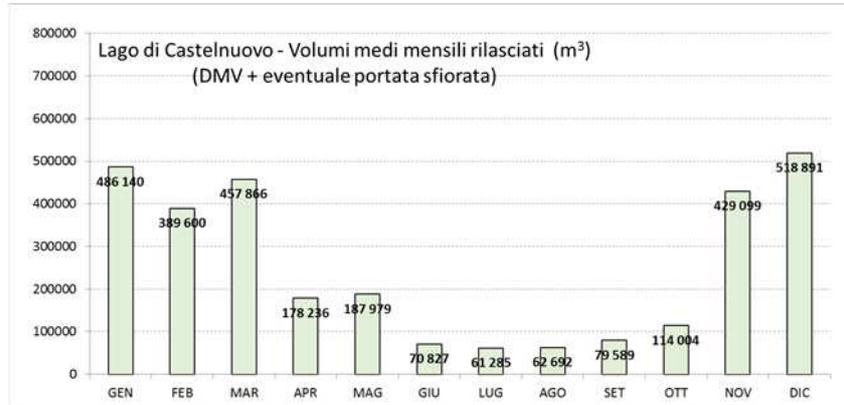


Figura 94 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili rilasciati.

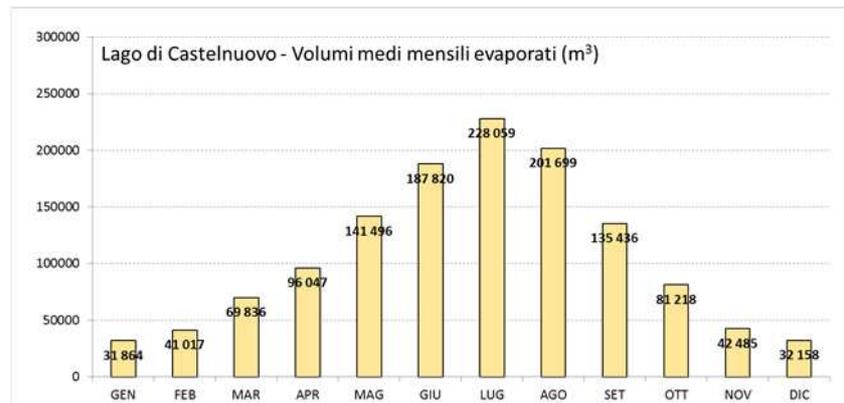


Figura 95 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili evaporati.

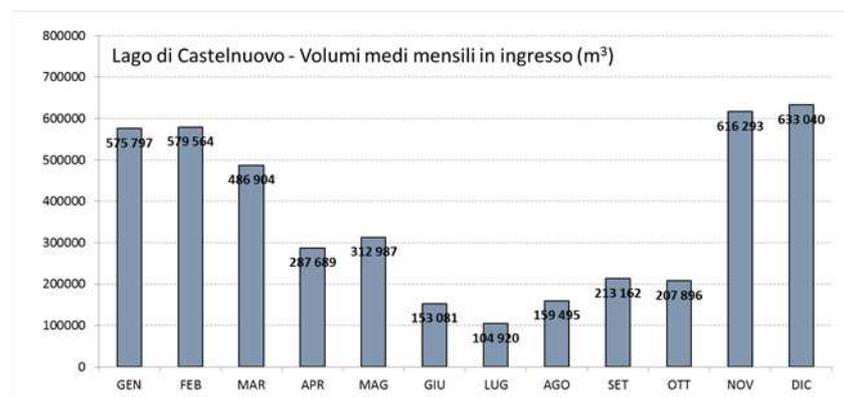


Figura 96 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili in ingresso (naturali + Allori).

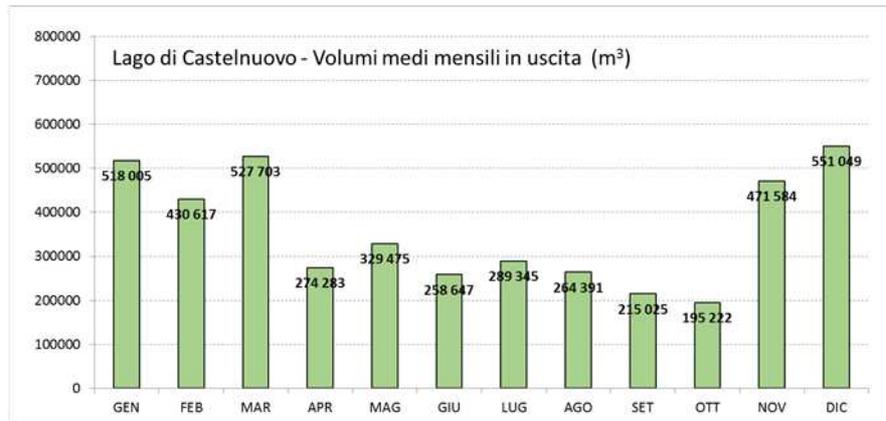


Figura 97 – Lago di Castelnuovo. Volumi totali medi mensili in uscita (rilasciati ed evaporati).

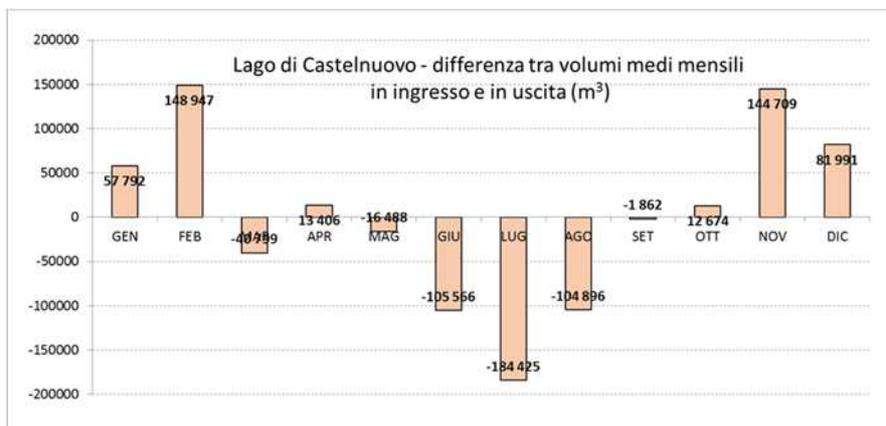


Figura 98 – Lago di Castelnuovo. Deficit e surplus medi mensili.

Dalla Figura 99 alla Figura 105 sono riportati i valori annuali dei volumi d’acqua in ingresso e in uscita dal lago di Castelnuovo per gli anni dal 1993 al 2019.

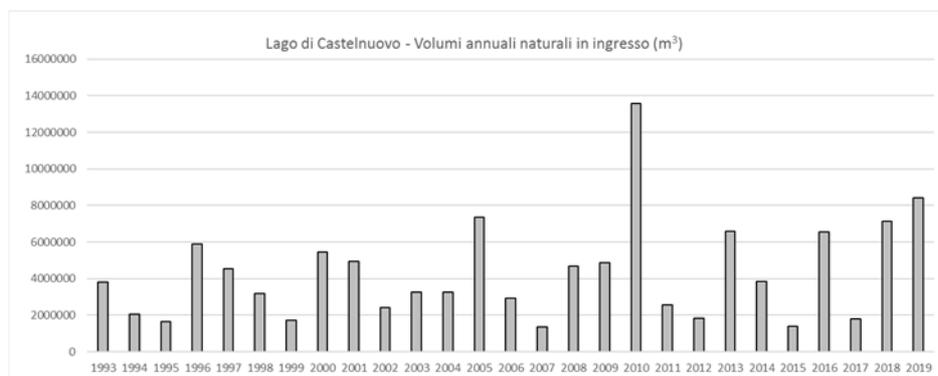


Figura 99 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali naturali in ingresso.

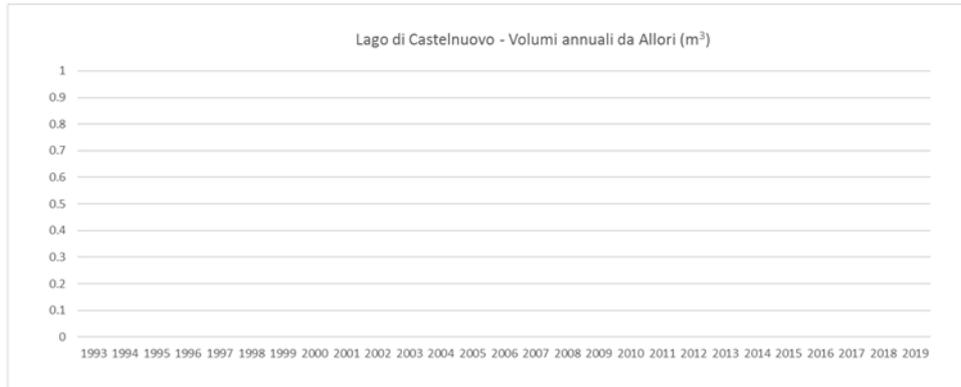


Figura 100 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali da Allori (nulli nell’ipotesi A in esame).

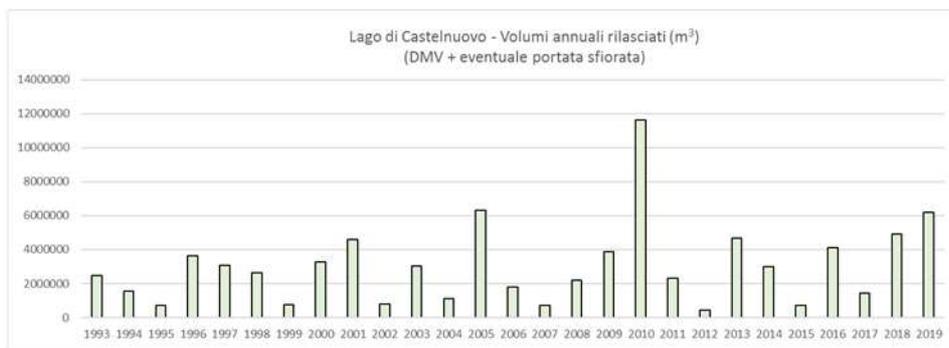


Figura 101 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali rilasciati.

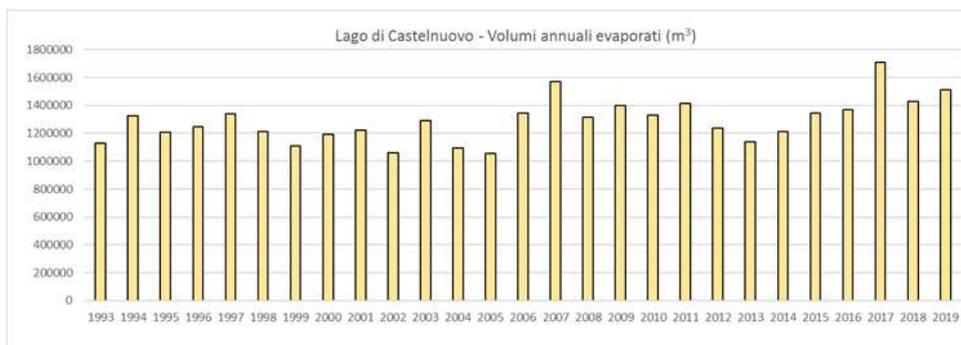


Figura 102 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali evaporati.

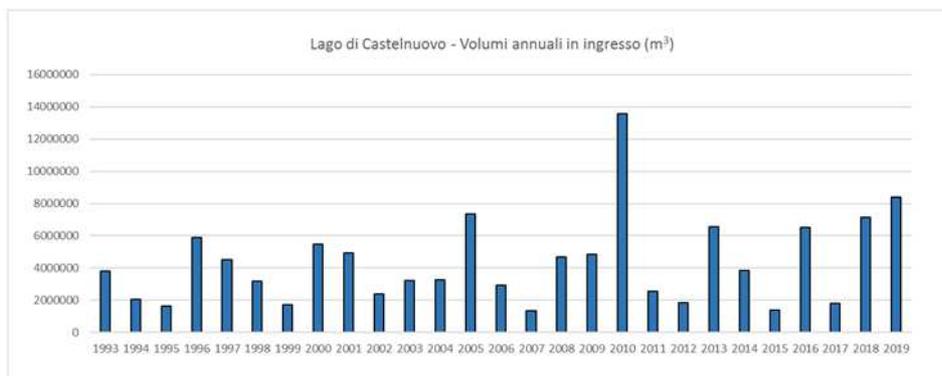


Figura 103 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali in ingresso (naturali + Allori).

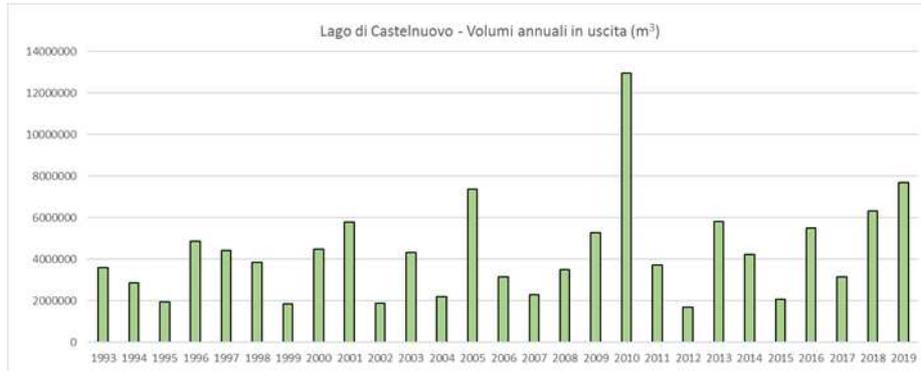


Figura 104 – Lago di Castelnuovo. Volumi totali annuali in uscita (rilasciati ed evaporati).

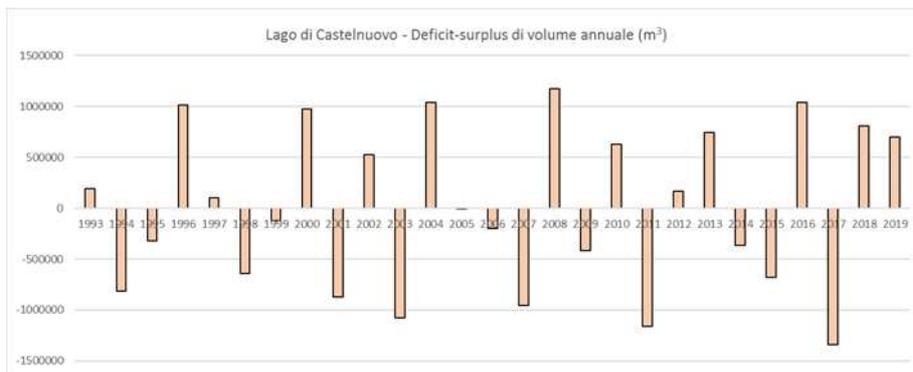


Figura 105 – Lago di Castelnuovo. Deficit e surplus annuali.

5.5 SCENARIO B - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Allori

5.5.1 Dati di input utilizzati

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Allori utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago 169.00 m s.l.m.
- quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta) 182.00 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta 530 470 m²
- volume alla quota di massima ritenuta 4 409 684 m³
- superficie bacino imbrifero 11.228 km²

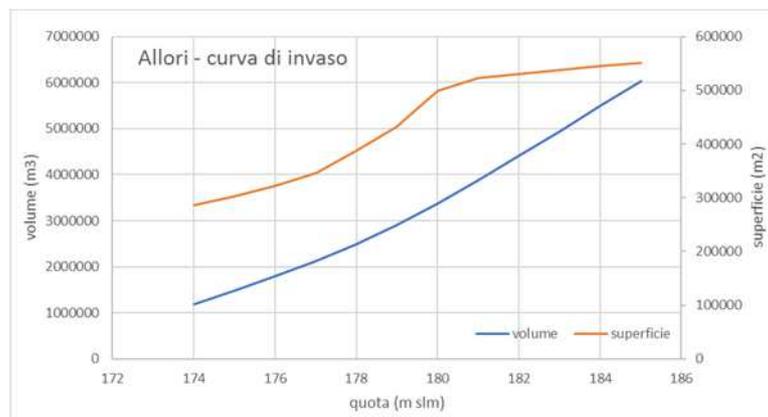


Figura 106 – Lago di Allori: curva di invaso.

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- **rilascio di 10 l/s verso il lago di Castelnuovo con soglia della presa a quota 181 m s.l.m. Al di sotto di tale soglia non vi è rilascio;**
- rilascio di una portata di DMV pari a 10 l/s tramite un'opera di derivazione con soglia della presa a quota 181 m s.l.m. Al di sotto di tale soglia non vi è rilascio;
- nell'ipotesi che il livello del lago superi la quota di massima ritenuta (182 m s.l.m) il volume in eccesso sarà scaricato mediante un'opera di rilascio secondo la legge di deflusso riportata in Figura 107.



Figura 107 – Lago di Allori: scala di deflusso.

L'applicazione del modello termo-idraulico è stata eseguita per il lago di Allori utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare e velocità del vento) e le precipitazioni trasformate presentate al paragrafo 3.2.2.

La modellazione matematica è stata effettuata dal 1° settembre 1992 al 31 dicembre 2019.

5.5.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idraulico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le grandezze più significative. In particolare, la Figura 108 che mostra l'andamento della temperatura nel periodo simulato, evidenzia un buon riscontro con le misure delle campagne più recenti (punti rossi).

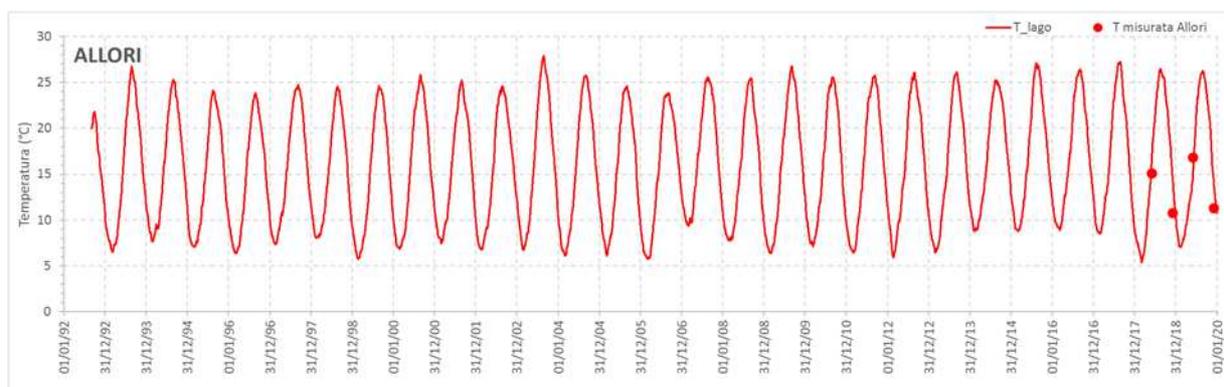


Figura 108 – Temperatura dell'acqua nel bacino di Allori.

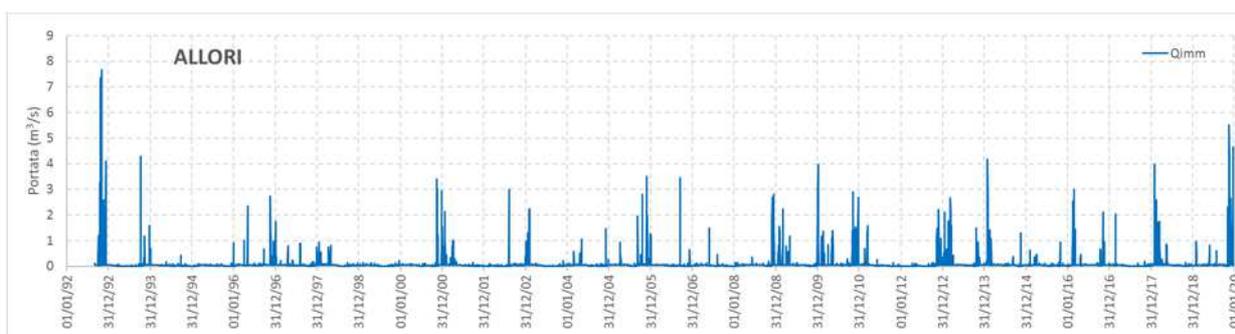


Figura 109 – Portata naturale in ingresso nel bacino di Allori.

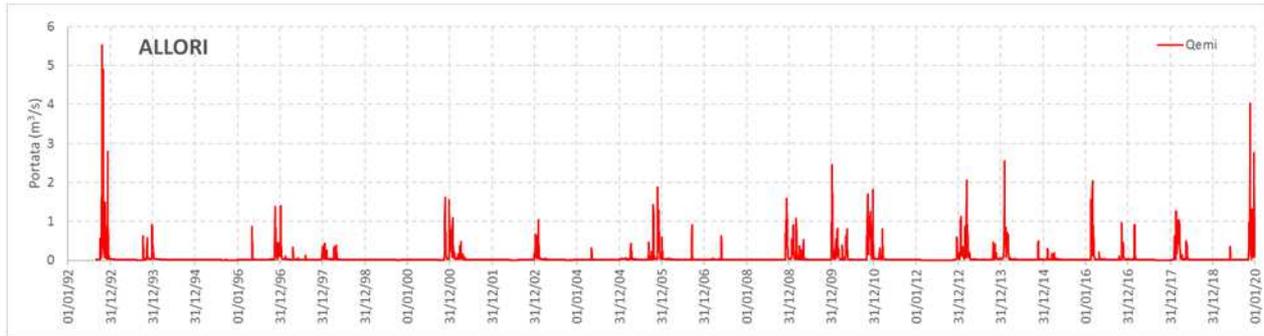


Figura 110 – Portata rilasciata per DMV o per superamento soglie.

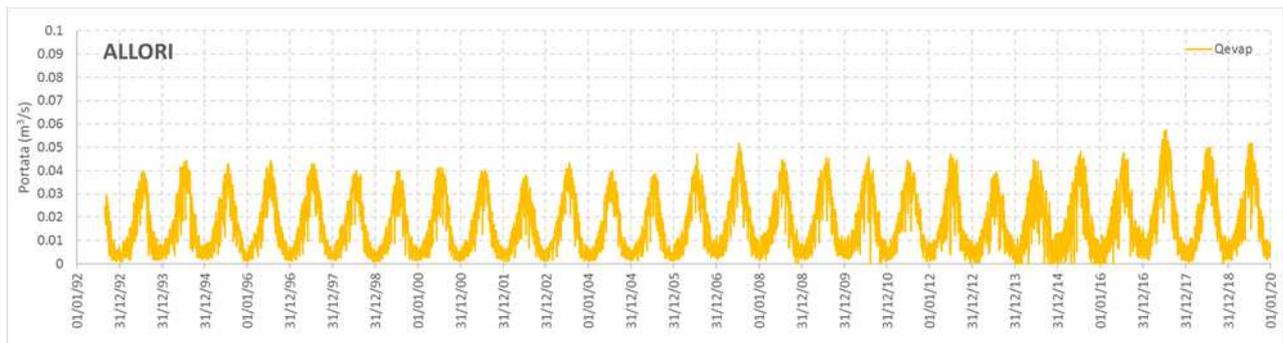


Figura 111 – Portata di evaporazione.

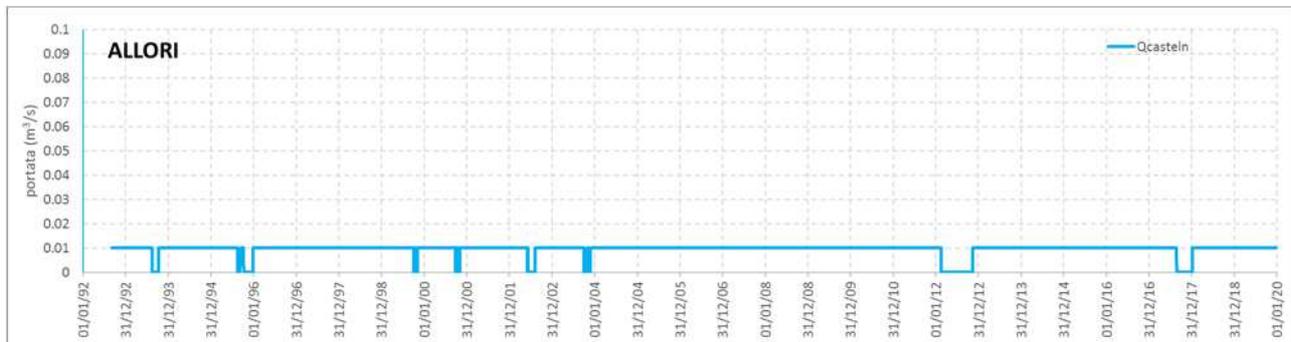


Figura 112 – Portata rilasciata verso il lago di Castelnuovo.

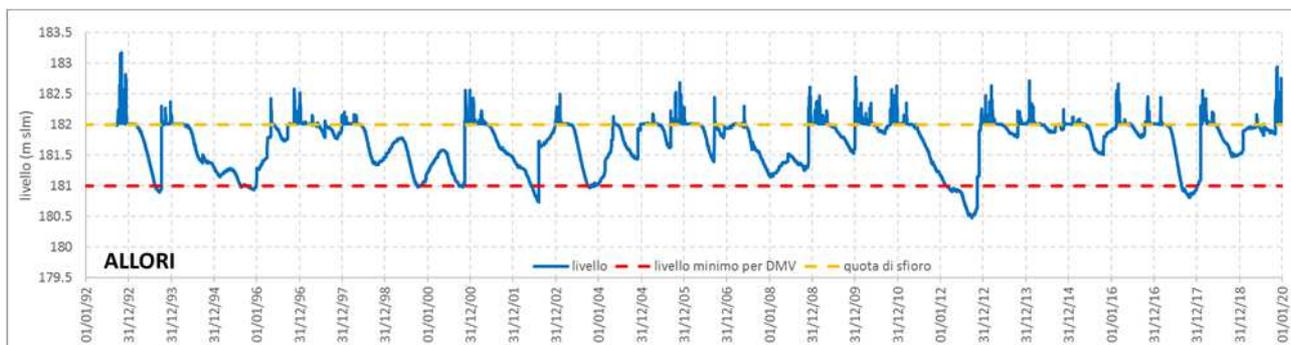


Figura 113 – Livello nel lago di Allori con indicazioni relative alla quota minima per rilascio del DMV e verso Castelnuovo (181 m slm) e della soglia di tracimazione (182 m slm).

L'analisi della Figura 113 evidenzia che durante il lasso temporale considerato 1992 - 2019 il rilascio del DMV non sarebbe stato possibile per un totale di 706 giorni così distribuiti (in periodi di almeno 2 giorni consecutivi):

dal 17/8/1993 al 7/10/1993 (52 giorni consecutivi)
 dal 17/8/1995 al 5/9/1995 (20 giorni consecutivi)
 dal 12/10/1995 al 26/12/1995 (76 giorni consecutivi)
 dal 5/10/1999 al 18/10/1999 (14 giorni consecutivi)
 dal 28/10/1999 al 5/11/1999 (9 giorni consecutivi)
 dal 28/9/2000 al 6/10/2000 (9 giorni consecutivi)
 dal 13/10/2000 al 15/10/2000 (3 giorni consecutivi)
 dal 20/10/2000 al 2/11/2000 (14 giorni consecutivi)
 dal 12/6/2002 al 9/8/2002 (59 giorni consecutivi)
 dal 1/10/2003 al 29/10/2003 (29 giorni consecutivi)
 dal 6/11/2003 al 7/11/2003 (2 giorni consecutivi)
 dal 11/11/2003 al 25/11/2003 (15 giorni consecutivi)
 dal 16/2/2012 al 12/11/2012 (271 giorni consecutivi)
 dal 26/8/2017 al 5/1/2018 (133 giorni consecutivi)

a cui si aggiungono altri 51 giorni isolati non consecutivi variamente distribuiti nel periodo simulato.

Gli anni 2012 e 2017 si confermano come più critici anche per il lago Allori nell'ipotesi B; durante questi anni, infatti, si sarebbero presentati i periodi più prolungati caratterizzati dall'impossibilità di rilascio del DMV di 10 l/s qui ipotizzato.

Dalla Figura 114 alla Figura 119 sono riportate le medie mensili dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Allori per il periodo 1/1/1993 – 31/12/2019.

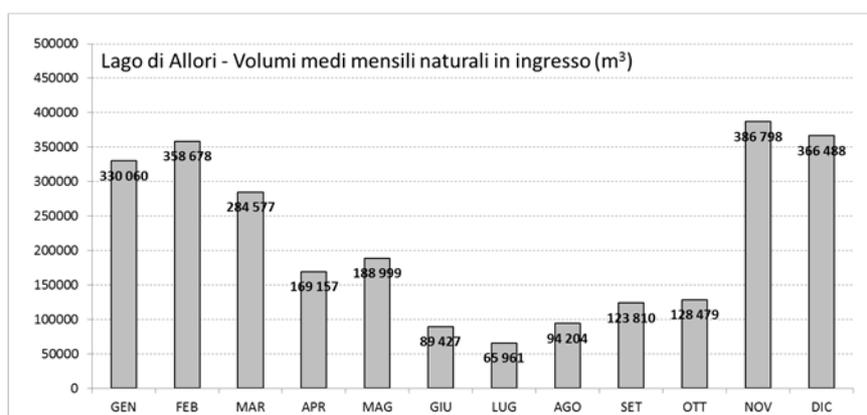


Figura 114 – Lago di Allori. Volumi naturali in ingresso medi mensili.

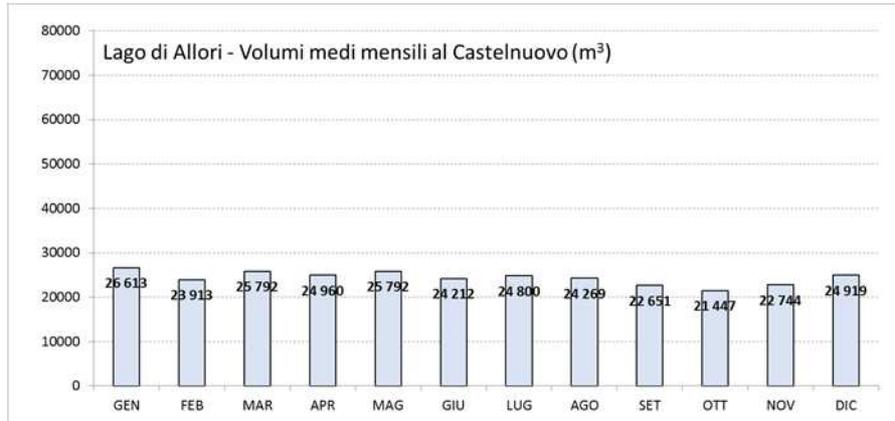


Figura 115 – Lago di Allori. Volumi medi mensili al Castelnovo.

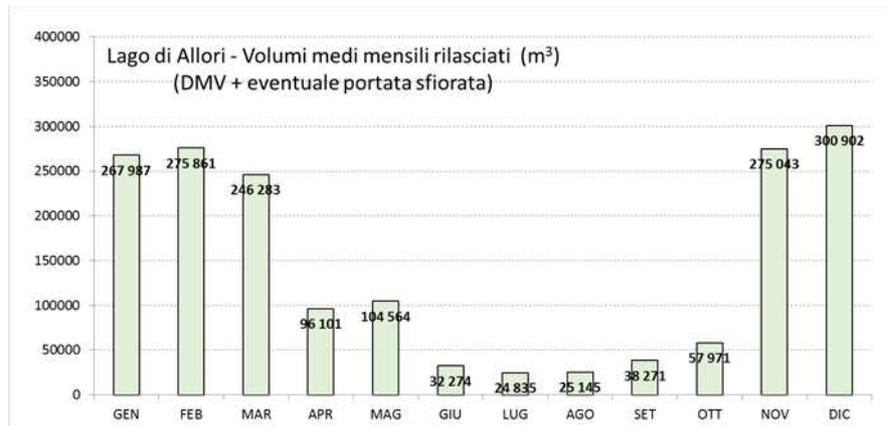


Figura 116 – Lago di Allori. Volumi medi mensili rilasciati.

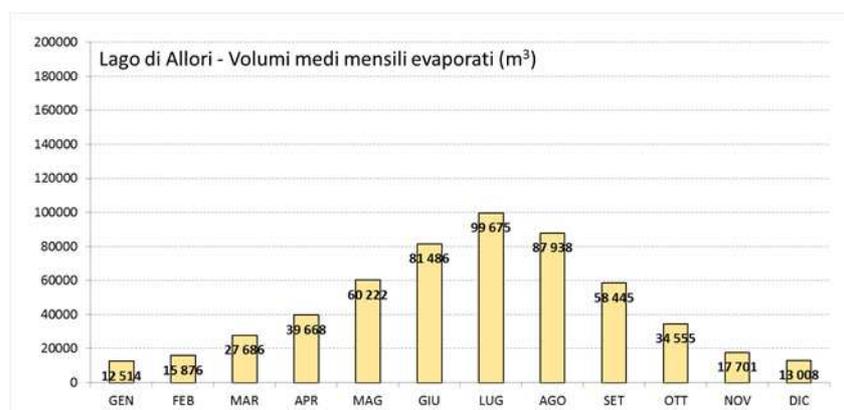


Figura 117 – Lago di Allori. Volumi medi mensili evaporati.

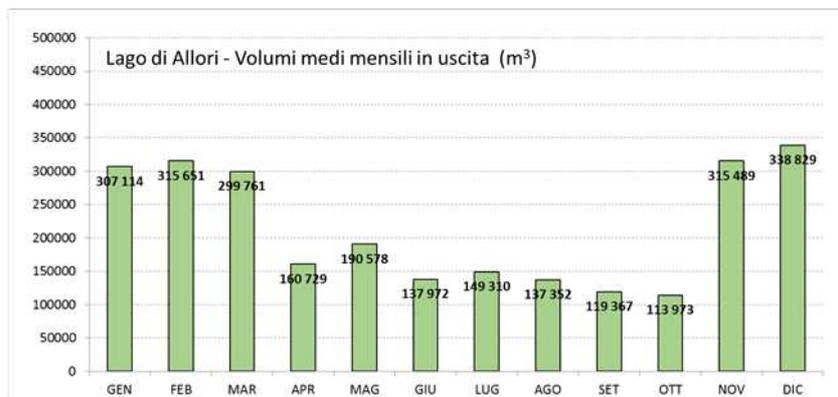


Figura 118 – Lago di Allori. Volumi totali medi mensili in uscita (al Castelnuovo, rilasciati ed evaporati).

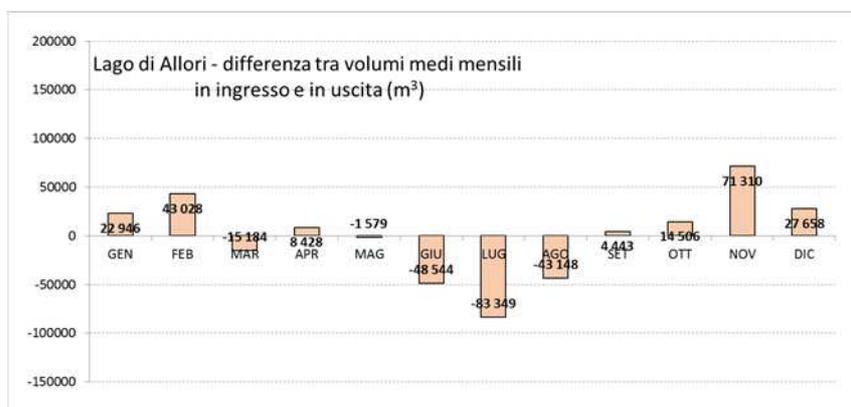


Figura 119 – Lago di Allori. Deficit e surplus medi mensili.

Il grafico di Figura 120 riporta le medie mensili delle portate scaricate per superamento della soglia (182 m slm).

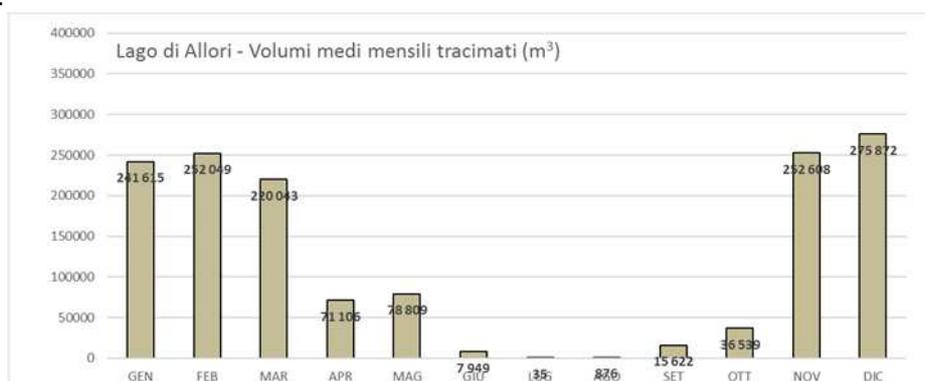


Figura 120 – Lago di Allori. Volumi medi mensili scaricati per superamento della soglia.

Dalla Figura 121 alla Figura 126 sono riportati i valori annuali dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Allori per gli anni dal 1993 al 2019.

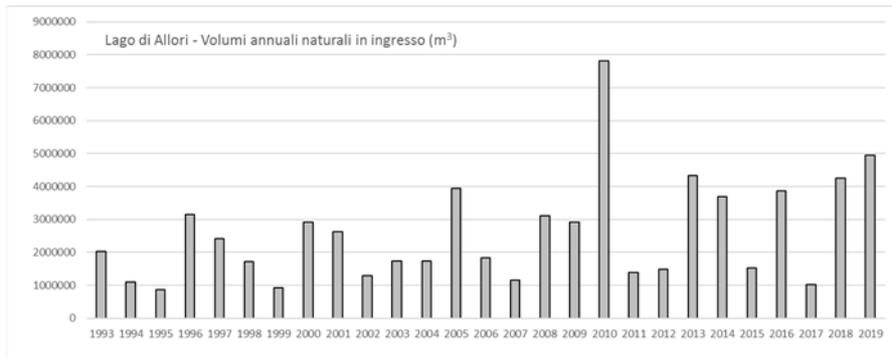


Figura 121 – Lago di Allori. Volumi annuali naturali in ingresso.

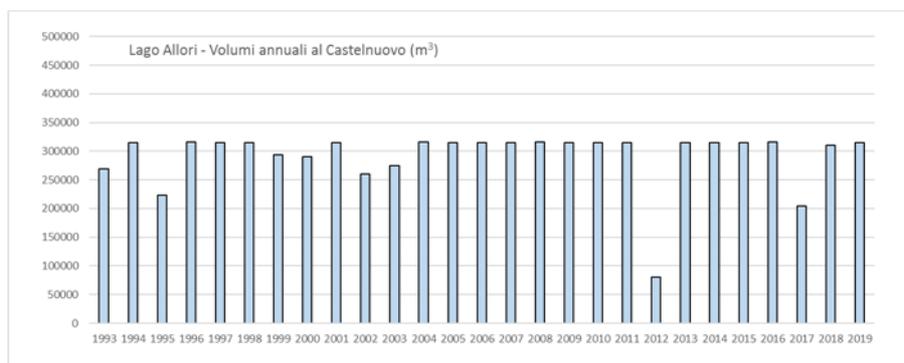


Figura 122 – Lago di Allori. Volumi annuali al Castelnovo.

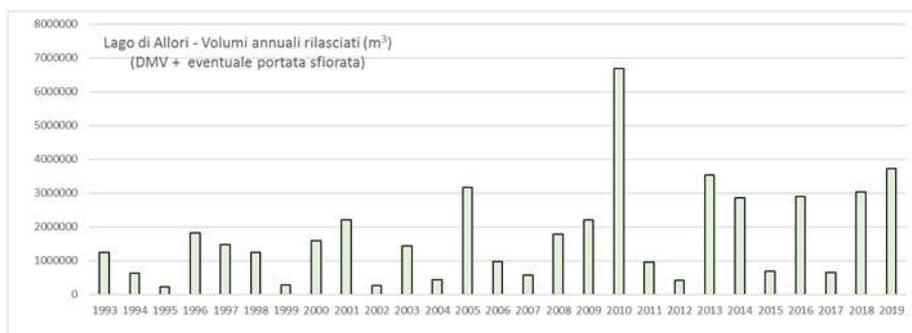


Figura 123 – Lago di Allori. Volumi annuali rilasciati.

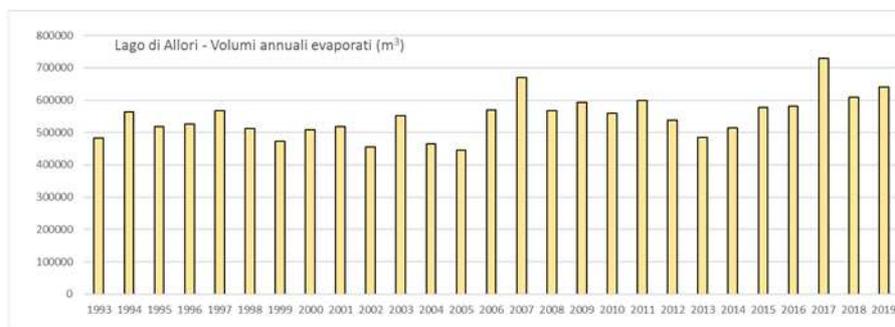


Figura 124 – Lago di Allori. Volumi annuali evaporati.

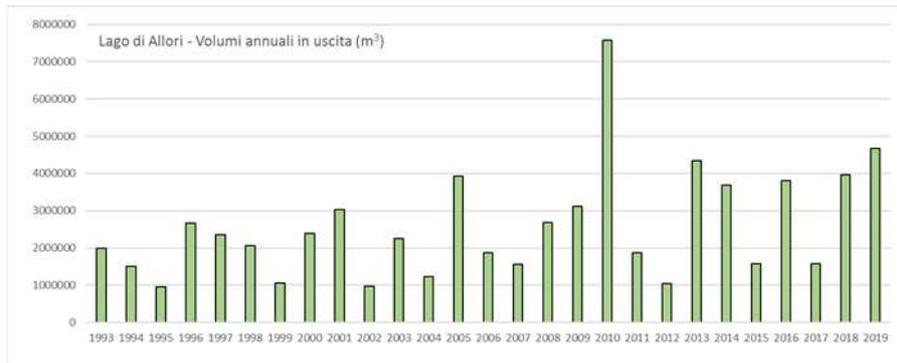


Figura 125 – Lago di Allori. Volumi totali annuali in uscita (al Castelnuovo, rilasciati ed evaporati).

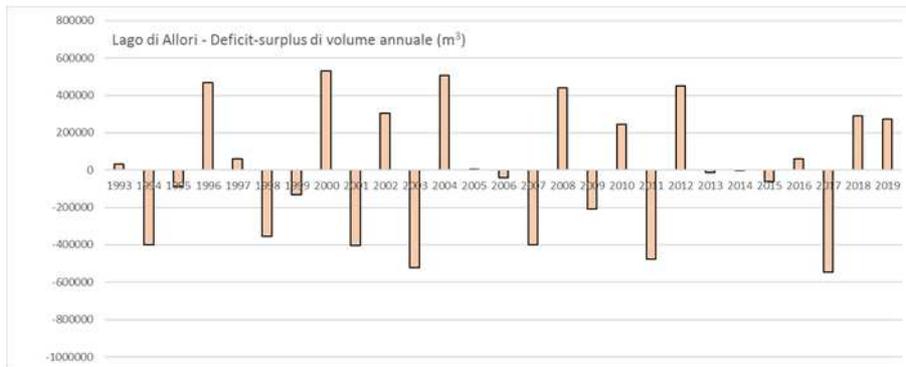


Figura 126 – Lago di Allori. Deficit e surplus annuali.

5.6 SCENARIO B - Modellazione del bilancio idrologico/idraulico del lago di Castelnuovo

5.6.1 Dati di input utilizzati

Come già specificato, le caratteristiche geometriche principali del lago di Castelnuovo utilizzate per la modellazione sono le seguenti:

- fondo del lago 136.40 m s.l.m.
- quota della soglia all'imbocco dell'emissario (massima ritenuta) 146.0 m s.l.m.
- superficie alla quota di massima ritenuta 1 260 000 m²
- volume alla quota di massima ritenuta 12 102 000 m³
- superficie bacino imbrifero 21 km²

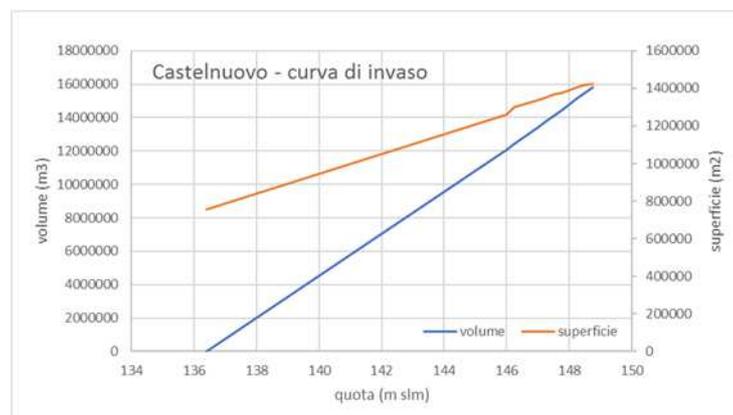


Figura 127 – Lago di Castelnuovo: curva di invaso.

Sono state inoltre ipotizzate le seguenti ulteriori condizioni al contorno:

- **collegamento con lago di Allori da cui riceve, se disponibili, 10 l/s;**
- rilascio di una portata minima pari a 12 l/s tramite un'opera di derivazione con soglia di presa a quota 145.15 m s.l.m. Al di sotto di tale quota non vi è rilascio;
- nell'ipotesi che il livello del lago superi la quota di massima ritenuta (146 m s.l.m.) il volume in eccesso sarà scaricato mediante opportuna opera di rilascio la cui curva di deflusso è riportata in Figura 128.



Figura 128 –Lago di Castelnuovo: scala di deflusso.

- prelievo di una portata costante pari a 11.6 l/s (1000 m³/giorno) secondo richiesta del Comune di Cavriglia.

L'applicazione del modello termo-idrologico è stata effettuata per il lago di Castelnuovo utilizzando come dati di input le grandezze meteorologiche (temperatura dell'aria, umidità relativa, irraggiamento solare, precipitazioni e velocità del vento) presentate al paragrafo 3.2.3.

La modellazione matematica è stata effettuata dal 1° settembre 1992 al 31 dicembre 2019.

5.6.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico termo-idraulico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di temperatura, dell'evaporazione e dell'evoluzione dei livelli nelle condizioni ipotizzate.

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per le grandezze più significative. In particolare, la Figura 129 che mostra l'andamento della temperatura nel periodo simulato, evidenzia un buon riscontro con le misure delle campagne più recenti (punti rossi).

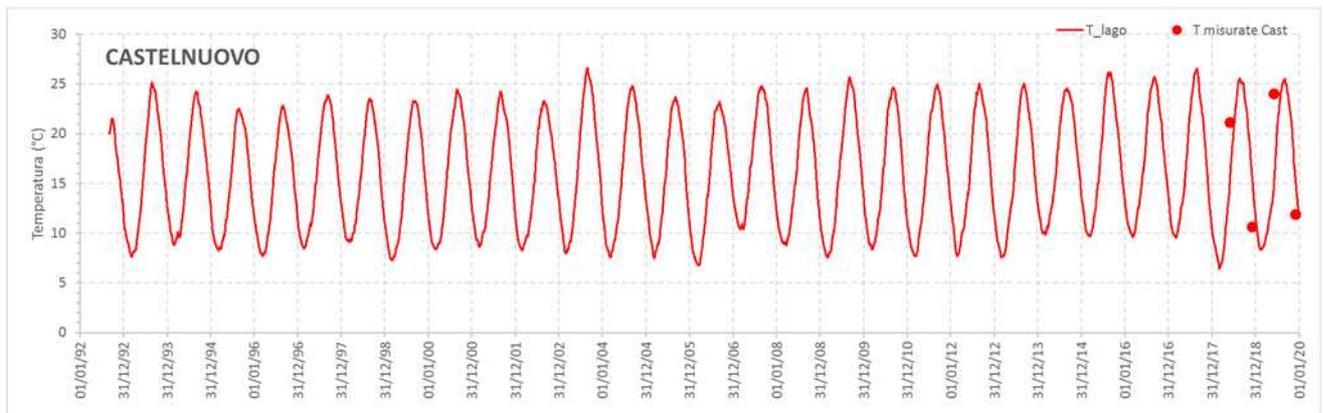


Figura 129 – Temperatura dell'acqua nel lago di Castelnuovo.

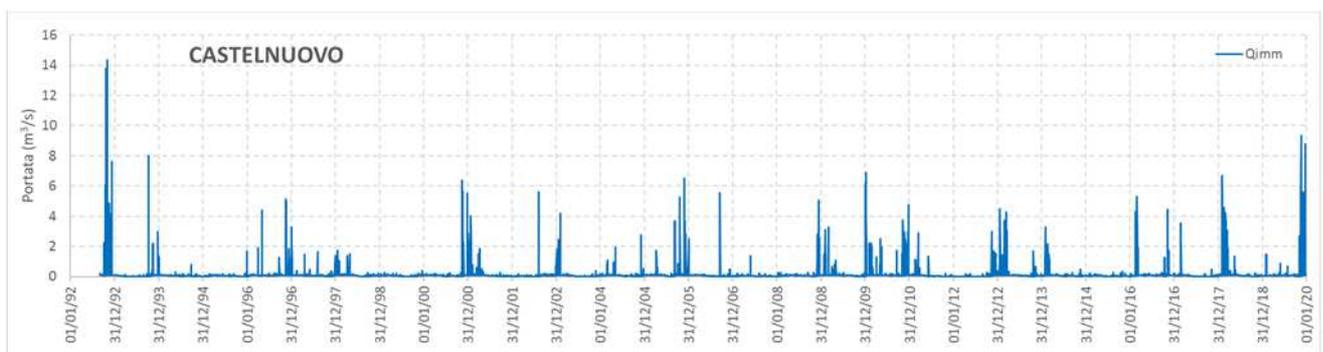


Figura 130 – Portata naturale in ingresso nel lago di Castelnuovo.

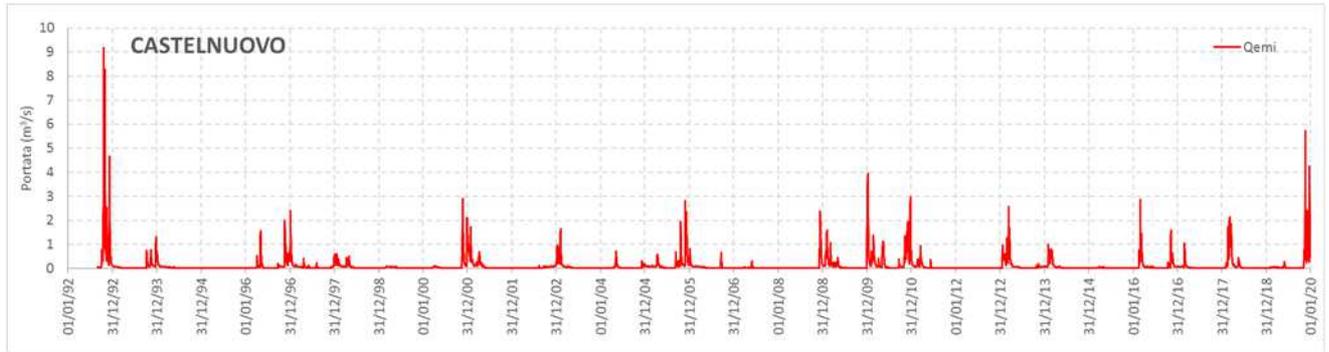


Figura 131 – Portata rilasciata per DMV o per superamento soglie.

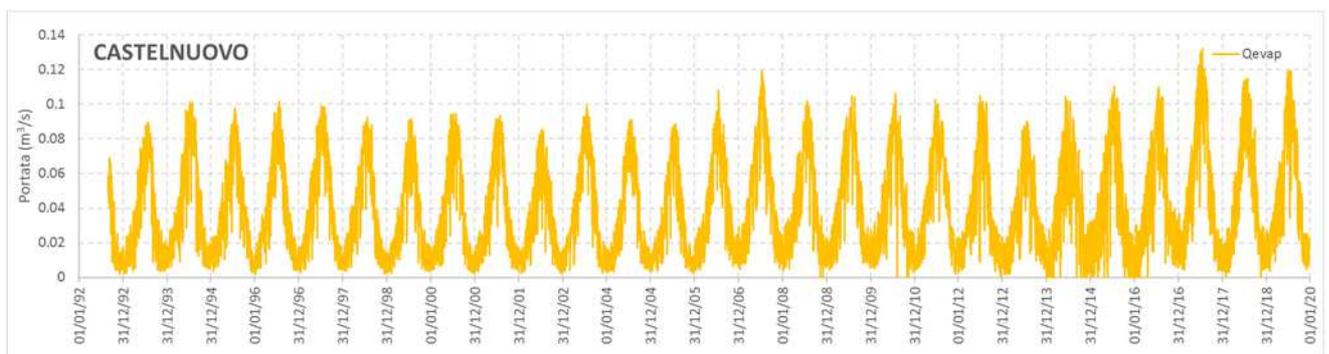


Figura 132 – Portata di evaporazione.

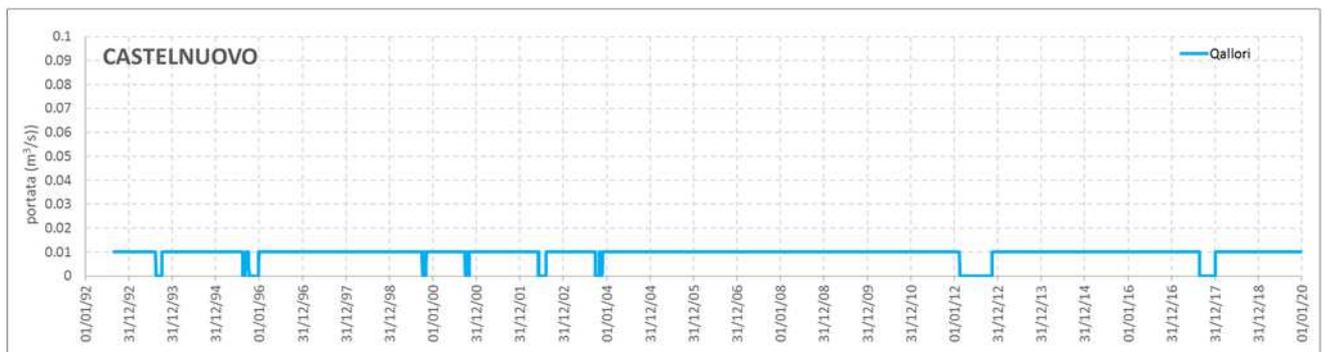


Figura 133 – Portata da lago di Allori.

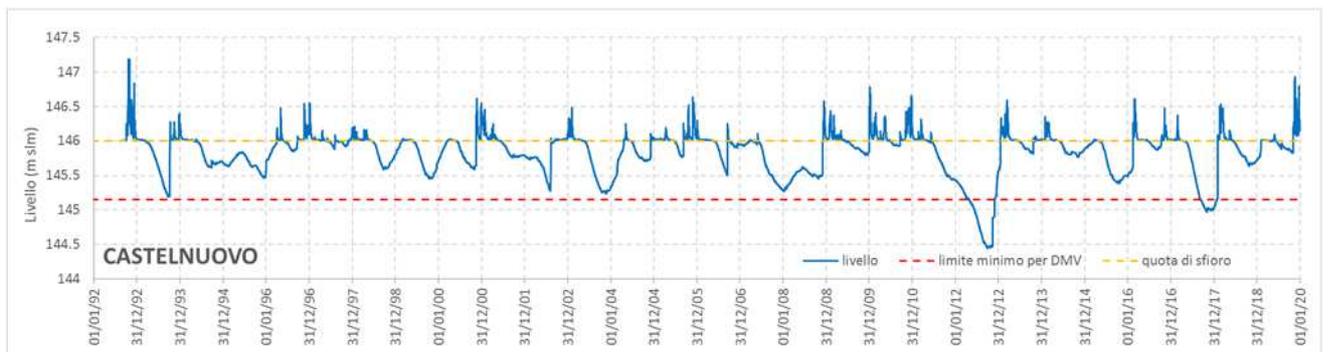


Figura 134 – Livello nel lago di Castelnuovo con indicazioni relative alla quota minima per rilascio del DMV (145.15 m slm) e della soglia di tracimazione (146 m slm).

L'analisi della Figura 134 evidenzia che durante il periodo considerato 1992 - 2019 il rilascio del DMV non sarebbe stato possibile per un totale di 356 giorni distribuiti negli anni 2012 e 2017 che si confermano i più critici:

- dal 28/4/2012 al 29/11/2012 (216 giorni consecutivi)
- dal 8/9/2017 al 10/9/2017 (3 giorni consecutivi)
- dal 13/9/2017 al 27/1/2018 (137 giorni consecutivi)

a cui si aggiungono altri 5 giorni non consecutivi variamente distribuiti nel periodo.

Dalla Figura 135 alla Figura 141 sono riportate le medie mensili dei volumi d'acqua in ingresso e in uscita dal lago di Castelnuovo per il periodo 1/1/1993 – 31/12/2019.

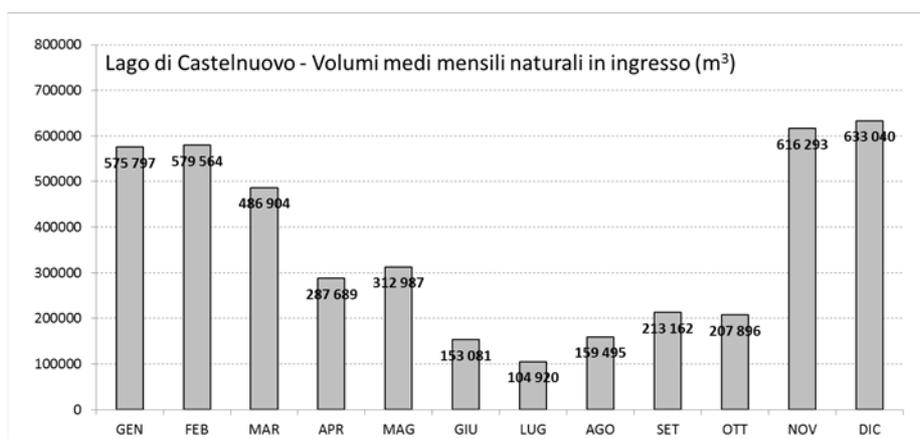


Figura 135 – Lago di Castelnuovo. Volumi naturali in ingresso medi mensili.

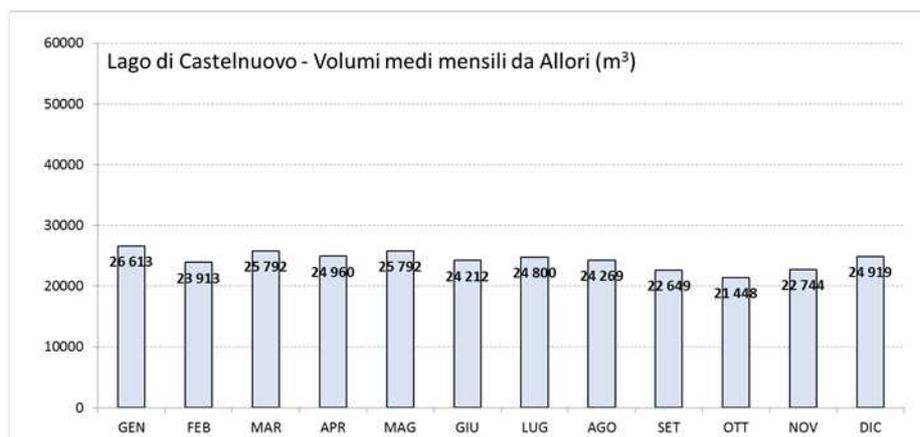


Figura 136 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili da Allori.

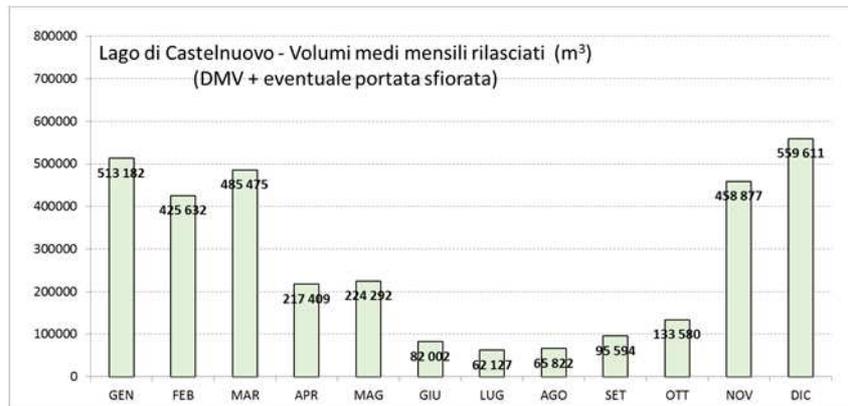


Figura 137 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili rilasciati.

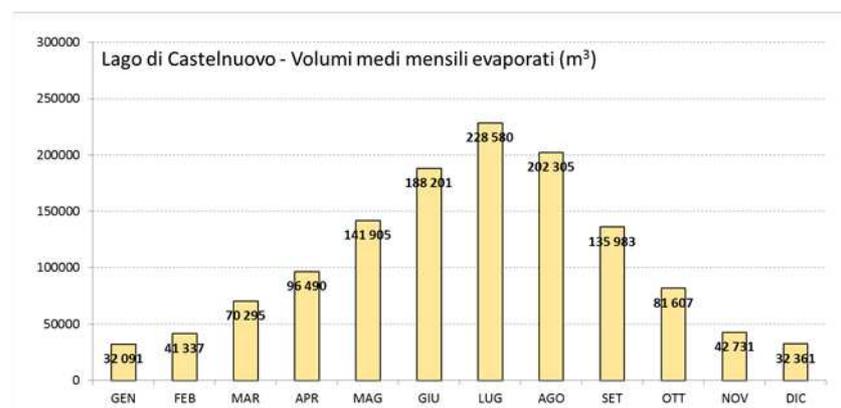


Figura 138 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili evaporati.

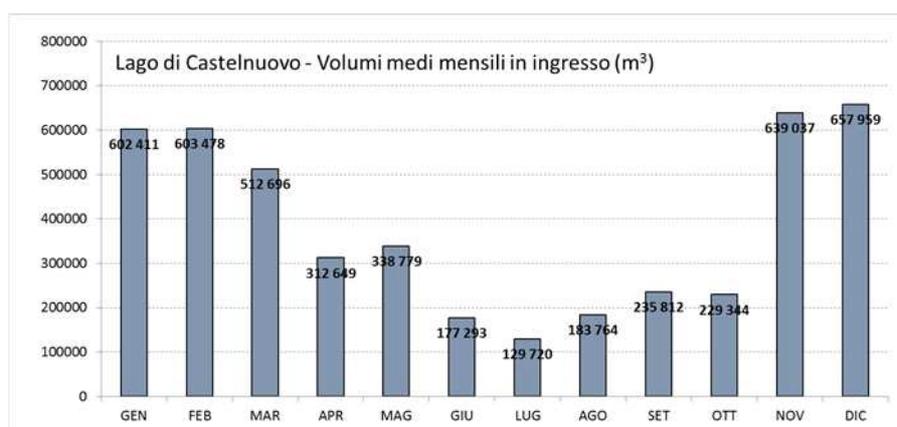


Figura 139 – Lago di Castelnuovo. Volumi medi mensili in ingresso (naturali + Allori).

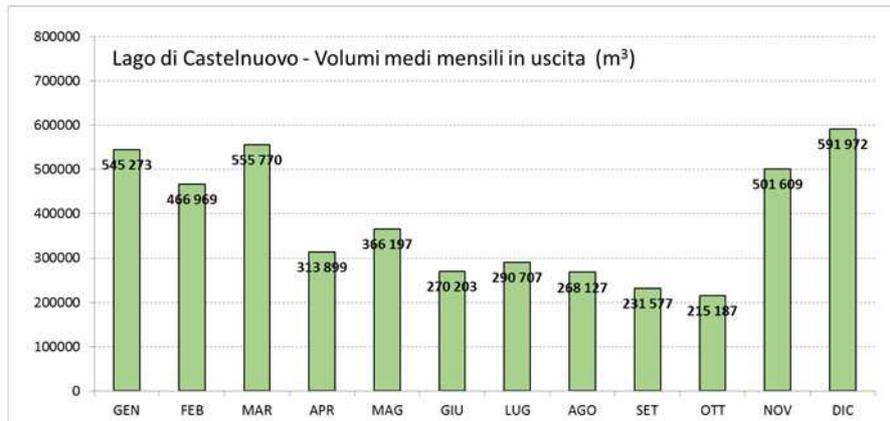


Figura 140 – Lago di Castelnuovo. Volumi totali medi mensili in uscita (rilasciati ed evaporati).

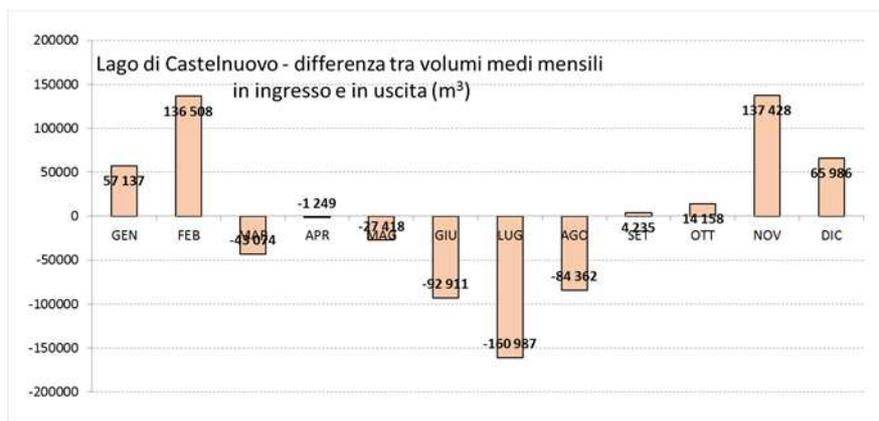


Figura 141 – Lago di Castelnuovo. Deficit e surplus medi mensili.

Dalla Figura 142 alla Figura 148 sono riportati i valori annuali dei volumi d’acqua in ingresso e in uscita dal lago di Castelnuovo per gli anni dal 1993 al 2019.

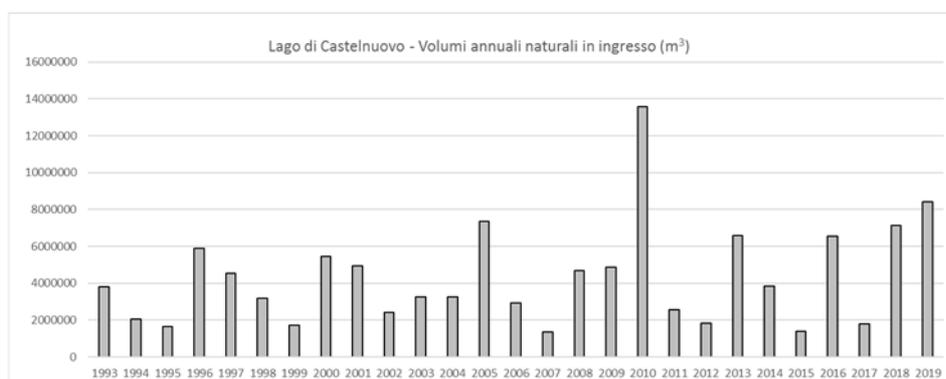


Figura 142 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali naturali in ingresso.

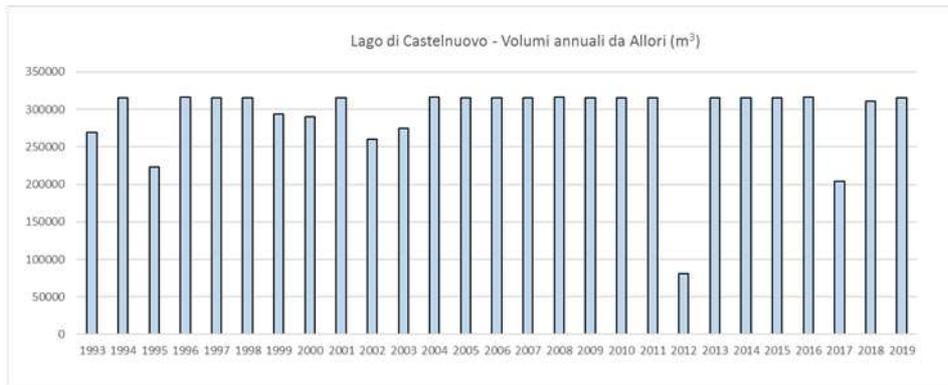


Figura 143 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali da Allori.

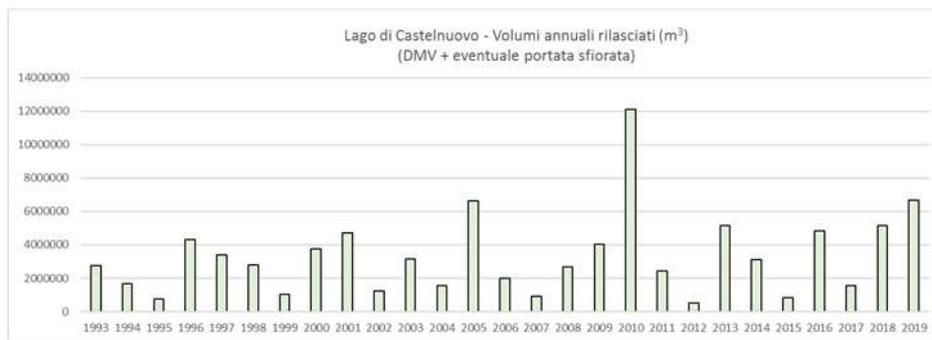


Figura 144 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali rilasciati.

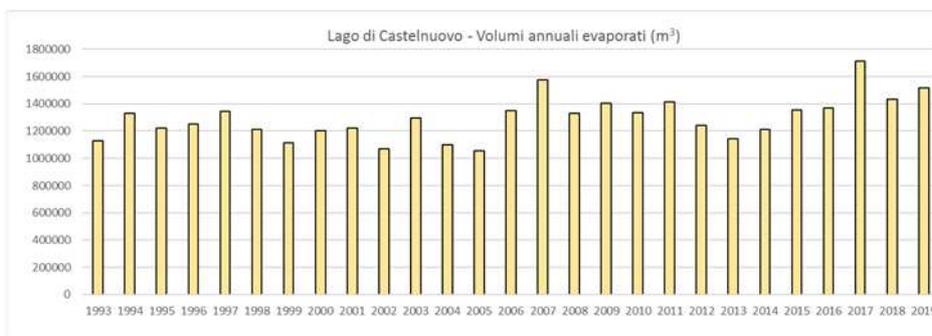


Figura 145 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali evaporati.

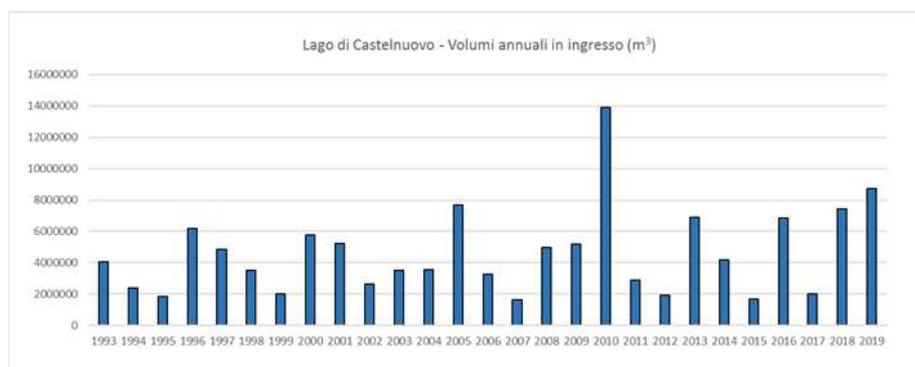


Figura 146 – Lago di Castelnuovo. Volumi annuali in ingresso (naturali + Allori).

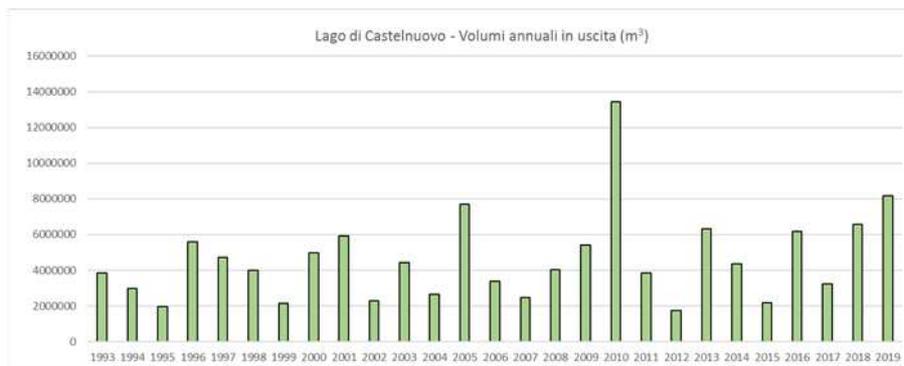


Figura 147 – Lago di Castelnuovo. Volumi totali annuali in uscita (rilasciati ed evaporati).

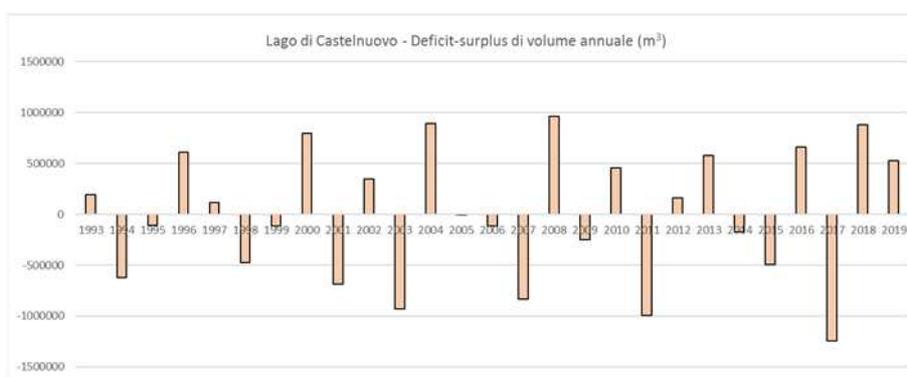


Figura 148 – Lago di Castelnuovo. Deficit e surplus annuali.

5.7 Considerazioni conclusive

Considerando come obiettivo primario di simulazione il rilascio del DMV, per il Lago di San Cipriano non si individuano problemi di sorta, anche grazie alla riduzione dei fabbisogni idrici della centrale.

Per quanto concerne, invece, il sistema Allori/Castelnuovo i due scenari analizzati mettono in evidenza la necessità di una ulteriore ottimizzazione del sistema di collegamento idraulico tra i due laghi sia per assicurare il rilascio continuo del DMV, sia per il soddisfacimento dei prelievi per il Comune di Cavriglia. Attraverso la modifica delle quote minime per il rilascio del DMV ed una diversa gestione dei contributi dall'Allori al Castelnuovo si ritiene possibile minimizzare i deficit di DMV riconducendoli alle sole stagioni più siccitose.

6 VALUTAZIONE DEL TEMPO DI RICAMBIO DEI TRE LAGHI

Le considerazioni idrologiche trattate nel capitolo precedente hanno consentito di valutare, con i dati del periodo in esame, i principali parametri idrologici dei tre laghi, tra i quali le portate in ingresso dai bacini imbriferi, le portate evaporate dalla superficie dei laghi e le portate rilasciate verso valle (sia naturalmente per superamento della quota di massima ritenuta, sia come deflussi durante l'anno verso il corpo idrico ricettore).

L'andamento di questi parametri ha permesso inoltre di stimare il tempo di ricambio dei tre laghi per gli anni per i quali è stata eseguita la modellazione.

Il tempo teorico di ricambio (o di residenza) di un lago è il tempo che impiega il corpo idrico emissario per far defluire un volume d'acqua pari a quello dell'invaso; ad esempio, il ricambio risulta rapido in quei laghi che hanno un piccolo volume e un emissario di grande portata. Il parametro rende conto della capacità dell'emissario di scaricare all'esterno del lago parte degli eventuali inquinanti che a esso giungono dal proprio bacino imbrifero tramite il corpo idrico immissario.

Il tempo teorico di ricambio delle acque di un lago si calcola dividendone il volume per il volume annuo rilasciato.

6.1 Valutazione del tempo di ricambio del lago di San Cipriano

La valutazione del tempo di ricambio per San Cipriano è stata calcolata tenendo conto del rilascio minimo garantito di 10 l/s e dalla portata utilizzata per il funzionamento della centrale.

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima regolazione (152.30 m s.l.m.), pari a 2 183 039 m³. I risultati sono presentati in TABELLA 14.

Come emerge dalla tabella il tempo di ricambio medio del periodo per il bacino di San Cipriano sarebbe stato abbastanza breve (6.6 mesi) grazie principalmente a due fattori: il primo riguarda il fatto che il bacino di San Cipriano non presenta volumi d'acqua molto elevati (poco più di 2 milioni di metri cubi alla quota di massimo utilizzo); il secondo fattore è relativo alle portate in uscita che si mantengono elevate e costanti durante tutto l'anno sia per soddisfare la condizione di rilascio di 10 l/s verso il corpo idrico ricettore, sia (principalmente) per il fabbisogno della centrale.

Le portate in uscita vengono in parte recuperate dalla portata in arrivo dall'Arno che quindi garantisce un buon ricircolo delle acque nel bacino. Peraltro, i fabbisogni della centrale sono sempre più ridotti e, di conseguenza, anche il sostegno legato al pompaggio dall'Arno risulta sempre meno strategico

TABELLA 14 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di S. Cipriano.

lago di S. CIPRIANO		
anno	Volume annuo scaricato (milione m³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	4.53	5.8
1994	2.80	9.3
1995	2.26	11.6
1996	4.95	5.3
1997	4.72	5.5
1998	4.33	6.0
1999	2.26	11.6
2000	5.17	5.1
2001	6.13	4.3
2002	2.88	9.1
2003	4.58	5.7
2004	2.82	9.3
2005	7.93	3.3
2006	3.03	8.6
2007	2.48	10.6
2008	4.53	5.8
2009	5.87	4.5
2010	12.17	2.2
2011	2.88	9.1
2012	2.39	11.0
2013	8.41	3.1
2014	6.67	3.9
2015	2.64	9.9
2016	7.42	3.5
2017	3.07	8.5
2018	7.33	3.6
2019	8.92	2.9
media	4.93	6.6

6.2 Valutazione del tempo di ricambio del lago di Allori

La valutazione del tempo di ricambio per il lago di Allori è stata calcolata tenendo conto del rilascio verso il corpo idrico ricettore e verso il lago di Castelnuovo nelle due ipotesi illustrate A (rilascio nullo) e B (rilascio di 10 l/s quando disponibili); è stato inoltre ipotizzato di non avere perdite per infiltrazione in quanto la tenuta idraulica del bacino è probabilmente garantita dalla bassa permeabilità dei terreni su cui si colloca il lago. In aggiunta, la situazione idraulica del sottosuolo nelle aree circostanti è caratterizzata da livelli piezometrici superiori alla quota di massima ritenuta del lago (182.00 m s.l.m.).

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima ritenuta, pari a 4409684 m³.

I risultati sono presentati in TABELLA 15 per l'ipotesi di SCENARIO A (nessun apporto da Allori a Castelnuovo) ed in TABELLA 16 per l'ipotesi di SCENARIO B (apporto di 10 l/s da Allori a Castelnuovo se il livello del lago di Allori è superiore a 181 m slm).

TABELLA 15 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di Allori per SCENARIO A.

lago di ALLORI		
anno	Volume annuo scaricato (milione m ³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	1.52	34.8
1994	0.74	71.5
1995	0.32	167.8
1996	2.47	21.4
1997	1.78	29.7
1998	1.39	38.1
1999	0.50	105.2
2000	2.14	24.7
2001	2.34	22.7
2002	0.69	76.2
2003	1.60	33.1
2004	0.88	60.4
2005	3.49	15.1
2006	1.27	41.7
2007	0.75	70.4
2008	2.28	23.2
2009	2.36	22.4
2010	7.18	7.4
2011	1.09	48.5
2012	0.68	78.3
2013	3.86	13.7
2014	3.18	16.7
2015	0.95	55.7
2016	3.28	16.1
2017	0.81	65.5
2018	3.22	16.4
2019	4.21	12.6
media	2.04	44.0

TABELLA 16 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di Allori per SCENARIO B.

lago di ALLORI		
anno	Volume annuo scaricato (milione m³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	1.52	34.8
1994	0.94	56.4
1995	0.45	118.6
1996	2.15	24.7
1997	1.79	29.5
1998	1.56	34.0
1999	0.59	90.1
2000	1.89	28.0
2001	2.52	21.0
2002	0.52	101.1
2003	1.71	31.0
2004	0.76	69.2
2005	3.49	15.2
2006	1.30	40.6
2007	0.90	59.1
2008	2.11	25.1
2009	2.53	20.9
2010	7.02	7.5
2011	1.27	41.6
2012	0.50	106.1
2013	3.86	13.7
2014	3.18	16.7
2015	1.01	52.5
2016	3.22	16.4
2017	0.85	62.3
2018	3.35	15.8
2019	4.04	13.1
media	2.04	42.4

Dall'analisi dei risultati sopra esposti si può ritenere che in condizioni medie sul periodo il lago di Allori avrebbe avuto un tempo di ricambio circa pari a 44 mesi per lo SCENARIO A e a 42.4 mesi nel caso dello SCENARIO B.

6.3 Valutazione del tempo di ricambio del lago di Castelnuovo

Le considerazioni sopra esposte sul calcolo del tempo di ricambio di un invaso sono state applicate anche al lago di Castelnuovo, per il quale è stato ipotizzato di non considerare le perdite per infiltrazione e neppure il volume assorbito dal terreno in quanto la tenuta idraulica dell'invaso è garantita dalla bassa permeabilità dei terreni di riempimento del cavo e dalla situazione idraulica del sottosuolo nelle aree circostanti, caratterizzata da livelli piezometrici superiori alla quota di massima ritenuta del lago.

Per il calcolo è stato utilizzato il volume alla quota di massima ritenuta (146.00 m s.l.m.), pari a 12102000 m³.

I risultati sono presentati in TABELLA 17 per l'ipotesi di SCENARIO A (nessun apporto da Allori a Castelnuovo) ed in TABELLA 18 per l'ipotesi di SCENARIO B (apporto di 10 l/s da Allori a Castelnuovo se il livello del lago di Allori è superiore a 181 m slm).

TABELLA 17 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di Castelnuovo per SCENARIO A.

lago di CASTELNUOVO		
anno	Volume annuo scaricato (milione m ³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	2.47	58.7
1994	1.55	93.7
1995	0.74	196.4
1996	3.62	40.1
1997	3.08	47.2
1998	2.63	55.3
1999	0.74	195.1
2000	3.30	44.0
2001	4.57	31.8
2002	0.81	179.4
2003	3.02	48.1
2004	1.11	130.7
2005	6.31	23.0
2006	1.79	81.2
2007	0.73	200.1
2008	2.18	66.6
2009	3.88	37.4
2010	11.62	12.5
2011	2.31	62.9
2012	0.44	329.8
2013	4.69	31.0
2014	3.01	48.2
2015	0.71	203.4
2016	4.13	35.2
2017	1.44	101.0
2018	4.90	29.6
2019	6.19	23.5
media	3.04	89.1

TABELLA 18 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di Castelnuovo nello SCENARIO B.

lago di CASTELNUOVO		
anno	Volume annuo scaricato (milione m³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	2.74	53.0
1994	1.67	87.1
1995	0.74	195.1
1996	4.33	33.6
1997	3.38	42.9
1998	2.78	52.3
1999	1.03	141.7
2000	3.77	38.6
2001	4.70	30.9
2002	1.24	117.0
2003	3.15	46.1
2004	1.57	92.7
2005	6.63	21.9
2006	2.02	72.0
2007	0.91	159.4
2008	2.69	54.0
2009	4.02	36.1
2010	12.11	12.0
2011	2.45	59.3
2012	0.52	278.5
2013	5.16	28.1
2014	3.13	46.4
2015	0.83	174.9
2016	4.82	30.1
2017	1.54	94.1
2018	5.14	28.3
2019	6.67	21.8
media	3.32	75.8

Dall'analisi dei dati si può ritenere che in condizioni medie sul periodo il lago di Castelnuovo avrebbe avuto un tempo di ricambio circa pari a 89.1 mesi per lo SCENARIO A e a 75.8 mesi per lo SCENARIO B.

6.4 Considerazioni conclusive

I tempi di ricambio calcolati per il lago di San Cipriano nel periodo considerato appaiono contenuti in virtù, come segnalato, sia delle sue limitate dimensioni sia dell'entità dei suoi rilasci (DMV di 10 l/s e portate per il fabbisogno della centrale, peraltro sempre meno significative).

Più elevati risultano, invece, i tempi di ricambio degli altri due laghi. Nello scenario B esaminato, i 10 l/s in continuo scaricati dall'Allori al Castelnuovo corrispondono, in effetti, a solo 0.31 Mm³ all'anno (nell'ipotesi che ci sia disponibilità in continuo) e non sono quindi in grado di modificare in modo sostanziale né le dinamiche di ricambio del Castelnuovo, né quelle dell'Allori stesso in quanto la media dei deflussi in uscita rimane pressoché la medesima.

È più interessante, invece, valutare l'effetto dello scarico complessivo dell'Allori nel Castelnuovo: se si sommano i volumi dello Scenario A scaricati dall'Allori a quelli del medesimo Scenario A scaricati dal Castelnuovo e si rapportano al volume del Castelnuovo (in pratica tutti i deflussi dell'Allori passano per il Castelnuovo) si ottiene un ridimensionamento del tempo di ricambio del lago Castelnuovo (49.4 mesi come indicato in TABELLA 19) che lo porta a valori molto simili a quelli del lago Allori.

TABELLA 19 - Tempi di ricambio previsti per il bacino di Castelnuovo considerando i volumi scaricati dal lago Allori.

lago di CASTELNUOVO		
anno	Volume annuo scaricato (milione m ³)	tempo di ricambio (mesi)
1993	3.99	36.4
1994	2.29	63.4
1995	1.05	137.7
1996	6.09	23.9
1997	4.86	29.9
1998	4.01	36.2
1999	1.25	116.4
2000	5.44	26.7
2001	6.91	21.0
2002	1.50	96.6
2003	4.62	31.4
2004	1.99	73.1
2005	9.81	14.8
2006	3.06	47.5
2007	1.48	98.3
2008	4.46	32.6
2009	6.25	23.3
2010	18.80	7.7
2011	3.40	42.7
2012	1.12	130.1
2013	8.55	17.0
2014	6.19	23.5
2015	1.66	87.2
2016	7.41	19.6
2017	2.25	64.6
2018	8.12	17.9
2019	10.40	14.0
media	5.07	49.4

7 ANALISI BIO-CHIMICA

7.1 Qualità delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di San Cipriano, Allori e Castelnuovo

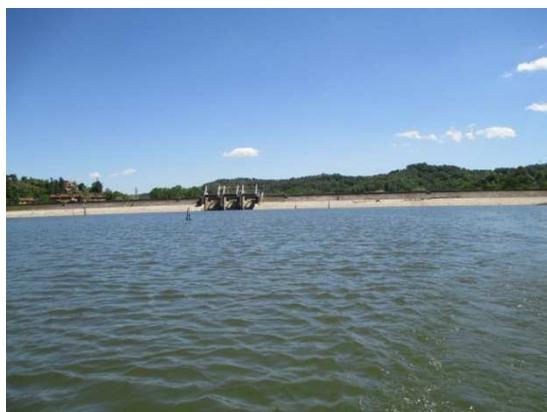
La caratterizzazione chimico-fisica e igienico-sanitaria delle acque superficiali dei bacini imbriferi sottesi ai laghi di San Cipriano, Allori e Castelnuovo (Figura 149) è stata effettuata partendo da condizioni iniziali ricavate dai risultati di quattro campagne di misura condotte nel periodo 2014 - 2015 (vedi Allegato) nei seguenti corpi idrici:

- lago San Cipriano,
- immissari del lago San Cipriano: borro Frati
borro Meleto

- lago Allori,
- immissari del lago Allori: borro Sinciano
borro Mulinaccio (o Pago)
borro Campocigoli
borro Molinuzzo

- lago Castelnuovo,
- immissari del lago Castelnuovo: borro Valli
borro Percussente
borro Bicchieraie
borro Pianale
borro Bacherozzolo.

Le figure seguenti (da Figura 150 a Figura 152) illustrano le condizioni dei borri affluenti ai tre bacini durante la campagna di misura del gennaio 2015.



Lago S. Cipriano



Lago Allori



Lago Castelnuovo

Figura 149 – Immagini dei laghi oggetto di campionamento nel periodo 2014 e 2015.



Borro Frati



Borro Meleto

Figura 150 – Immagini dei punti di prelievo nei borri afferenti al bacino di S. Cipriano nel gennaio 2015.



Borro Sinciano



Borro Pago



Borro Campocigoli



Borro Molinuzzo

Figura 151 – Immagini dei punti di prelievo nei borri afferenti al bacino di Allori nel gennaio 2015.



Borro Valli



Borro Percussente



Borro Bicchieraie



Borro Pianale



Borro Bacherozzolo

Figura 152 – Immagini dei punti di prelievo nei borri afferenti al bacino di Castelnuovo nel gennaio 2015.

Le attività di monitoraggio avevano come scopo:

- l'aggiornamento del modello biochimico, tramite la determinazione dei parametri fosforo totale, BOD₅, *Escherichia coli*, Enterococchi fecali, Salmonelle, Coliformi fecali;
- la definizione dello stato chimico-fisico delle acque, tramite la determinazione dei parametri arsenico, cadmio, cromo totale, mercurio, nichel, piombo, fosforo totale, ammoniaca, nitrati, percentuale di saturazione dell'ossigeno disciolto, temperatura, conducibilità, alcalinità e pH;
- la classificazione dello stato ecologico dei corpi idrici attraverso la determinazione dell'indice LTLecco per i laghi (che prevede i parametri trasparenza, fosforo totale, ossigeno ipolimnico,

ammonio e clorofilla "a") e la determinazione dell'indice LIMeco per i corsi d'acqua (che prevede i parametri ossigeno disciolto, azoto ammoniacale, azoto nitrico e fosforo totale)

Nei corsi d'acqua sono state inoltre effettuate, nel periodo di monitoraggio, tre campagne di campionamenti per la determinazione di macroinvertebrati bentonici (indice STAR ICM_i) e diatomee (indice ICM_j).

Le indagini sopra descritte sono state eseguite secondo il cronoprogramma riportato di seguito.

Mese	immissari			laghi		
	metalli, nutrienti, conducibilità, alcalinità, pH, O ₂ , temperatura	Parametri microbiologici, BOD ₅	Macrobenthos diatomee	metalli	conducibilità, alcalinità, pH, O ₂ , Chl <i>a</i> , temperatura, trasparenza, nutrienti, BOD ₅	Parametri microbiologici
Nov 14	x	x	x	x	x	x
Gen 15	x	x		x	x	x
Apr 15	x	x	x	x	x	x
Giu 15	x			x		
Lug 15	x	x	x	x	x	x
Ago 15	x			x		

I risultati delle attività di monitoraggio della qualità dei corpi idrici superficiali dell'area mineraria sono riportati dettagliatamente nel documento CESI B6002088 (2015) allegato al presente rapporto.

La società CIERRE ha eseguito ulteriori campagne di misura a novembre 2016, a novembre 2017, a maggio e novembre 2018, e a giugno e dicembre 2019.

Di seguito si riporta una tabella di sintesi con i giudizi relativi allo Stato Ecologico e allo Stato Chimico dei corpi idrici monitorati, valutati sulla base dei parametri e degli indicatori selezionati.

TABELLA 20 – Stato Ecologico e Chimico dei corpi idrici monitorati.

corpi idrici		Lago S. Cipriano	B. Frati	B. Meleto	Lago Allori	B. Sinclano	B. Mullinaccio	B. Campocigoli	B. Molnuzzo	Lago Castelnuovo	B. Valli	B. Percussente	B. Bicchierale	B. Pianale	B. Bacherozzolo
Stato Chimico	2014-2015	Non Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Non Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
	2016	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
	2017	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
	2018	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
	2019	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
LIM eco/ LTL eco	2014-2015	Sufficiente	Elevato	Elevato	Buono	Elevato	Elevato	Elevato	Elevato	Sufficiente	Elevato	Elevato	Buono	Buono	Elevato
	2016	Sufficiente	Elevato	Sufficiente	Sufficiente	Elevato	Elevato	Elevato	Buono	Sufficiente	Buono	Elevato	Buono	Scarso	Elevato
	2017	Sufficiente	Sufficiente	Buono	Sufficiente	Elevato	Elevato	Elevato	Elevato	Sufficiente	Elevato	Elevato	Buono	Scarso	Elevato
	2018	Sufficiente	Buono	Buono	Sufficiente	Elevato	Elevato	Elevato	Elevato	Sufficiente	Elevato	Elevato	Sufficiente	Sufficiente	Elevato
	2019	Sufficiente	Buono	Buono	Sufficiente	Elevato	Elevato	Elevato	Elevato	Sufficiente	Elevato	Elevato	Sufficiente	Sufficiente	Elevato
STAR ICM_I	2014-2015	-	Buono	Sufficiente	-	Buono	Buono	Sufficiente	Buono	-	Sufficiente	Buono	Scarso	Sufficiente	Buono
	2016	-	Sufficiente	Scarso	-	Elevato	Elevato	Scarso	Buono	-	Sufficiente	Elevato	Scarso	Cattivo	Buono
	2017	-	Scarso	Scarso	-	Buono	Buono	----	Sufficiente	-	Scarso	Buono	Cattivo	Scarso	Buono
	2018	-	Elevato	Scarso	-	Elevato	Elevato	----	Buono	-	Buono	Elevato	Scarso	Buono	Elevato
	2019	-	Elevato	Scarso	-	Elevato	Elevato	Elevato	Elevato	-	Buono	Elevato	Buono	Buono	Elevato
ICM_I	2014-2015	-	Buono	-----	-	Buono	Buono	Buono	Elevato	-	Elevato	Elevato	Buono	Scarso	Buono
	2016	-	Buono	-----	-	Buono	Buono	-----	Elevato	-	Elevato	Elevato	Elevato	Sufficiente	Buono
	2017	-	Buono	-----	-	Buono	Buono	-----	Buono	-	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
	2018	-	Buono	-----	-	Buono	Buono	-----	Buono	-	Buono	Buono	Sufficiente	Buono	Buono
	2019	-	Buono	-----	-	Buono	Buono	-----	Buono	-	Buono	Buono	Buono	Buono	Buono
Stato Ecologico	2014-2015	Sufficiente	Buono	Sufficiente	Buono	Buono	Buono	Sufficiente	Buono	Sufficiente	Sufficiente	Buono	Scarso	Scarso	Buono
	2016	Sufficiente	Sufficiente	Scarso	Sufficiente	Buono	Buono	Scarso	Buono	Sufficiente	Sufficiente	Buono	Scarso	Cattivo	Elevato
	2017	Sufficiente	Scarso	Scarso	Sufficiente	Buono	Buono	-	Sufficiente	Sufficiente	Scarso	Buono	Cattivo	Scarso	Buono
	2018	Sufficiente	Buono	Scarso	Sufficiente	Buono	Buono	-	Buono	Sufficiente	Buono	Buono	Scarso	Sufficiente	Buono
	2019	Sufficiente	Buono	Scarso	Sufficiente	Buono	Buono	Buono	Buono	Sufficiente	Buono	Buono	Sufficiente	Sufficiente	Buono

In alcuni mesi del periodo estivo non è stato possibile eseguire le indagini previste per assenza dei deflussi in diversi corsi d'acqua oggetto di studio.

7.1.1 Caratterizzazione dei bacini e dei relativi immissari

Di seguito sono sintetizzati i risultati dei parametri utilizzati per la modellazione nei laghi di S. Cipriano, Allori e Castelnuovo, e nei relativi immissari nel periodo autunno 2014 - estate 2015:

- BOD₅
- fosforo totale
- *Escherichia coli*
- Enterococchi intestinali
- Coliformi fecali
- *Salmonella spp.*

Per maggiori dettagli si rimanda al rapporto CESI B6002088 (2015) allegato.

Nelle tabelle seguenti sono riportate le misure rilevate ed utilizzate per la simulazione dell'evoluzione biochimica dei laghi.

TABELLA 21 – Concentrazioni misurate nel lago San Cipriano e nei suoi immissari nelle varie campagne di misura.

lago S. CIPRIANO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.84	1.87	1.6	-	3.13	-	<0,1	0.8	2.35	1.3	5.6	3.1
P tot	µg/l	70	27	< 10	-	36.7	-	26	15	7	9	18.9	43
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	280	10	<1	-	120	-	1200	10	8	15	<1	96
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	390	<4	4	-	10	-	210	60	3	13	<1	86
Coliformi fecali	MPN/100 ml	530*	39	7	-	210	-	2700	30	12	500	6	120
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	presente	assente	assente	-	assente	-						
borro FRATI													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15 [^]	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.27	2.54	3.3	-	-	-	<0,1	1.2	2.8	<0,1	1.5	7.2
P tot	µg/l	51	23	15.9	43.4	-	65.7	28	55	<5	72	65.5	30
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	370	90	80	-	-	-	470	250	220	80	150	380
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	310	50	240	-	-	-	90	700	160	11	210	520
Coliformi fecali	MPN/100 ml	900*	150	120	-	-	-	610	500	380	2800	470	690
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	-	-						
borro MELETO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.78	1.72	0.9	-	0.87	-	<0,1	0.5	3.8	0.5	3.9	5.7
P tot	µg/l	24	23	19.9	< 10	21.6	< 10	13	13	12	16	19.9	11
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	320	160	14	-	60	-	800	40	14	16	80	140
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	340	4	4	-	310	-	500	80	60	36	50	160
Coliformi fecali	MPN/100 ml	570*	240	39	-	93	-	940	110	20	2400	110	180
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	assente	-						

(* indica che il valore si riferisce a Coliformi totali in UFC/100 ml);

[^] indica che il campionamento non è stato effettuato per assenza di acqua nel corpo idrico)

TABELLA 22 – Concentrazioni misurate nel lago Allori e nei suoi immissari nelle varie campagne di misura.

lago ALLORI													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.6	2.31	1.5	-	0.48	-	<0,1	0.7	2.5	0.3	2.3	3.8
P tot	µg/l	30	38	< 10	-	10.4	-	19	22.1	<5	<5	17.7	52
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	200	<4	<1	-	320	-	83	20	6	0	<1	10
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	260	5	<1	-	420	-	60	<10	1	0	<1	52
Coliformi fecali	MPN/100 ml	320*	11	11	-	460	-	420	140	7	540	<3	20
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	presente	assente	assente	-	assente	-						
borro SINCIANO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.02	1.82	1	-	0.23	-	<0,1	0.3	5	<0,1	1.1	0.6
P tot	µg/l	17	17	< 10	< 10	12.6	< 10	8	6.3	14	<5	12.7	<5
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	82	66	<4	-	250	-	110	20	10	14	20	10
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	110	8	<4	-	740	-	18	40	3	17	80	20
Coliformi fecali	MPN/100 ml	180*	240	7	-	460	-	1370	55	10	1300	60	20
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	assente	-						
borro MULINACCIO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.85	1.39	1.9	-	0.61	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0.8	1.8
P tot	µg/l	21	17	< 10	13.7	20.7	< 10	4	7.6	<5	<5	11.2	<5
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	170	8	66	-	370	-	540	100	10	60	900	64
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	160	5	<1	-	1100	-	50	50	36	14	60	60
Coliformi fecali	MPN/100 ml	350*	20	93	-	1100	-	1200	190	66	990	150	120
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	presente	-						
borro CAMPOCIGOLI													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15 [^]	lug-15 [^]	set-15 [^]	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.13	1.13	2.9	-	-	-	<0,1	0.9	11.7	-	3.8	3.4
P tot	µg/l	28	13	< 10	-	-	-	8	12.1	13	-	13.5	<5
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	240	40	68	-	-	-	230	1650	56	-	50	270
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	220	12	78	-	-	-	41	80	45	-	20	120
Coliformi fecali	MPN/100 ml	410*	75	93	-	-	-	650	1845	100	-	150	310
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	-	-						
borro MOLINUZZO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15 [^]	ago-15 [^]	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	0.66	1.83	3.4	-	-	-	0.5	0.8	1.5	<0,1	0.9	4.6
P tot	µg/l	26	16	< 10	10.6	-	-	4	11.2	44	39	30	34
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	130	40	54	-	-	-	43	240	150	90	10	87
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	230	10	80	-	-	-	10	150	220	11	30	110
Coliformi fecali	MPN/100 ml	260*	75	150	-	-	-	570	320	240	1200	40	140
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	-	-						

(* indica che il valore si riferisce a Coliformi totali in UFC/100 ml);

[^] indica che il campionamento non è stato effettuato per assenza di acqua nel corpo idrico)

TABELLA 23 – Concentrazioni misurate nel lago Castelnuovo e nei suoi immissari nelle varie campagne di misura.

lago CASTELNUOVO													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.54	2.21	1.5	-	1.59	-	<0,1	1.6	1.53	0.5	2.5	2.9
P tot	µg/l	21	24	19.8	-	25.4	-	21	52.6	<5	<5	38.6	18
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	120	4	<4	-	10	-	120	560	12	96	<1	42
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	570	40	12	-	8	-	160	260	1	120	<1	120
Coliformi fecali	MPN/100 ml	270*	14	7	-	20	-	140	950	18	600	220	53
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/assenza in 1 l	assente	assente	assente	-	assente	-						
borro VALLI													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15 ^A	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.17	1.1	0.8	-	1.66	-	0.5	1.7	4.3	0.9	3.7	3.1
P tot	µg/l	42	143	<10	12.8	88.2	-	13	18.7	<5	13	26	15
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	240	94	62	-	570	-	1100	10	300	20	120	180
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	250	2000	18	-	1400	-	200	230	150	48	20	230
Coliformi fecali	MPN/100 ml	440*	120	210	-	1100	-	1800	60	480	1800	200	190
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/assenza in 1 l	assente	assente	assente	-	assente	-						
borro PERCUSSENTE													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.57	0.14	0.8	-	0.41	-	<0,1	0.8	4.2	<0,1	1.8	2.2
P tot	µg/l	29	34	<10	11.2	20.7	<10	6	6.4	8	68	21.1	8
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	250	4	<4	-	770	-	800	30	90	29	4200	31
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	270	4	36	-	1200	-	380	120	70	24	350	170
Coliformi fecali	MPN/100 ml	600*	21	14	-	1100	-	1600	75	150	1100	7000	53
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/assenza in 1 l	assente	assente	assente	-	assente	-						
borro BICCHIERAIE													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.39	2.16	2.7	-	4.84	-	<0,1	1.26	<0,1	<0,1	2.9	3.7
P tot	µg/l	74	97	28.2	97.3	608	326	19	26.3	57	80	69	56
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	150	2400	100	-	2400	-	1100	1500	1200	3200	500	1700
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	230	1500	110	-	750	-	270	>1000	1920	960	320	760
Coliformi fecali	MPN/100 ml	350*	>2400	150	-	4600	-	2300	1700	800	27000	3700	4200
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/assenza in 1 l	presente	assente	assente	-	assente	-						
borro PIANALE													
misure CESI								misure CIERRE					
Parametro	u.d.m.	nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.5	1.48	3.7	-	26.83		<0,1	1.7	0.5	<0,1	3.6	4.3
P tot	µg/l	52	36	59.6	248	2190	993	190	650	97	218	221	31
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	160	150	400	-	16000	-	900	37800	5600	2100	7000	3700
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	170	230	3800	-	38000	-	530	70	10900	920	1700	2200
Coliformi fecali	MPN/100 ml	280*	240	4600	-	21000	-	1100	38400	3000	93000	1.4x10 ⁴	5800
<i>Salmonella spp.</i>	Presenza/assenza in 1 l	presente	assente	assente	-	assente	-						

borro Bacherrozzolo													
Parametro	u.d.m.	misure CESI						misure CIERRE					
		nov-14	gen-15	apr-15	giu-15	lug-15 [^]	ago-15	nov-16	nov-17	mag-18	nov-18	giu-19	dic-19
BOD ₅	mg/l	1.17	1.66	1.6	-	-	-	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	1.7	3.9
P tot	µg/l	28	31	< 10	19.9	-	< 10	4	5.6	<5	<5	17.3	22
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	320	84	8	-	-	-	900	20	700	3700	4000	340
Enterococchi intestinali	UFC/100 ml	420	7	44	-	-	-	460	100	280	140	630	640
Coliformi fecali	MPN/100 ml	820*	120	21	-	-	-	1200	40	1100	230	9800	530
Salmonella spp.	Presenza/ assenza in 1l	assente	assente	assente	-	-	-						

(* indica che il valore si riferisce a Coliformi totali in UFC/100 ml;

[^] indica che il campionamento non è stato effettuato per assenza di acqua nel corpo idrico)

Nella modellazione dell'evoluzione biochimica dei laghi sono richiesti i valori delle concentrazioni di ogni borro afferente a ciascun lago per ogni stagione.

Come rilievi stagionali di riferimento sono stati assunti:

- rilievi CESI del gennaio 2015 per la stagione invernale;
- rilievi CIERRE del maggio 2018 per la stagione primaverile;
- rilievi CESI del luglio 2015 per la stagione estiva;
- rilievi CIERRE del novembre 2018 per la stagione autunnale.

Si è preferito considerare le misure CIERRE del 2018 a quelle del 2019 perché più rappresentative delle stagioni primaverile (maggio 2018 anziché giugno 2019) ed autunnale (novembre 2018 anziché dicembre 2019).

7.1.2 Stima della concentrazione dei parametri stagionali per i volumi immessi nei singoli laghi

Al fine di attribuire un opportuno peso agli apporti dei singoli borri sono state utilizzate informazioni pertinenti alla larghezza bagnata e all'altezza media dell'acqua nelle sezioni d'alveo in cui sono state effettuate le indagini (in Allegato) basate sulle immagini fotografiche dei giorni dei rilievi.

Di seguito, per ogni bacino, sono riportate le caratteristiche (larghezza bagnata e altezza media) delle sezioni d'alveo in cui sono stati effettuati i prelievi nelle campagne stagionali di misura 2015 e 2018. Il rapporto tra la sezione bagnata di uno specifico borro e la somma delle sezioni bagnate di tutti i borri afferenti al medesimo lago determina il peso statistico stagionale attribuito al borro.

I parametri per il borro Campocigoli per la stagione primaverile (indicati in rosso in TABELLA 25) sono ipotetici in quanto al momento del rilievo il borro risultava quasi asciutto (rendendo tuttavia possibile le misure di concentrazione). I valori assegnati per il dimensionamento della sezione dei rilievi sono tali da minimizzare il peso statistico di tale borro (1.2%).

TABELLA 24 – Caratteristiche dell'alveo bagnato nelle sezioni di misura dei borri immissari del lago S. Cipriano e peso statistico stagionale stimato per ogni singolo borro.

		INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
borro Frati	larghezza (m)	0.5	1.5	0	1.5
	altezza media (m)	0.1	0.1	0	0.1
borro Meleto	larghezza (m)	0.8	1.5	0.8	1
	altezza media (m)	0.1	0.15	0.1	0.08

peso statistico				
	inverno	primav.	estate	autunno
borro Frati	0.385	0.400	0	0.652
borro Meleto	0.615	0.600	1	0.348

TABELLA 25 – Caratteristiche dell'alveo bagnato nelle sezioni di misura dei borri immissari del lago Allori e peso statistico stagionale stimato per ogni singolo borro.

		INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
borro Sinciano	larghezza (m)	0.5	1.5	0.5	1
	altezza media (m)	0.05	0.1	0.05	0.07
borro Mulinaccio/Pago	larghezza (m)	0.7	0.7	0.5	1
	altezza media (m)	0.05	0.07	0.05	0.14
borro Campocigoli	larghezza (m)	0.4	0.5	0	0
	altezza media (m)	0.04	0.01	0	0
borro Molinuzzo	larghezza (m)	1	2	0	2
	altezza media (m)	0.05	0.1	0	0.15

peso statistico				
	inverno	primav.	estate	autunno
borro Sinciano	0.198	0.371	0.5	0.137
borro Mulinaccio/Pago	0.278	0.121	0.5	0.275
borro Campocigoli	0.127	0.012	0	0.000
borro Molinuzzo	0.397	0.495	0	0.588

Analogamente, i parametri per il borro Valli per la stagione estiva (indicati in rosso in TABELLA 26) sono ipotetici in quanto al momento del rilievo il borro risultava quasi asciutto (rendendo tuttavia possibile le misure di concentrazione). I valori assegnati per il dimensionamento della sezione dei rilievi sono tali da minimizzare il peso statistico di tale borro (2%).

TABELLA 26 – Caratteristiche dell'alveo bagnato nelle sezioni di misura dei borri immissari del lago Castelnuovo e peso statistico stagionale stimato per ogni singolo borro.

		INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
borro Valli	larghezza (m)	1	1	0.5	1
	altezza media (m)	0.08	0.08	0.01	0.08
borro Percussente	larghezza (m)	2	1	1.5	1
	altezza media (m)	0.05	0.12	0.05	0.12
borro Bicchieraie	larghezza (m)	0.5	0.7	0.5	0.5
	altezza media (m)	0.05	0.07	0.04	0.04
borro Pianale	larghezza (m)	2.5	2	1.5	2
	altezza media (m)	0.15	0.18	0.1	0.2
borro Bacherozzolo	larghezza (m)	0.5	1	0	1
	altezza media (m)	0.05	0.08	0	0.1

	peso statistico			
	inverno	primav.	estate	autunno
borro Valli	0.132	0.116	0.020	0.111
borro Percussente	0.165	0.174	0.300	0.167
borro Bicchierie	0.041	0.071	0.080	0.028
borro Pianale	0.620	0.522	0.600	0.556
borro Bacherozzolo	0.041	0.116	0.000	0.139

Nelle tabelle seguenti (da TABELLA 27 a TABELLA 29)) sono riportate le concentrazioni stagionali dedotte per le portate immesse ai singoli laghi. La TABELLA 30 contiene, invece, i valori di concentrazione stagionale misurati nei singoli laghi.

TABELLA 27 – Concentrazioni stagionali stimate in ingresso al lago San Cipriano.

		BOD5 (mg/l)				P tot (µg/l)				Escherichia coli (UFC/100 ml)				Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
immissari S. Cipriano	borro	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
	Frati	2.54	2.8	n.r.	0.1	23	5	n.r.	72	90	220	n.r.	80	50	160	n.r.	11
	Meleto	1.72	3.8	0.87	0.5	23	12	21.6	16	160	14	60	16	4	60	310	36
	conc.pesata	2.04	3.40	0.87	0.24	23.00	9.20	21.60	52.52	133.1	96.4	60.0	57.7	21.7	100.0	310.0	19.7

		Coliformi fecali (MPN/100 ml)				Salmonella spp.			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
immissari S. Cipriano	borro	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
	Frati	150	380	n.r.	2800	assente	assente	n.r.	assente
	Meleto	240	20	93	2400	assente	assente	assente	assente
	conc.pesata	205.38	164.00	93.00	2660.87				

TABELLA 28 – Concentrazioni stagionali stimate in ingresso al lago Allori.

		BOD5 (mg/l)				P tot (µg/l)				Escherichia coli (UFC/100 ml)				Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
borro																	
immissari Allori	Sinciano	1.82	5	0.23	0.1	17	14	12.6	5	66	10	250	14	8	3	740	17
	Mulinaccio	1.39	0.1	0.61	0.1	17	5	20.7	5	8	10	370	60	5	36	1100	14
	Campocigoli	1.13	11.7	n.r.	n.r.	13	13	n.r.	n.r.	40	56	n.r.	n.r.	12	45	n.r.	n.r.
	Molinuzzo	1.83	1.5	n.r.	0.1	16	44	n.r.	39	40	150	n.r.	90	10	220	n.r.	11
	conc.pesata	1.62	2.76	0.42	0.10	16.10	27.75	16.65	25.00	36.3	79.9	310.0	71.3	8.5	114.9	920.0	12.6

		Coliformi fecali (MPN/100 ml)				Salmonella spp.			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
borro									
immissari Allori	Sinciano	240	10	460	1300	assente	assente	assente	assente
	Mulinaccio	20	66	1100	990	assente	assente	presente	assente
	Campocigoli	75	100	n.r.	n.r.	assente	assente	n.r.	n.r.
	Molinuzzo	75	240	n.r.	1200	assente	assente	n.r.	assente
	conc.pesata	92.46	131.77	780.00	1156.08				

TABELLA 29 – Concentrazioni stagionali stimate in ingresso al lago Castelnuovo.

		BOD5 (mg/l)				P tot (µg/l)				Escherichia coli (UFC/100 ml)				Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
borro		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
immissari Castelnuovo	Valli	1.1	4.3	1.66	0.9	143	5	88.2	13	94	300	570	20	2000	150	1400	48
	Perussente	0.14	4.2	0.41	0.1	34	8	20.7	68	4	90	770	29	4	70	1200	24
	Bicchieraie	2.16	0.1	4.84	0.1	97	57	608	80	2400	1200	2400	3200	1500	1920	750	960
	Pianale	1.48	0.5	26.83	0.1	36	97	2190	218	150	5600	16000	2100	230	10900	38000	920
	Bacherozzolo	1.66	0.1	n.r.	0.1	31	5	n.r.	5	84	700	n.r.	3700	7	280	n.r.	140
conc.. pesata		1.24	1.51	16.64	0.19	52.1	57.3	1370.6	136.8	208.7	3143.1	10034.4	1776.5	470.0	5893.9	23248.0	566.6

		Coliformi fecali (MPN/100 ml)				Salmonella spp.			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
borro		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
immissari Castelnuovo	Valli	120	480	1100	1800	assente	assente	assente	assente
	Perussente	21	150	1100	1100	assente	assente	assente	assente
	Bicchieraie	2500	800	4600	27000	assente	assente	assente	assente
	Pianale	240	3000	21000	93000	assente	assente	assente	assente
	Bacherozzolo	120	1100	n.r.	230	assente	assente	n.r.	assente
conc.. pesata		276.4	1834.0	13320.0	52831.9				

n.r. = il campionamento non è stato effettuato per assenza di acqua nel corpo idrico

Si segnala il valore elevato di fosforo totale, pari a 1371 µg/l, stimato per il periodo estivo in ingresso al bacino di Castelnuovo, è imputabile ai valori rilevati nei borri Pianale e Bicchieraie per lo stesso periodo, pari rispettivamente a 608 µg/l e 2190 µg/l.

Tali concentrazioni sono con ogni probabilità dovute agli scarichi dell'abitato di Castelnuovo dei Sabbioni, che saranno presto intercettati dalla nuova linea fognaria in progettazione.

TABELLA 30 – Concentrazioni stagionali misurate nei singoli laghi.

		BOD5 (mg/l)				P tot (µg/l)				Escherichia coli (UFC/100 ml)				Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)			
		INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
		gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
laghi	Castelnuovo	2.21	1.53	1.59	0.5	24	5	25.4	5	4	12	10	96	40	1	8	120
	Allori	2.31	2.5	0.48	0.3	38	5	10.4	5	4	6	320	0	5	1	420	0
	S.Cipriano	1.87	2.35	3.13	1.3	27	7	36.7	9	10	8	120	15	4	3	10	13

	Coliformi fecali (MPN/100 ml)				Salmonella spp.			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.	INV.	PRI.	EST.	AUT.
	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18	gen-15	mag-18	lug-15	nov-18
Castelnuovo	14	18	20	600	assente	assente	assente	assente
Allori	11	7	460	540	assente	assente	assente	assente
S.Cipriano	39	12	210	500	assente	assente	n.r.	assente

7.2 Modello biochimico

La qualità delle acque invasate nei laghi di Castelnuovo, di Allori e di San Cipriano è stata valutata utilizzando un modello matematico che, sulla base delle equazioni di bilancio di massa, noti gli apporti esterni e i tassi di decadimento, ha consentito di calcolare gli andamenti temporali di alcuni parametri chimici e microbiologici di particolare interesse, quali la concentrazione di **BOD₅**, **fosforo totale**, **Escherichia coli**, **Enterococchi intestinali** e **Coliformi fecali**. Non è stato possibile valutare tale andamento per il parametro *Salmonella spp.*, come originariamente previsto, poiché ne è stata riscontrata l'assenza nella maggior parte dei campioni sottoposti ad analisi.

È importante notare che, indipendentemente dall'accuratezza della formulazione generale delle equazioni del modello, la grande variabilità dei valori di concentrazione nei corsi d'acqua immissari di un generico invaso rende questo tipo di previsione necessariamente approssimato, tale cioè da fornire solo una stima qualitativa dell'ordine di grandezza delle variabili in gioco e delle relative variazioni.

Il modello matematico utilizzato si basa sulle due equazioni di bilancio di massa della variabile chimica o microbiologica considerata e del volume liquido invasato nel lago.

Il modello è di tipo zero-dimensionale, cioè si basa sull'ipotesi che l'invaso risulti completamente rimescolato e la variabile concentrazione sia uniforme su tutto il volume.

L'equazione di bilancio di massa per la variabile m-esima è la seguente:

$$\frac{d(C_m V)}{dt} = Q_{in} C_{m(in)} - Q_{out} C_m - k_m C_m V \quad (1)$$

dove: C_m e $C_{m(in)}$ sono le concentrazioni nel lago e negli immissari;
 Q_{in} e Q_{out} sono le portate liquide in ingresso e uscita;
 k_m è il coefficiente di decadimento della variabile m-esima, funzione della temperatura (i valori di k_m sono stati dedotti sulla base di formule approssimate reperibili nella letteratura scientifica);
 V è il volume del lago.

Per le diverse grandezze chimiche e biologiche indagate esse valgono:

- **BOD₅**

$$k_m = C_{BOD5} 1.047^{(T-20)} \quad [1/d] \quad [EPRI, 1979]$$

dove $C_{BOD5} = 0.18 \quad [1/d]$ è un tipico valore di letteratura
- **Escherichia coli**

$$k_m = C_{Ec} e^{-\frac{9000(T-20)}{583(273+T)}} \quad [1/d] \quad [Vismara, 1984]$$

dove $C_{Ec} = 0.36 \quad [1/d]$ è un tipico valore di letteratura
- **Fosforo totale**

$$k_m = (26 / (h 365)) 1.05^{(T-20)} \quad [1/d] \quad [Lorentzen, 1976]$$

dove h [m] è la profondità media del bacino
- Enterococchi intestinali
- Coliformi fecali

Per gli Enterococchi intestinali e i Coliformi fecali si è ritenuto di poter applicare la formula di decadimento dell'*Escherichia coli* mostrata in precedenza.

Per il lago di S. Cipriano, il cui assetto idrografico è assimilabile a quello di progetto, le costanti C_{BOD5} e C_{Ec} (nelle formulazioni dei coefficienti k_m per il BOD₅ e gli *Echerichia Coli*) sono state assunte come parametri di validazione al fine di ottenere risultati dal modello comparabili con le concentrazioni misurate nelle diverse campagne tra il 2014 e il 2019. Un accordo apprezzabile è stato ottenuto assumendo $C_{BOD5} = 0.02$ e $C_{Ec} = 0.02$. Questi valori risultano inferiori ai dati di letteratura e possono quindi considerarsi cautelativi. Queste costanti saranno utilizzate anche per l'analisi dei laghi di Allori e Castelnuovo.

Il volume V invasato nel lago è funzione delle portate liquide di ingresso (Q_{in}) e d'uscita (Q_{out}) e del flusso evaporativo netto (tolte le precipitazioni) dalla superficie verso l'atmosfera (Q_{evap}):

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{evap}} \quad (2)$$

Sviluppando, sostituendo e semplificando le equazioni (1) e (2) si ottengono due equazioni differenziali del prim'ordine nelle funzioni incognite $C_m(t)$ e $V(t)$:

$$\boxed{dC_m/dt = (Q_{in}/V) (C_{m(in)} - C_m) - k_m C_m + (Q_{evap}/V) C_m} \quad (3)$$

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{evap}} \quad (4)$$

Nel caso specifico del lago di Castelnuovo, se si dovesse considerare un apporto diretto dal lago di Allori al lago Castelnuovo, le equazioni sopra riportate diverrebbero

$$\boxed{d(C_m V)/dt = Q_{in} C_{m(in)} - Q_{out} C_m - k_m C_m V + Q_{Allori} C_{m(Allori)}} \quad (1^*)$$

$$\boxed{dC_m/dt = (Q_{in}/V) (C_{m(in)} - C_m) - k_m C_m + (Q_{evap}/V) C_m + (Q_{Allori}/V) (C_{m(Allori)} - C_m)} \quad (3^*)$$

$$\boxed{dV/dt = Q_{in} - Q_{out} - Q_{evap} + Q_{Allori}} \quad (4^*)$$

dove Q_{Allori} e $C_{m(Allori)}$ rappresentano, rispettivamente, la portata e la concentrazione dell'acqua proveniente dal lago Allori.

Poiché tutti i parametri che compaiono nel sistema sono funzioni del tempo, il sistema è risolvibile solo per via numerica, utilizzando uno dei metodi approssimati disponibili in letteratura.

Il metodo utilizzato dal modello per l'integrazione del sistema di equazioni (3) e (4) è quello di Eulero-Cauchy. Esso fornisce, attraverso successive integrazioni con passo temporale di un giorno, i valori approssimati medi giornalieri di concentrazione m -esima e di volume invasato.

I dati di input per il modello sono le grandezze idrologiche significative per il bilancio di massa delle variabili che si vogliono modellare:

- INPUT portata dell'immissario
- INPUT concentrazione nell'immissario del parametro che si intende modellare
- INPUT temperatura dell'acqua del bacino
- INPUT portata dell'emissario

- INPUT portata evaporata
- INPUT geometria dell'invaso
- INPUT condizioni iniziali dei parametri.

L'output della simulazione è costituito dall'andamento temporale delle concentrazioni dei parametri chimici e igienico-sanitari dei quali si è scelto di effettuare la modellazione (BOD₅, fosforo totale, Escherichia coli, Enterococchi intestinali e Coliformi fecali) in accordo con le prescrizioni formulate dal Ministero dell'Ambiente e dalla Regione Toscana.

Le modellazioni di qualità dell'acqua dei laghi di Castelnuovo, di Allori e di San Cipriano sono state eseguite utilizzando i dati di output della modellazione termo-idrologica basata sul set di dati meteorologici relativi al periodo 01/09/1992 ÷ 31/12/2019; i primi 4 mesi del periodo (terzo quadrimestre dell'anno 1992) sono serviti per l'inizializzazione del modello e non sono stati dunque considerati nella presentazione dei risultati per evitare eccessive dipendenze dalle condizioni iniziali.

Le concentrazioni biochimiche degli apporti in ingresso ai laghi sono assunte pari ai valori di concentrazione dedotti dalle misure stagionali nei vari borri rilevate negli anni 2015 e 2018 opportunamente pesate (paragrafo 5.1.2).

Per quanto riguarda invece la concentrazione iniziale nei singoli laghi, dal momento che si assume come periodo di inizio simulazione il 1° settembre (inizializzazione del modello), sono state assunte le concentrazioni misurate nell'estate 2015.

Le modellazioni di qualità dell'acqua dei laghi del sistema Allori – Castelnuovo descritte nel seguito ricalcano le due differenti ipotesi di connessione tra i due laghi precedentemente ipotizzate. La prima ipotesi (denominata A) non prevede alcun rilascio di portata dal lago di Allori a quello di Castelnuovo, mentre la seconda ipotesi (denominata B) considera il rilascio di 10 l/s, quando disponibili, dall'Allori al Castelnuovo.

7.3 Analisi delle portate ai laghi nei periodi dei rilievi per una più corretta definizione dei carichi in ingresso ai laghi

Le campagne di misura delle concentrazioni per la definizione dello stato bio-chimico e trofico stagionale dei borri e dei laghi sono state effettuate in periodi con ridotta piovosità.

Nella modellazione bio-chimica si associa alle portate in ingresso ai laghi la concentrazione dedotta dalle misure nella stagione di riferimento. Quindi le concentrazioni si assumono costanti e uguali per ogni singola stagione di ogni anno di simulazione.

Di seguito (TABELLA 31) sono riportate le precipitazioni e le portate in ingresso ai singoli laghi dedotte dal modello idrologico nelle date considerate per i campionamenti (i dati in grassetto fanno riferimento ai giorni di misura).

TABELLA 31 – Precipitazioni sui vari bacini imbriferi nei giorni dei rilievi e portate ai singoli laghi stimate dal modello idrologico HEC-HMS.

	data	S.CIPRIANO		ALLORI		CASTELNUOVO	
		Precipit. (mm)	Q al lago (m ³ /s)	Precipit. (mm)	Q al lago (m ³ /s)	Precipit. (mm)	Q al lago (m ³ /s)
INVERNO	17-gen-15	1.026	0.071	1.199	0.036	3.736	0.050
	18-gen-15	7.289	0.083	7.613	0.043	0.370	0.048
	19-gen-15	0.157	0.082	0.184	0.043	0.005	0.046
	20-gen-15	0.170	0.070	0.137	0.035	0	0.043
	21-gen-15	0.557	0.070	0.584	0.035	1.529	0.040
	22-gen-15	3.018	0.069	2.960	0.035	0.388	0.037
PRIMAVERA	25-mag-18	0.030	0.091	0.063	0.043	0.012	0.080
	26-mag-18	0	0.091	0.000	0.043	0	0.081
	27-mag-18	0	0.091	0.000	0.043	0	0.081
	28-mag-18	0	0.091	0.000	0.043	0	0.081
	29-mag-18	0.115	0.092	0.094	0.044	0.005	0.081
	30-mag-18	0.030	0.092	0.063	0.044	0.005	0.081
	31-mag-18	0.162	0.092	0.266	0.044	0.059	0.081
	01-giu-18	0	0.092	0.000	0.044	0	0.081
02-giu-18	0	0.092	0.000	0.044	0	0.082	
ESTATE	12-lug-15	0	0.037	0.000	0.019	0	0
	13-lug-15	0	0.032	0.000	0.017	0	0
	14-lug-15	0	0.028	0.000	0.014	0	0
	15-lug-15	0	0.024	0.000	0.012	0	0
	16-lug-15	0	0.020	0.000	0.010	0	0
	17-lug-15	0	0.017	0.000	0.009	0	0
	18-lug-15	0	0.014	0.000	0.007	0	0
AUTUNNO	25-nov-18	19.629	0.165	19.002	0.078	20.162	0.143
	26-nov-18	6.743	0.179	6.293	0.086	4.672	0.138
	27-nov-18	1.542	0.059	1.911	0.031	0.280	0.029
	28-nov-18	0	0.027	0.000	0.017	0	0.013
	29-nov-18	0	0.024	0.000	0.015	0	0.011
	30-nov-18	0	0.021	0.000	0.014	0	0.010
	01-dic-18	4.519	0.018	4.801	0.012	4.823	0.009

L'ipotesi di assumere costanti le concentrazioni stagionali della portata in ingresso al lago può indurre ad erronei eccessi di carico nel lago in corrispondenza di forti precipitazioni (e quindi elevate portate al lago) in considerazione del fatto che nei periodi delle misure le portate ai laghi risultavano ridotte.

Al fine di contenere tali eventualità, si è ipotizzato di considerare per ogni stagione, per le giornate caratterizzate da portate in ingresso molto superiori alle portate stimate alle date delle misure, una portata di riferimento (Q_{rif}) al di sopra della quale si opera una diluizione delle concentrazioni misurate secondo la relazione:

$$se \ Q > Q_{rif} \quad C_{rid} = C_{mis} \frac{Q_{rif}}{Q}$$

dove:

- C_{mis} = concentrazione misurata nella stagione corrente per lo specifico parametro bio-chimico;
- Q_{rif} = portata di riferimento in ingresso al lago per singola stagione;
- Q = portata al lago del giorno corrente;
- C_{rid} = concentrazione assunta per la portata al lago del giorno corrente nell'ipotesi che $Q \gg Q_{rif}$.

Come valore di Q_{rif} è stata assunta una portata circa 10 volte superiore alla massima portata stimata nei giorni dei rilievi. La tabella che segue riporta, per ogni stagione e per ogni lago, la portata stimata durante le campagne di misura (Q_{mis}) e la portata assunta (Q_{rif}) per la diluizione della concentrazione.

TABELLA 32 – Portate stimate in ingresso ai laghi nei giorni dei rilievi e corrispondenti portate assunte per la diluizione delle concentrazioni.

	S.CIPRIANO		ALLORI		CASTELNUOVO	
	Q_{mis} (m ³ /s)	Q_{rif} (m ³ /s)	Q_{mis} (m ³ /s)	Q_{rif} (m ³ /s)	Q_{mis} (m ³ /s)	Q_{rif} (m ³ /s)
INVERNO	0.070	0.8	0.035	0.4	0.043	0.5
PRIMAVERA	0.092	1	0.044	0.5	0.081	0.9
ESTATE	0.024	0.26	0.012	0.15	0	0.05
AUTUNNO	0.027	0.3	0.017	0.2	0.013	0.15

Per quanto riguarda la portata stimata in arrivo al lago di Castelnuovo nei giorni dei rilievi estivi, l'analisi idrologica ha indicato valori nulli (Q_{mis} in TABELLA 31). In questo caso come portata Q_{rif} sopra la quale operare la diluizione si è ipotizzato un valore pari a 50 l/s.

La condizione di assenza di portata in ingresso al lago Castelnuovo nelle giornate estive di metà luglio dell'anno 2015 riscontrata attraverso la modellazione idrologica con HEC-HMS è stata investigata, specie in considerazione del fatto che, nelle stesse giornate, il deflusso in ingresso agli altri due laghi è, invece, risultato non nullo.

La Figura 153 mostra le piogge medie areali ricavate per ciascuno dei tre bacini per l'anno 2015 in questione. Le due figure successive mostrano, anche in dettaglio, i risultati della simulazione idrologica dell'intero anno 2015 in termini di precipitazione netta (*excess*, in mm), ovvero precipitazione totale depurata delle perdite per infiltrazione, e di deflusso totale in ingresso ai laghi (*total flow*, m³/s) generato dalla precipitazione stessa e composto dalla somma del deflusso diretto superficiale e di quello di base o profondo.

L'analisi della Figura 153 evidenzia una frequenza delle piogge tra giugno e luglio 2015 perfettamente sovrapponibile per i tre laghi: dal 19/6/2015 al 21/7/2015 la pioggia è stata nulla per tutte le stazioni utilizzate per il calcolo della precipitazione media areale sui tre bacini (secondo la metodica illustrata al paragrafo 3.2); tutte le stazioni meteorologiche utilizzate hanno, invece, registrato piogge non nulle dal 22/7/2015 al 26/7/2015 con successivo nuovo azzeramento fino alla fine di luglio.

Ciò che è in realtà cambiata è l'intensità complessiva delle precipitazioni dei primi mesi dell'anno: su Allori e Cipriano ha piovuto di più generando una maggiore ricarica della falda profonda che ha continuato a fornire un deflusso di base (*baseflow*) anche nei giorni siccitosi di luglio, come chiaramente rilevabile nei grafici di dettaglio della Figura 155.

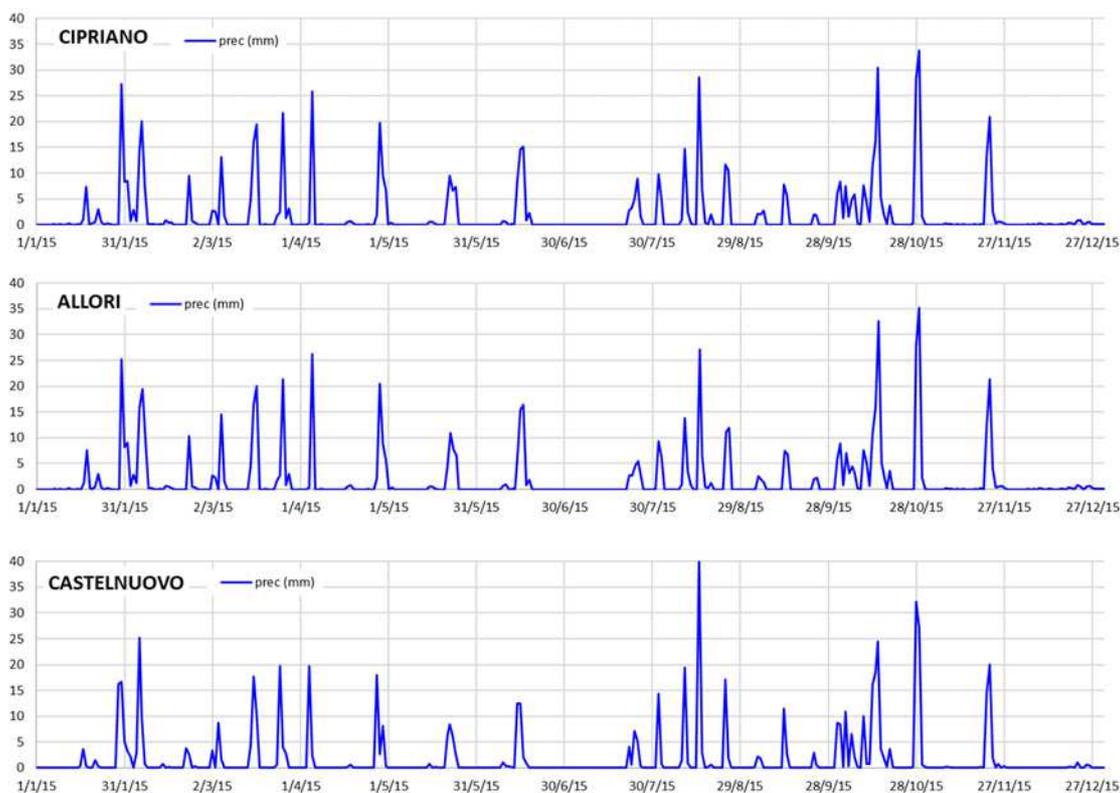


Figura 153 – Piogge dell'anno 2015.

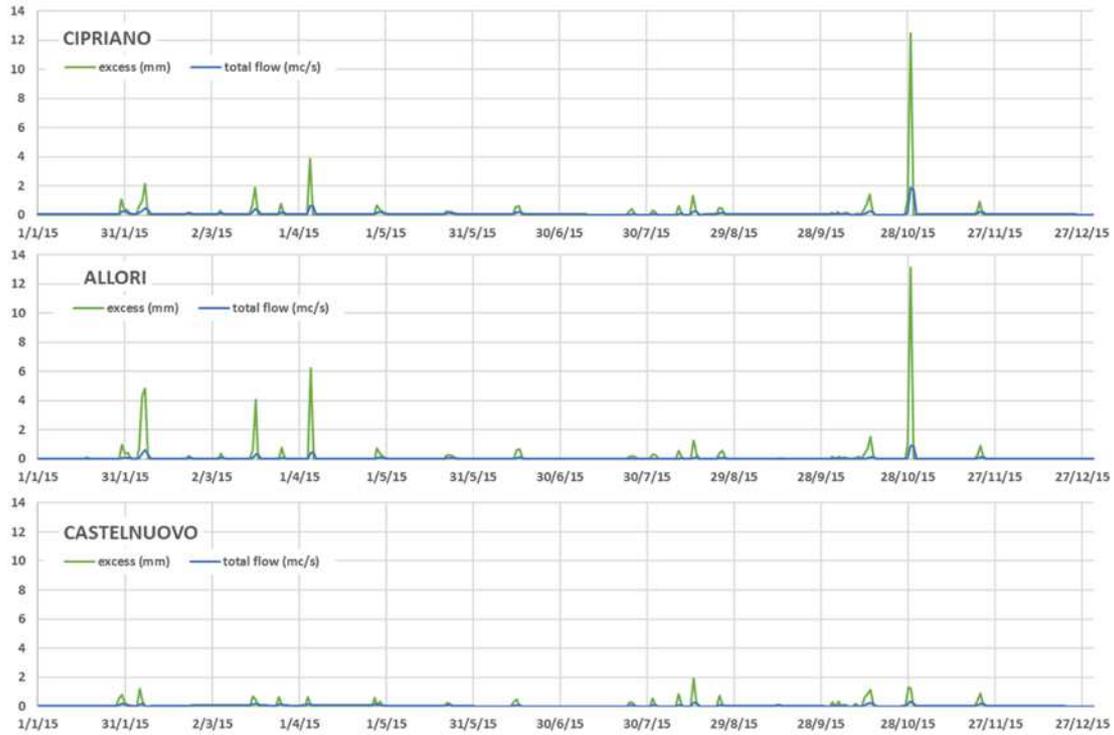


Figura 154 – Risultati della modellazione idrologica dell’anno 2015: *excess* (mm di precipitazione ‘utile’, al netto delle perdite per infiltrazione) e *total flow* (m³/s di deflusso totale ai laghi).

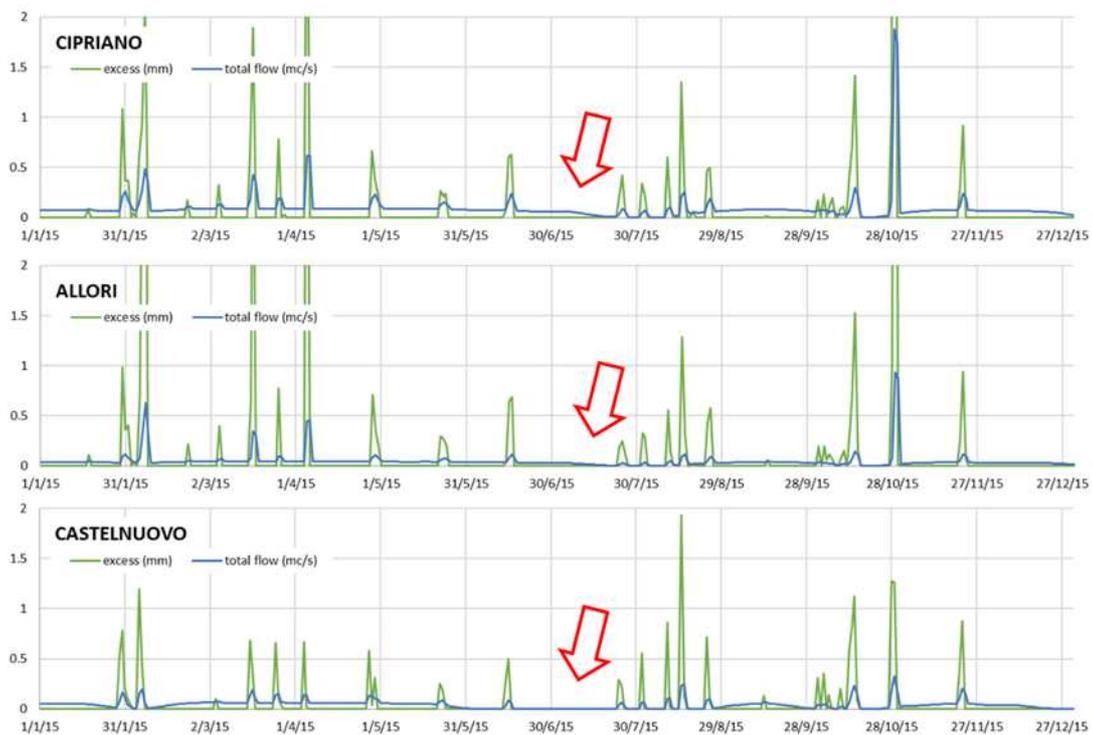


Figura 155 – DETTAGLIO dei risultati della modellazione idrologica dell’anno 2015: *excess* (mm di precipitazione ‘utile’, al netto delle perdite per infiltrazione) e *total flow* (m³/s di deflusso totale ai laghi).

7.4 Modellazione del bilancio biochimico del lago di San Cipriano

7.4.1 Dati di input utilizzati

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di San Cipriano è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico dedotte dall'analisi dei dati meteorologici rilevati nel periodo 1/9/1992 – 31/12/2019.

Le concentrazioni dei parametri delle acque affluenti al lago sono dedotte dalle misure stagionali di qualità dell'acqua degli immissari al bacino (paragrafo 7.1.1 che riporta l'analisi dei dati delle campagne di misura autunno 2014 - autunno 2019) sulla base delle quali sono stati calcolati i valori stagionali di concentrazione (TABELLA 33) attribuiti alle portate immesse nel lago (parametri di input al modello matematico).

TABELLA 33 – Concentrazioni stagionali assunte per le portate in ingresso al lago di San Cipriano.

	concentrazione immissari lago S. CIPRIANO			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.
BOD5 (mg/l)	2.04	3.40	0.87	0.24
P tot (mg/l)	0.0230	0.0092	0.0216	0.0525
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	133.1	96.4	60.0	57.7
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	21.7	100.0	310.0	19.7
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	205.4	164.0	93.0	2660.9

Come condizione iniziale del lago sono stati assunti i valori misurati nella campagna estiva 2015 dal momento che la simulazione inizia il 1°settembre (TABELLA 34).

TABELLA 34 – Concentrazioni iniziali nel lago San Cipriano.

	concentrazione iniziale lago S.CIPRIANO
BOD5 (mg/l)	3.13
P tot (mg/l)	0.0367
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	120
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	10
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	210

7.4.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di San Cipriano sotto il profilo delle variazioni di concentrazione di BOD₅, fosforo totale, *Escherichia coli* e Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate. In analogia a quanto fatto nella presentazione dei risultati della modellazione termica dei laghi (cap. 5), anche i grafici che illustrano l'evoluzione delle concentrazioni contengono quelle misurate nelle varie campagne condotte da CESI, da CIERRE e da ARPAT (<http://sira.arpato.toscana.it> dati di monitoraggio ARPAT per acque destinate alla potabilizzazione, POT, e acque superficiali, MAS) per un confronto diretto tra previsioni numeriche e misure in campo. Tale confronto, nelle more delle inevitabili schematizzazioni numeriche, è in realtà possibile solo per il lago di San Cipriano che presenta, oggi, caratteristiche simili a quelle ipotizzate nel futuro progetto di riassetto dell'area oggetto della presente verifica numerica.

Dalla Figura 156 alla Figura 160 sono illustrati gli andamenti temporali modellati per questi parametri e nella TABELLA 35 sono riportate le relative medie mensili riprese anche in Figura 161.

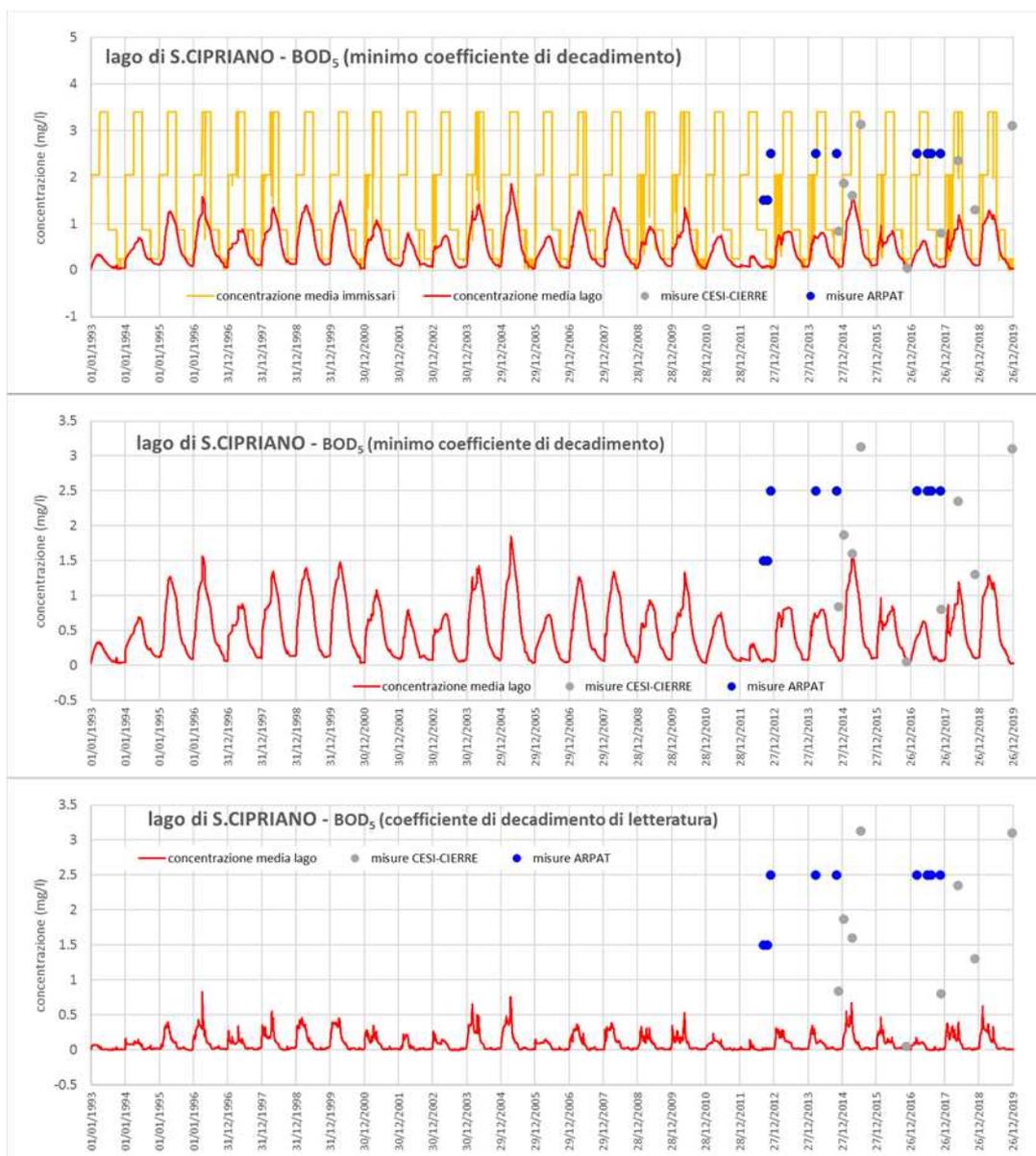


Figura 156 – Lago di San Cipriano; BOD₅ assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($C_{BOD5} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($C_{BOD5} = 0.18$ in paragrafo 7.2).

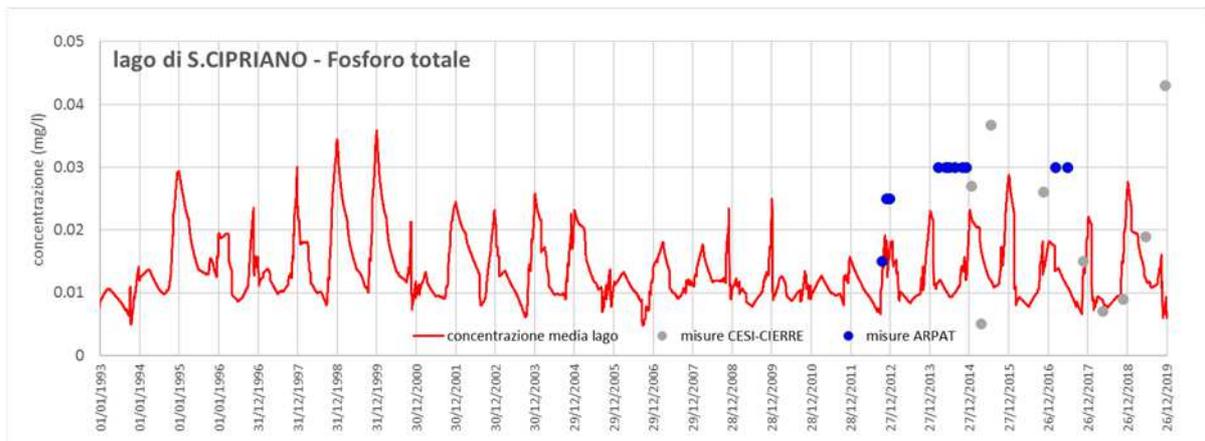
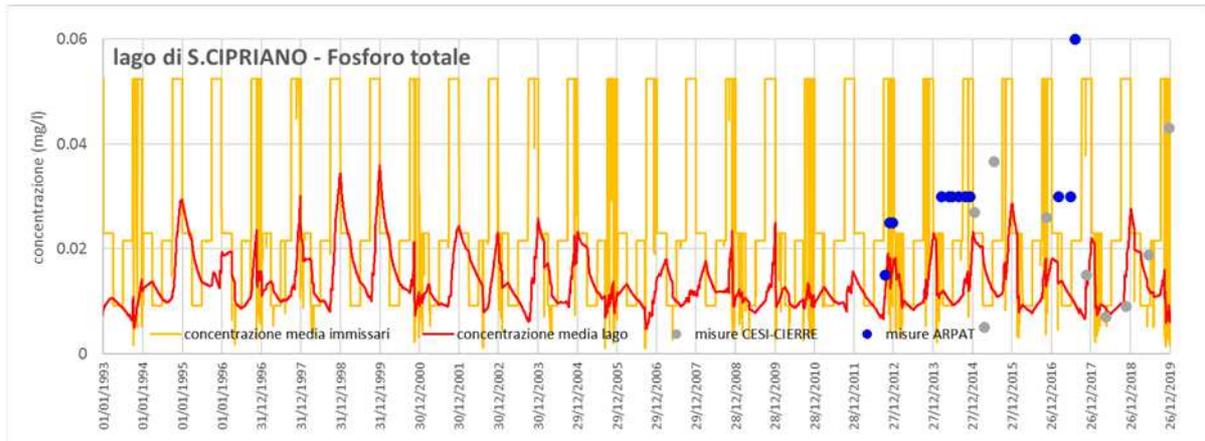


Figura 157 – Lago di San Cipriano; Fosforo totale.

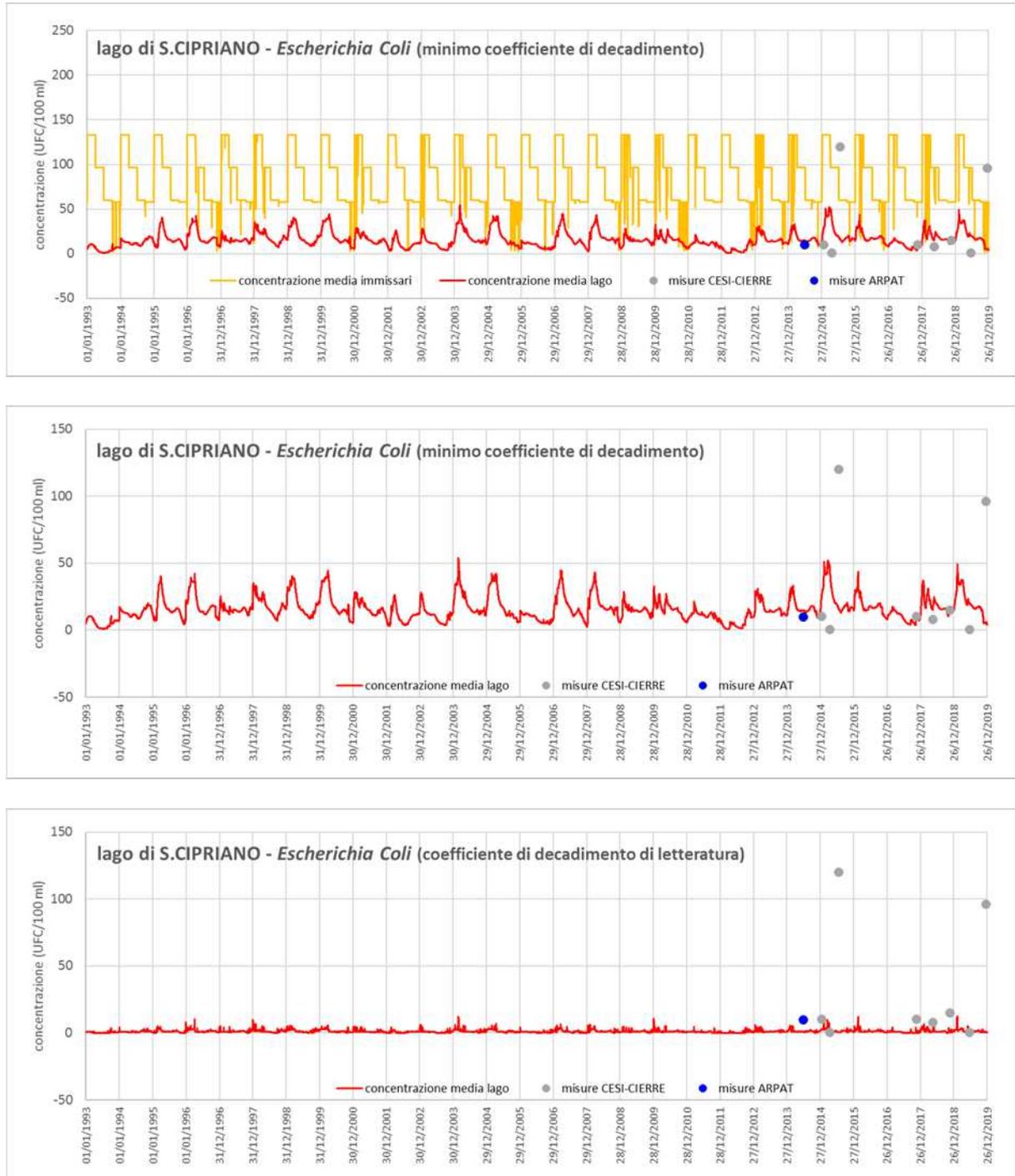


Figura 158 – Lago di San Cipriano; *Escherichia coli* assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

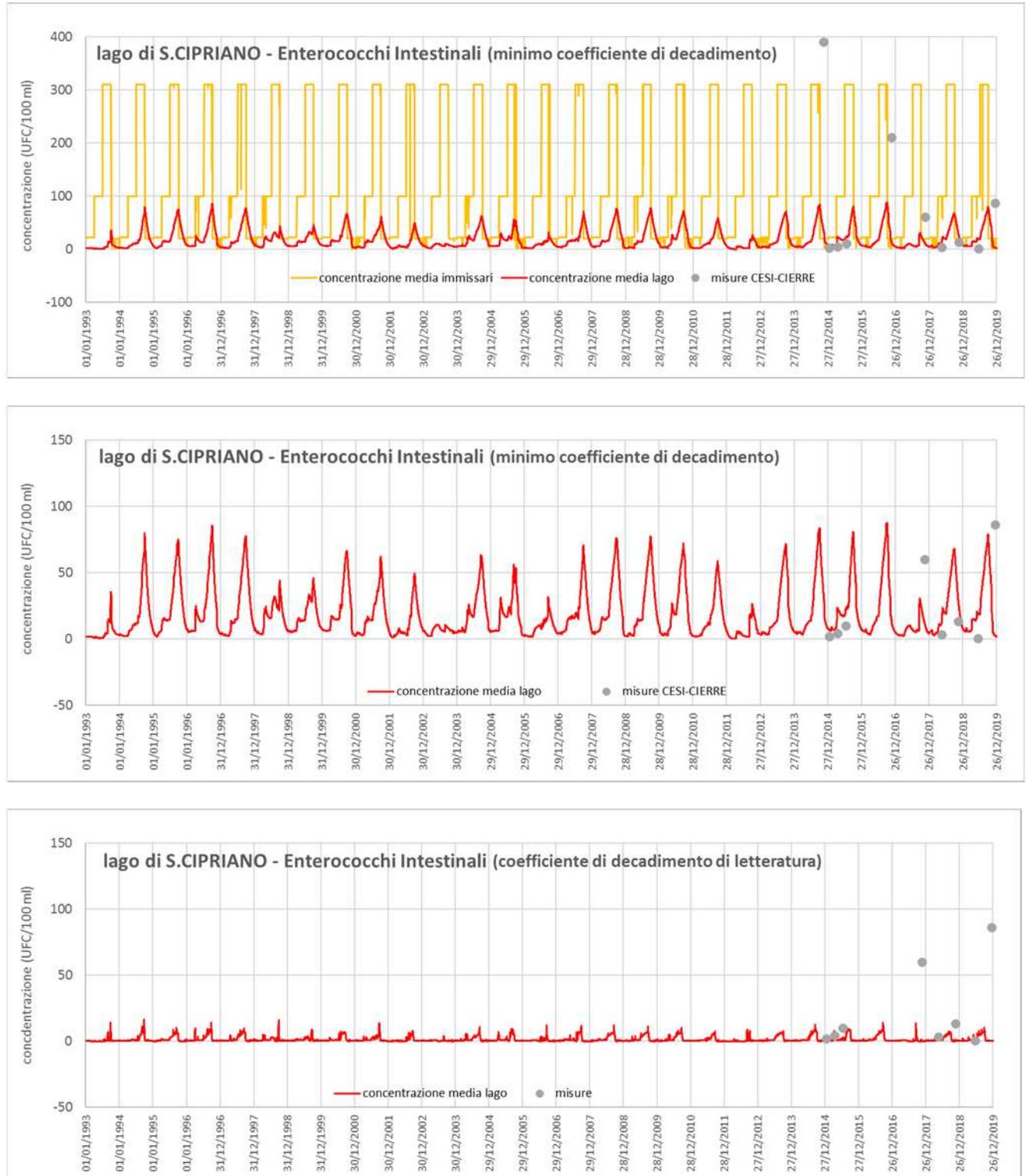


Figura 159 – Lago di San Cipriano; Enterococchi intestinali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

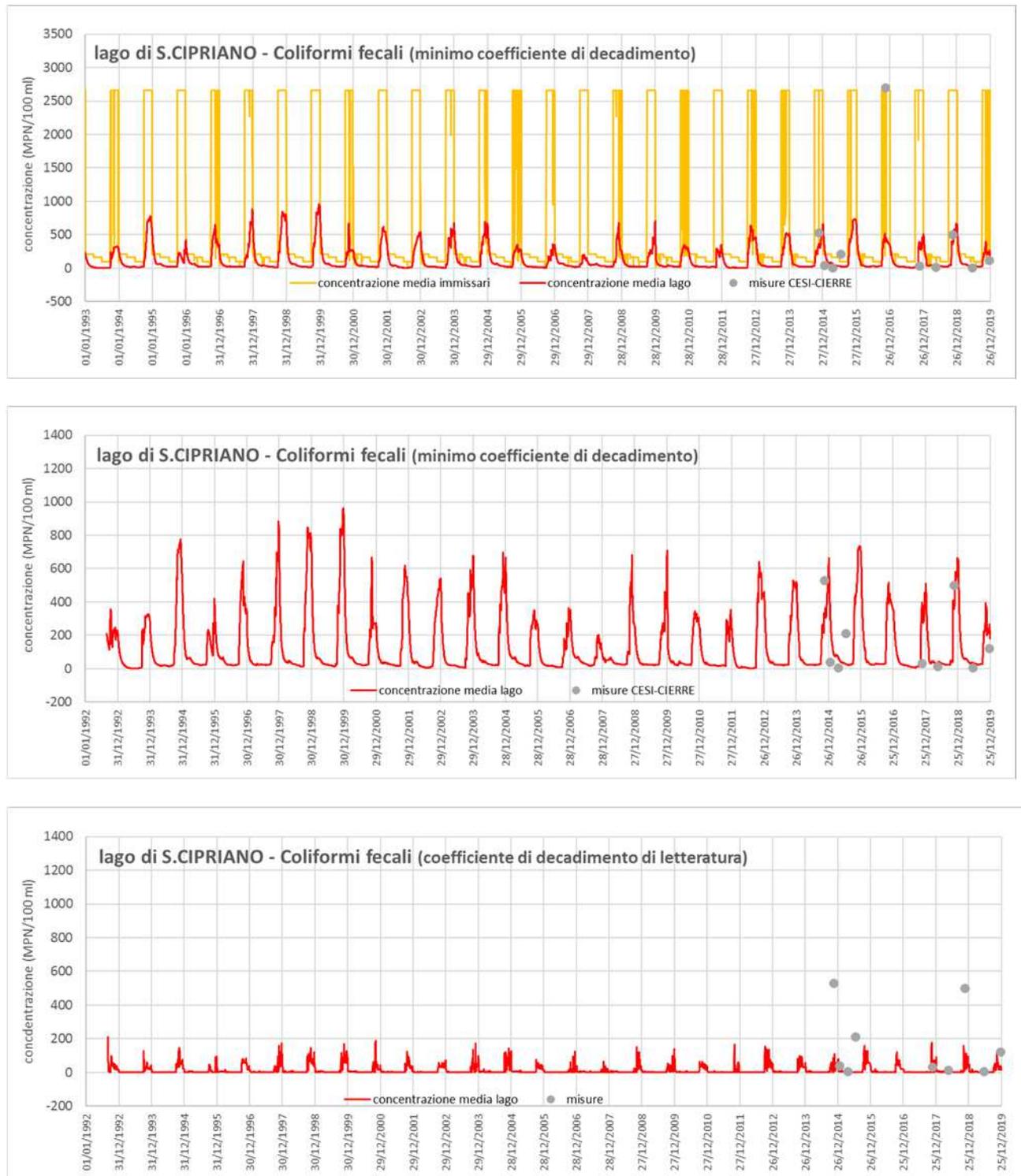


Figura 160 – Lago di San Cipriano; Coliformi fecali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

TABELLA 35 – Risultati della modellazione della qualità dell’acqua del bacino di San Cipriano (valori medi mensili) riferiti, cautelativamente, ai minimi coefficienti di decadimento.

Lago di S. CIPRIANO					
concentrazioni medie mensili					
	BOD ₅ (mg/l)	Ptot (mg/l)	<i>Ecoli</i> (UFC/100ml)	Enterococchi (UFC/100ml)	Coliformi (MPN/100ml)
GEN	0.339	0.018	18.828	4.611	230.503
FEB	0.617	0.016	23.539	4.092	68.174
MAR	0.756	0.015	24.983	4.118	44.021
APR	0.933	0.014	21.489	10.420	35.623
MAG	0.944	0.012	16.057	13.101	27.054
GIU	0.830	0.011	14.179	13.327	24.027
LUG	0.562	0.010	12.107	20.424	20.238
AGO	0.313	0.010	11.121	33.931	18.062
SET	0.213	0.010	12.553	51.971	19.910
OTT	0.147	0.012	12.855	42.970	177.648
NOV	0.094	0.015	11.998	18.442	398.697
DIC	0.078	0.018	10.506	7.305	444.381
media annua	0.486	0.013	15.851	18.726	125.695

Nelle condizioni ipotizzate, all’interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.5 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.010 e 0.018 mg/l (media annua di circa 0.013 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 10.506 e 24.983 UFC/100 ml (media annua di 15.9 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 4.092 e 51.971 UFC/100 ml (media annua intorno a 18.7 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 18.062 e 444.381 MPN/100 ml (media annua intorno a 125.7 MPN/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella TABELLA 33, la permanenza nell’invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) generalmente in un miglioramento della qualità dell’acqua rispetto a quella dell’affluente.

Considerando sia i dati disponibili della rete di Monitoraggio Ambientale delle Acque Superficiali Interne (Fiumi e Laghi) di ARPAT relativi alla stazione MAS-619 Lago di S. Cipriano (BOD₅, fosforo totale e *Escherichia coli*), sia i dati delle campagne CESI e CIERRE si osserva che le previsioni del modello sono generalmente confrontabili e dello stesso ordine di grandezza.

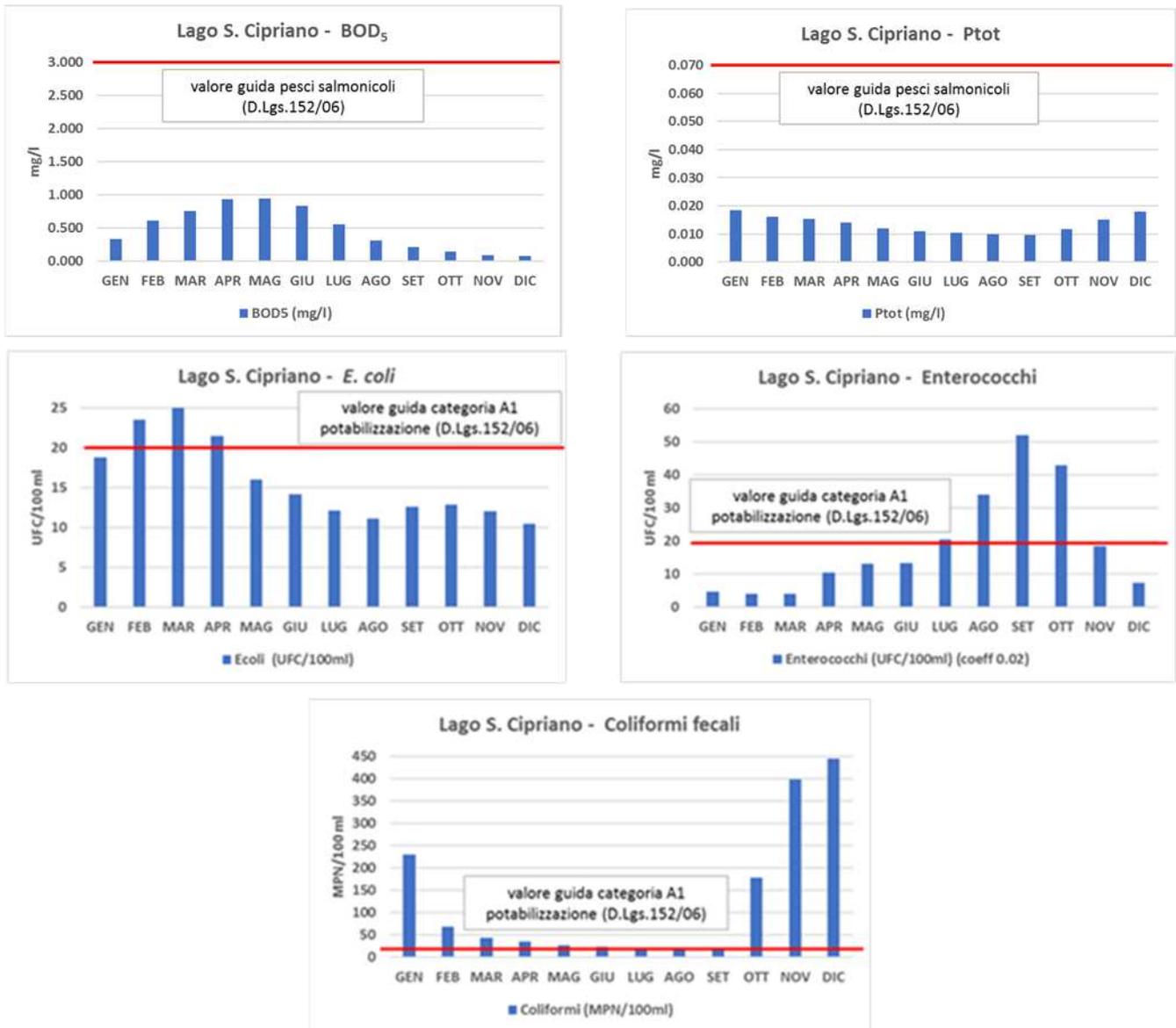


Figura 161 – Modellazione bio-chimica del lago di San Cipriano: valori medi mensili.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'ittiofauna, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli.

TABELLA 36 – Limiti previsti per BOD₅ e Fosforo totale nelle acque dolci superficiali dal DLgs n° 152/06 ai fini della tutela della fauna ittica.

Parametro	Unità di Misura	Acque per Salmonidi		Acque per Ciprinidi	
		Guida	Imperativo	Guida	Imperativo
BOD ₅	mg/l	3	5	6	9
Fosforo totale	mg/l P	0.07	Limite non previsto	0.14	Limite non previsto
<i>Escherichia coli</i>	UFC/100 ml	Limite non previsto	Limite non previsto	Limite non previsto	Limite non previsto

In caso di prelievo a scopo idropotabile, il DLgs n° 152/06 stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi TABELLA 37).

TABELLA 37 – Limiti previsti per i parametri selezionati dal DLgs n° 152/06 per le varie categorie di qualità dell'acqua da avviare a potabilizzazione.

Parametro	Unità di misura	Categoria A1		Categoria A2		Categoria A3	
		Guida	Imperativo	Guida	Imperativo	Guida	Imperativo
BOD ₅	mg/l	< 3	Limite non previsto	< 5	Limite non previsto	< 7	Limite non previsto
Fosforo totale	mg/l P	Limite non previsto					
Coliformi fecali*	UFC/100 ml	20	Limite non previsto	2000	Limite non previsto	20000	Limite non previsto
Enterococchi intestinali**	UFC/100 ml	20	Limite non previsto	1000	Limite non previsto	10000	Limite non previsto

* limiti assunti anche per *Escherichia coli*

** i limiti considerati fanno riferimento a quelli previsti dal decreto per gli streptococchi fecali

LEGENDA

Categoria	Trattamenti di potabilizzazione richiesti
A1	Trattamento fisico semplice e disinfezione
A2	Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione
A3	Trattamento fisico e chimico spinto, affinazione e disinfezione

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione idropotabile delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi TABELLA 37), le concentrazioni medie annue dei parametri in esame rispettano generalmente i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento fisico semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano, ad eccezione del parametro Coliformi fecali che indica invece la necessità di un trattamento previsto per la categoria A2.

I valori medi mensili stimati presentano, invece, qualche superamento dei limiti previsti per la categoria A1 per *Escherichia coli*, Enterococchi e, soprattutto, per il parametro Coliformi fecali.

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti (TABELLA 38).

TABELLA 38 – Limiti previsti per i parametri selezionati dal D.M. 30/03/2010 ai fini della balneabilità delle acque interne.

Valori limite per un singolo campione in acque interne	
PARAMETRI	VALORI
Enterococchi intestinali	500 n*100 ml
<i>Escherichia coli</i>	1000 n*/100 ml

*n=UFC EN ISO 9308-1 (*E. coli*) e EN ISO 7899-2 (Enterococchi) o MPN per EN ISO 9308-3 (*E. coli*) e EN ISO 7899-1 (Enterococchi)

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

7.5 SCENARIO A - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori

7.5.1 Dati di input utilizzati

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Allori è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico dedotte dall'analisi dei dati meteorologici rilevati nel periodo 1/9/1992 – 31/12/2019.

Le concentrazioni dei parametri delle acque affluenti al lago sono dedotte dalle misure stagionali di qualità dell'acqua degli immissari al bacino (paragrafo 7.1.1 che riporta l'analisi dei dati delle campagne di misura autunno 2014 - autunno 2019) sulla base delle quali sono stati calcolati i valori stagionali di concentrazione (TABELLA 39) attribuiti alle portate immesse nel lago (parametri di input al modello matematico).

TABELLA 39 – Concentrazioni stagionali assunte per le portate in ingresso al lago di Allori.

	concentrazione immissari lago ALLORI			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.
BOD5 (mg/l)	1.62	2.76	0.42	0.10
P tot (mg/l)	0.0161	0.0277	0.0167	0.0250
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	36.3	79.9	310.0	71.3
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	8.5	114.9	920.0	12.6
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	92.5	131.8	780.0	1156.1

Come condizione iniziale del lago sono stati assunti i valori misurati nella campagna estiva 2015 dal momento che la simulazione inizia il 1° settembre (TABELLA 40).

TABELLA 40 – Concentrazioni iniziali nel lago Allori.

	concentrazione iniziale lago ALLORI
BOD5 (mg/l)	0.48
P tot (mg/l)	0.0104
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	320
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	420
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	460

7.5.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Dalla Figura 162 alla Figura 166 sono illustrati gli andamenti temporali previsti per questi parametri (valori medi giornalieri) e nella TABELLA 41 sono riportate le relative medie mensili.

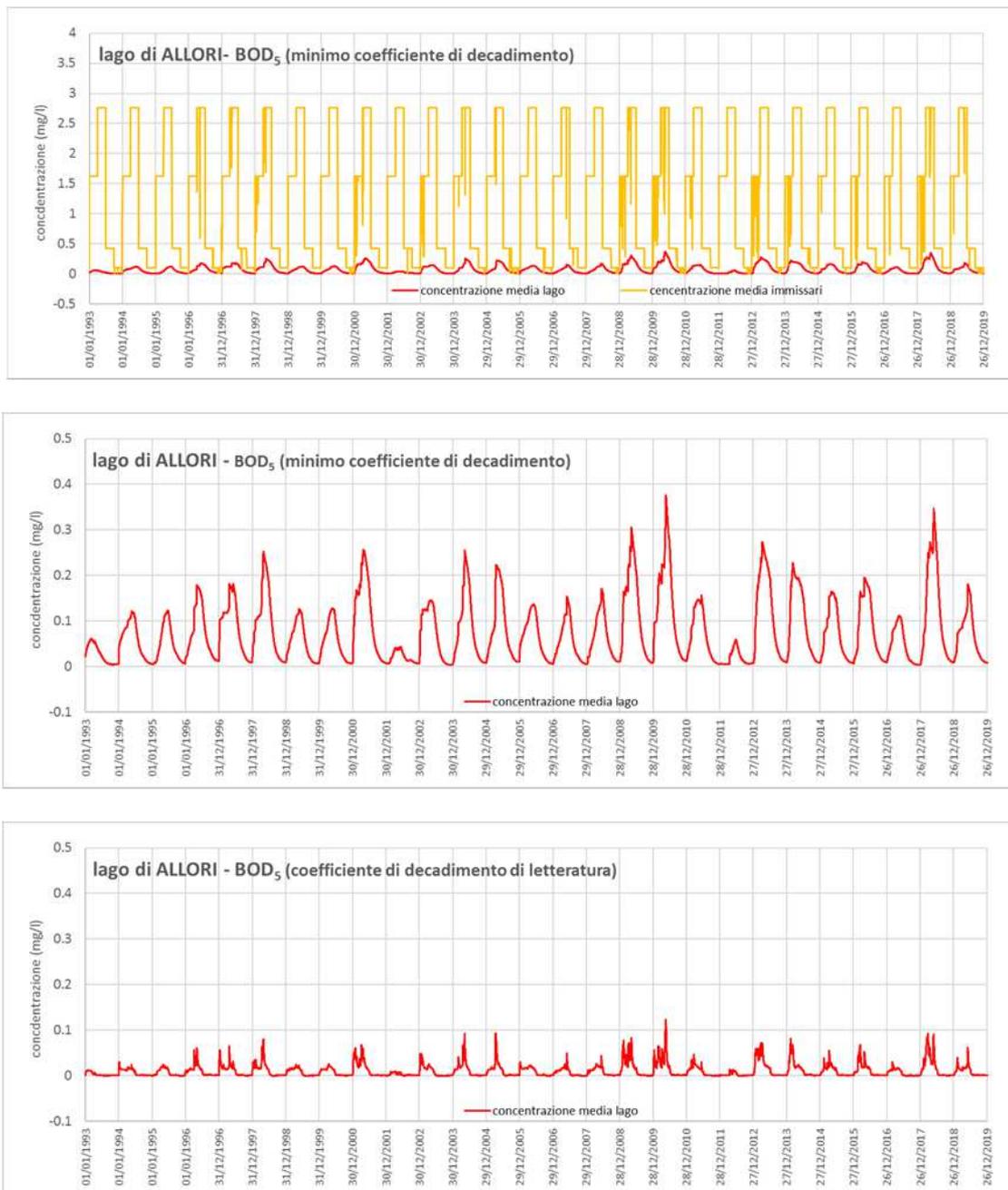


Figura 162 – Lago di Allori; BOD₅ assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{BOD5} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{BOD5} = 0.18$ in paragrafo 7.2).

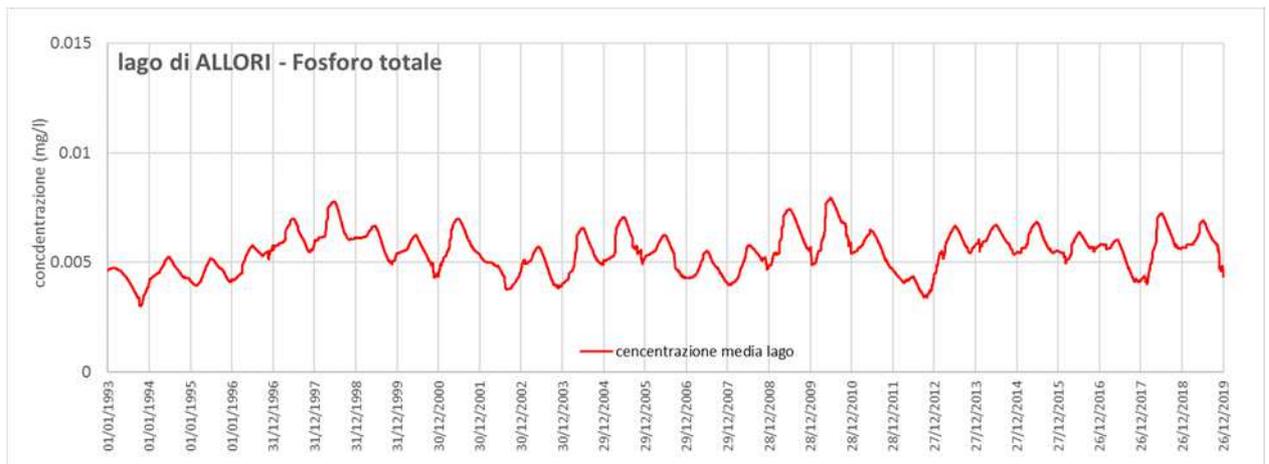
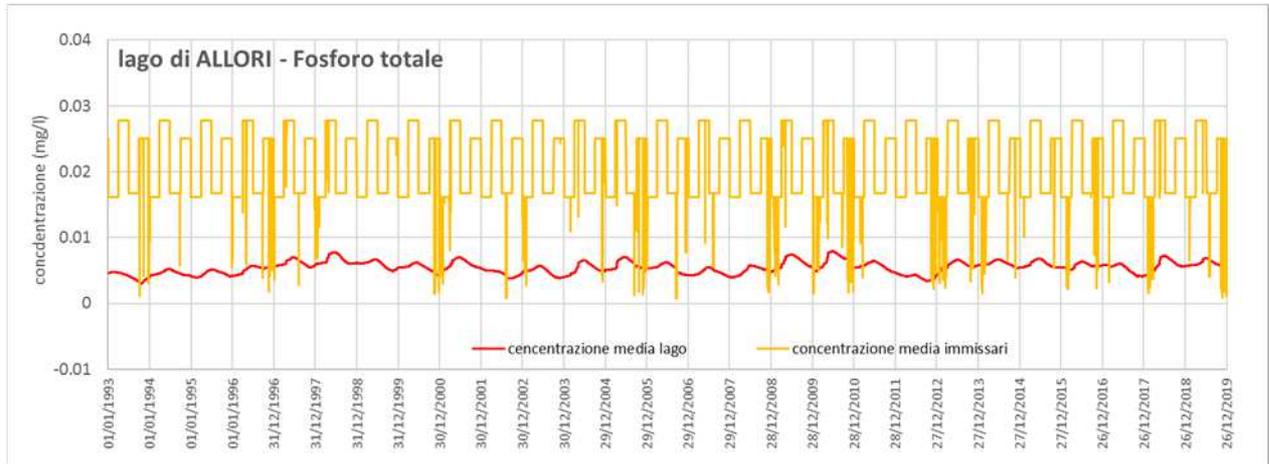


Figura 163 – Lago di Allori; Fosforo totale.

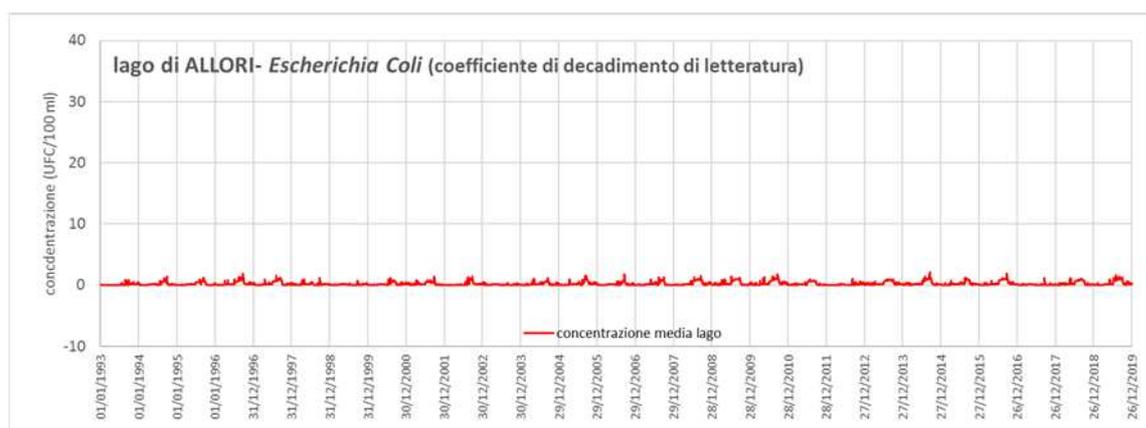
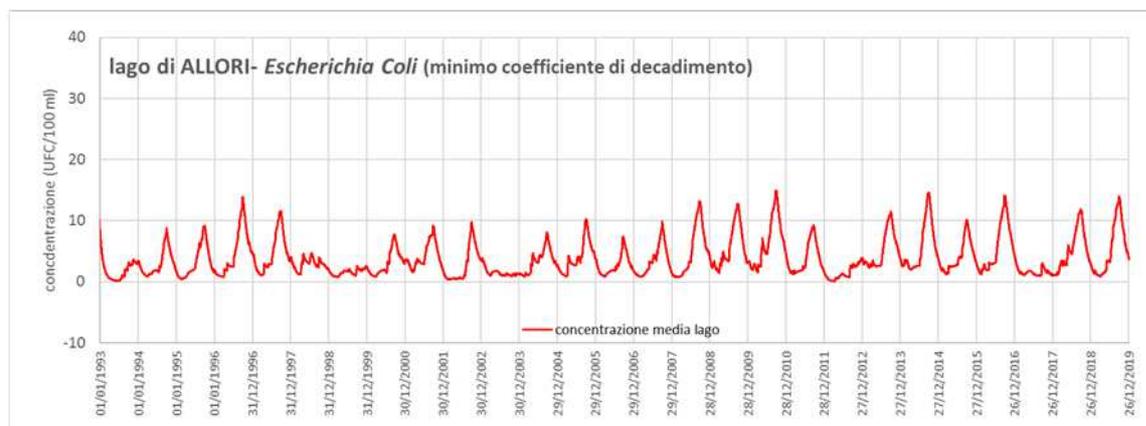
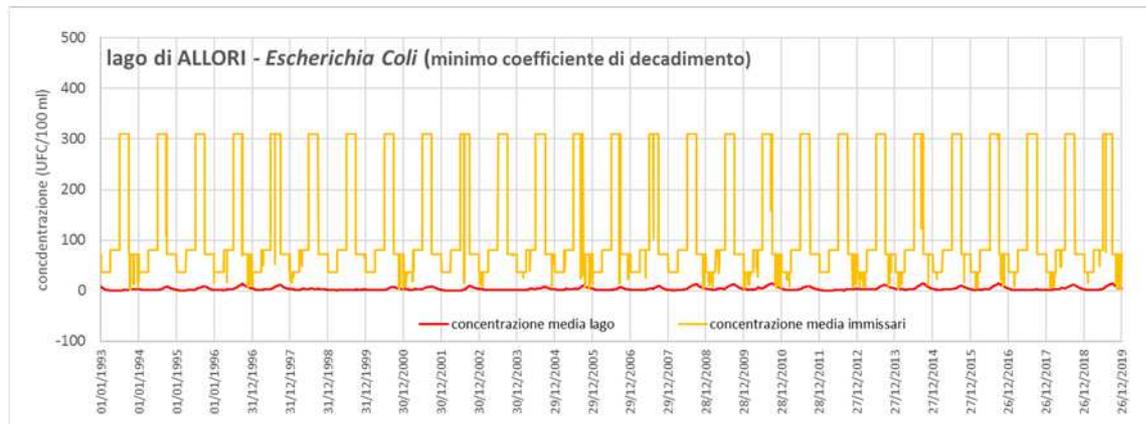


Figura 164 – Lago di Allori; *Escherichia coli* assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

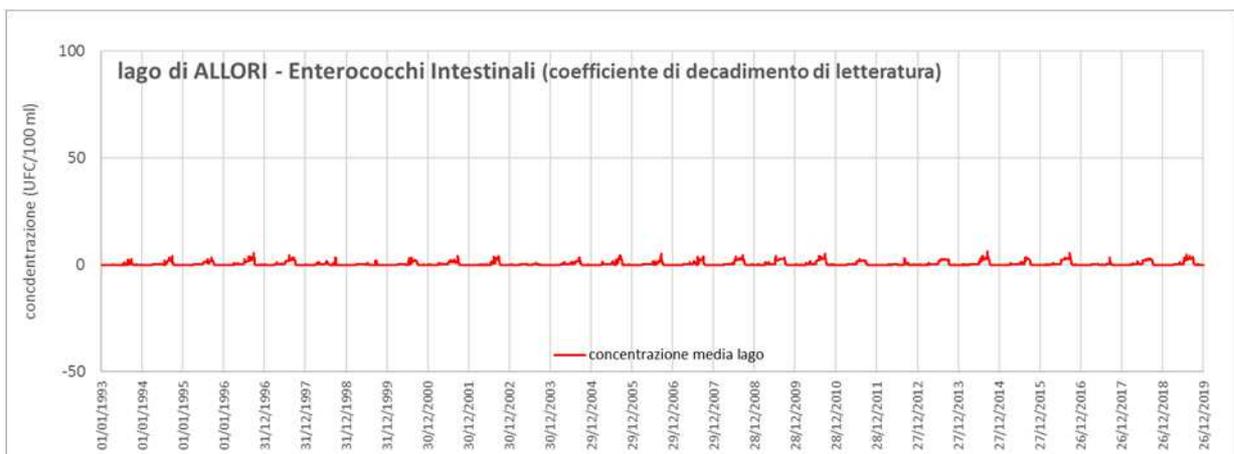
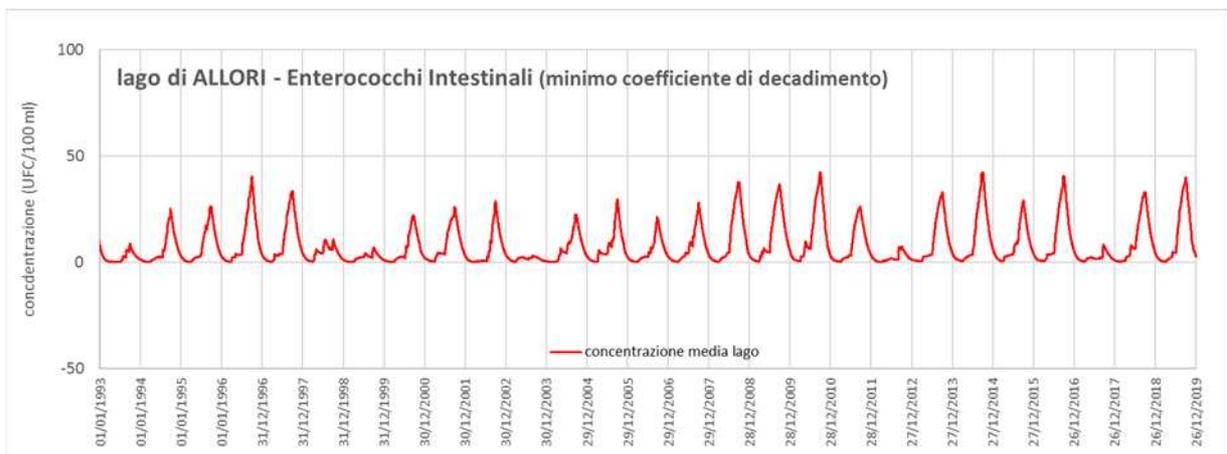
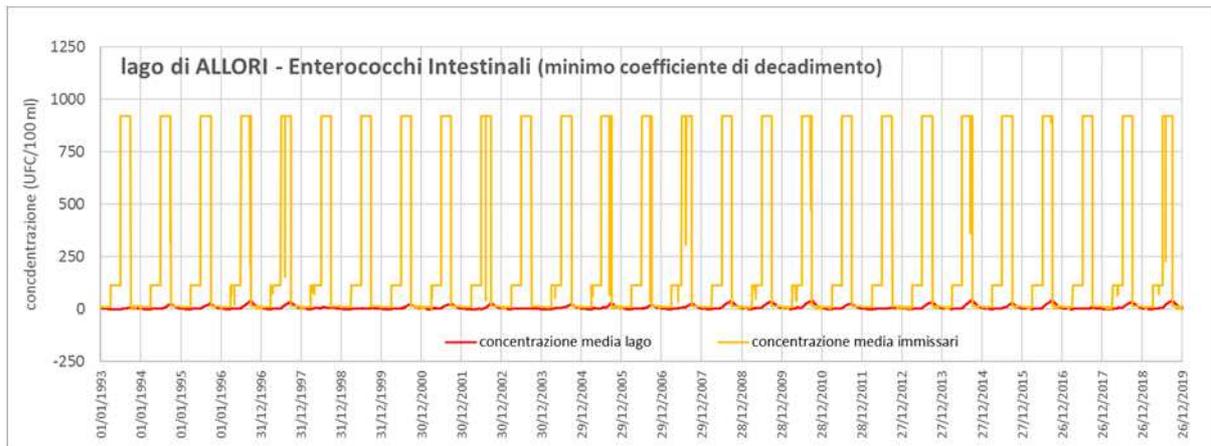


Figura 165 – Lago di Allori; Enterococchi intestinali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

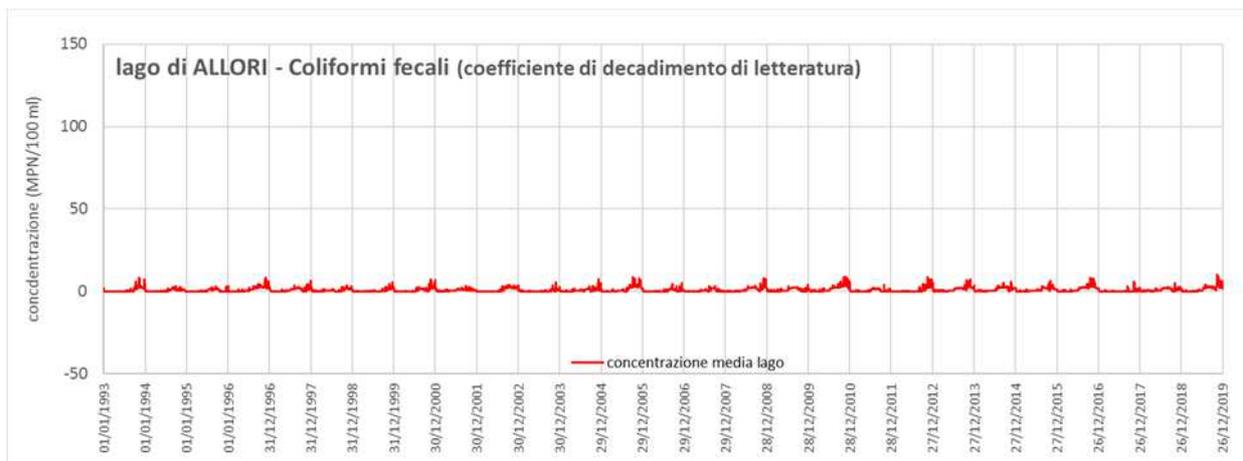
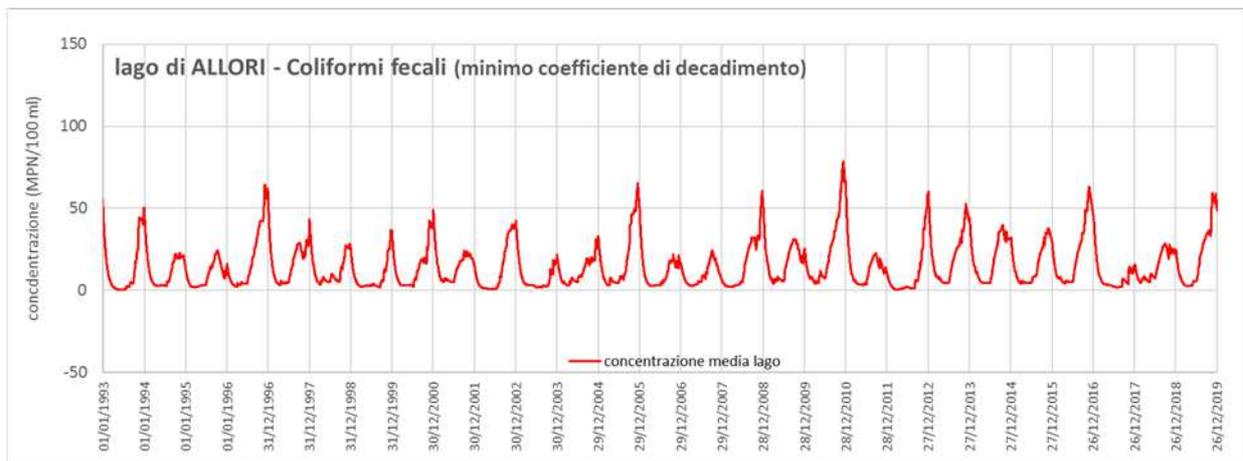
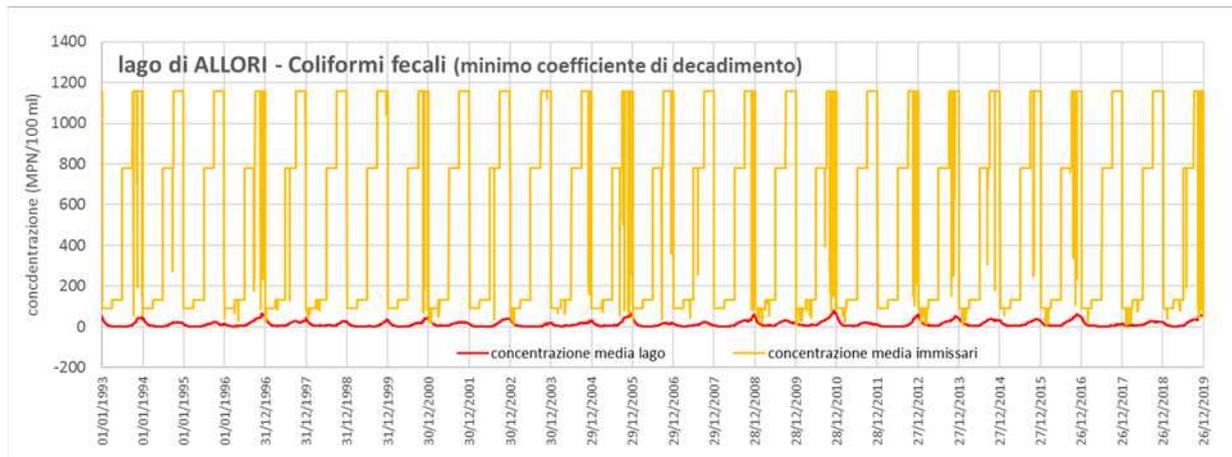


Figura 166 – Lago di Allori; Coliformi fecali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

TABELLA 41 – Risultati della modellazione della qualità dell’acqua del bacino di Allori (medie mensili riferiti, cautelativamente, ai minimi coefficienti di decadimento).

Lago di ALLORI					
concentrazioni medie mensili					
	BOD₅ (mg/l)	Ptot (mg/l)	Ecoli (UFC/100ml)	Enterococchi (UFC/100ml)	Coliformi (MPN/100ml)
GEN	0.036	0.005	2.343	2.009	21.522
FEB	0.077	0.005	1.576	0.829	8.749
MAR	0.106	0.005	1.312	0.445	4.724
APR	0.137	0.006	1.742	1.705	3.922
MAG	0.163	0.006	2.355	3.098	4.262
GIU	0.154	0.006	2.494	3.459	4.281
LUG	0.104	0.006	3.772	8.311	7.986
AGO	0.055	0.006	5.791	15.460	13.671
SET	0.031	0.005	8.137	23.076	19.915
OTT	0.018	0.005	7.351	19.885	24.511
NOV	0.011	0.005	4.878	10.555	29.714
DIC	0.008	0.005	3.374	4.739	33.593
media annua	0.075	0.005	3.760	7.798	14.738

Nelle condizioni ipotizzate, all’interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.075 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.005 mg/l e 0.006 mg/l (media annua pari a 0.005 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.312 e 8.137 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.8 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.445 e 23.076 UFC/100 ml (media annua intorno a 7.8 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 3.922 e 33.593 MPN/100 ml (media annua intorno a 14.7 MPN/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella TABELLA 39, la permanenza nell’invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) in un generale miglioramento della qualità dell’acqua rispetto a quella dell’affluente.

7.6 SCENARIO A - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo

7.6.1 Dati di input utilizzati

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Castelnuovo è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico dedotte dall'analisi dei dati meteorologici rilevati nel periodo 1/9/1992 – 31/12/2019.

Le concentrazioni dei parametri delle acque affluenti al lago sono dedotte dalle misure stagionali di qualità dell'acqua degli immissari al bacino sulla base dei quali sono stati calcolati i valori stagionali di concentrazione (TABELLA 42) attribuiti alle portate immesse nel lago (parametri di input al modello matematico).

TABELLA 42 – Concentrazioni stagionali assunte per le portate in ingresso al lago di Castelnuovo.

	concentrazione immissari lago CASTELNUOVO			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.
BOD5 (mg/l)	1.24	1.51	16.64	0.19
P tot (mg/l)	0.0521	0.0573	1.3706	0.1368
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	208.7	3143.1	10034.4	1776.5
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	470.0	5893.9	23248.0	566.6
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	276.4	1834.0	13320.0	52831.9

Come condizione iniziale del lago sono stati assunti i valori misurati nella campagna estiva 2015 dal momento che la simulazione inizia il 1° settembre (TABELLA 43).

TABELLA 43 – Concentrazioni iniziali nel lago Castelnuovo.

	concentrazione iniziale lago CASTELNUOVO
BOD5 (mg/l)	1.59
P tot (mg/l)	0.0254
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	10
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	8
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	20

7.6.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, della presenza di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Dalla Figura 167 alla Figura 171 sono illustrati gli andamenti temporali modellati per questi parametri e nella TABELLA 44 sono riportate le relative medie mensili.

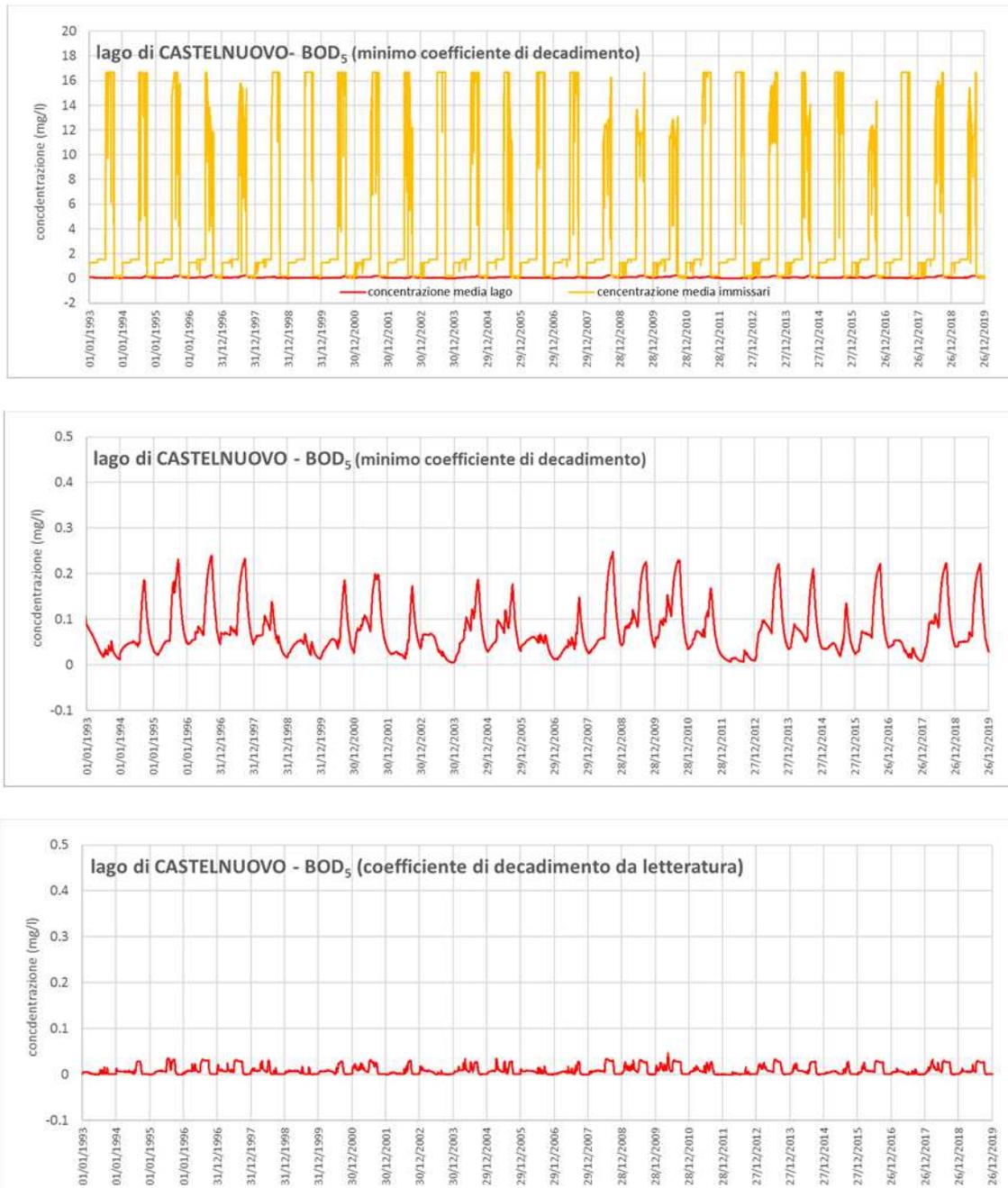


Figura 167 – Lago di Castelnuovo; BOD₅ assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{BOD5} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{BOD5} = 0.18$ in paragrafo 7.2).

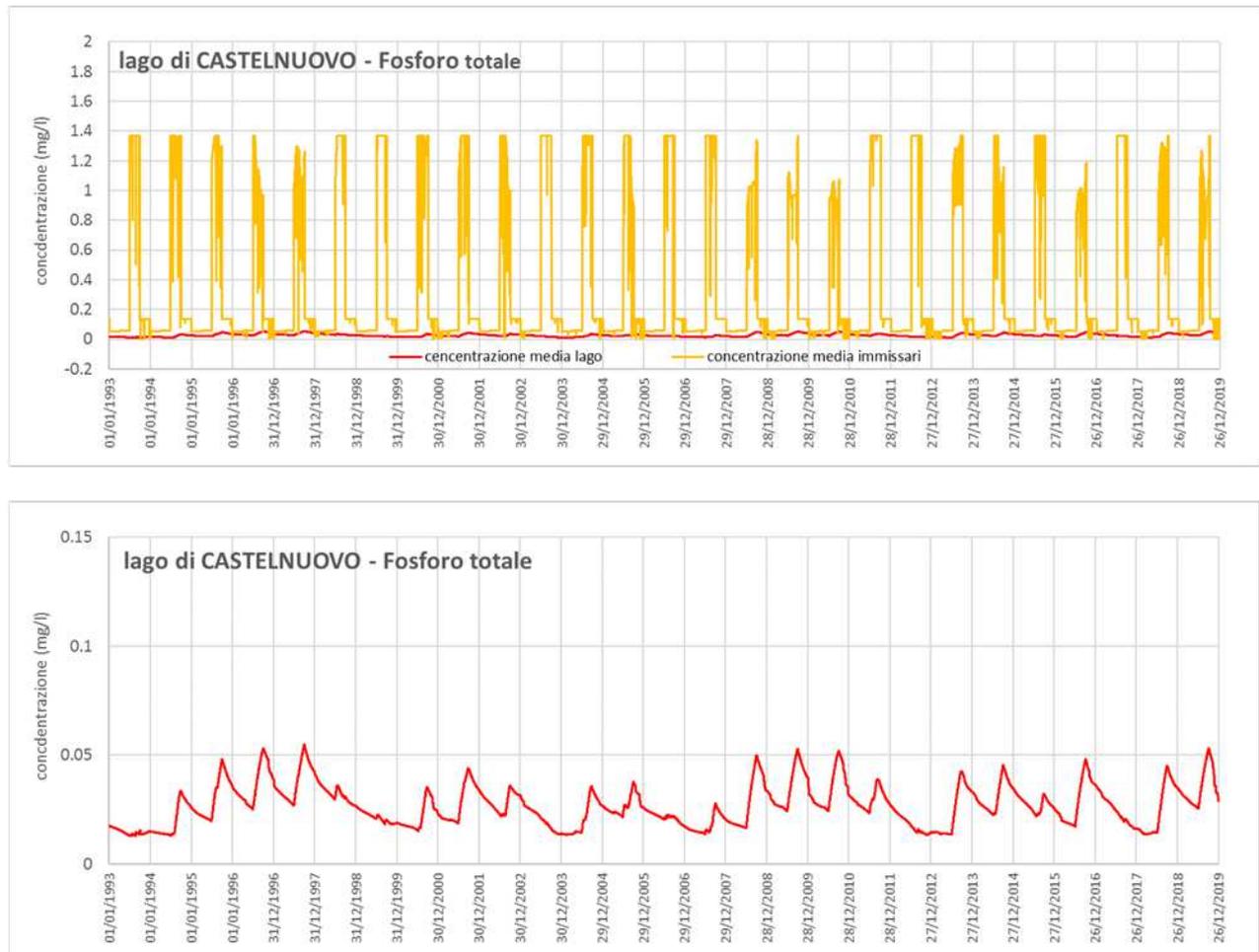


Figura 168 – Lago di Castelnuovo; Fosforo totale.

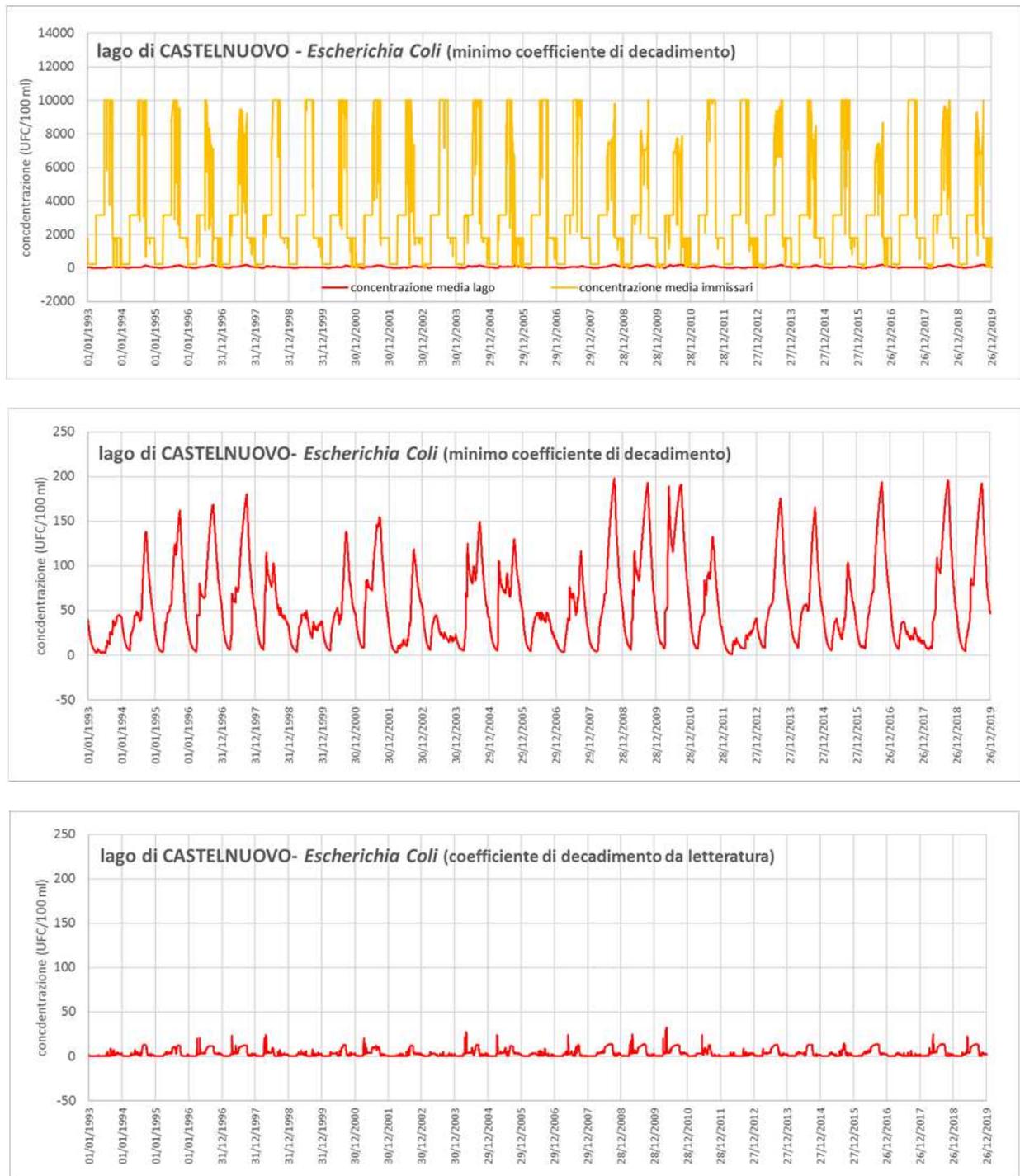


Figura 169 – Lago di Castelnuovo; *Escherichia coli* assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

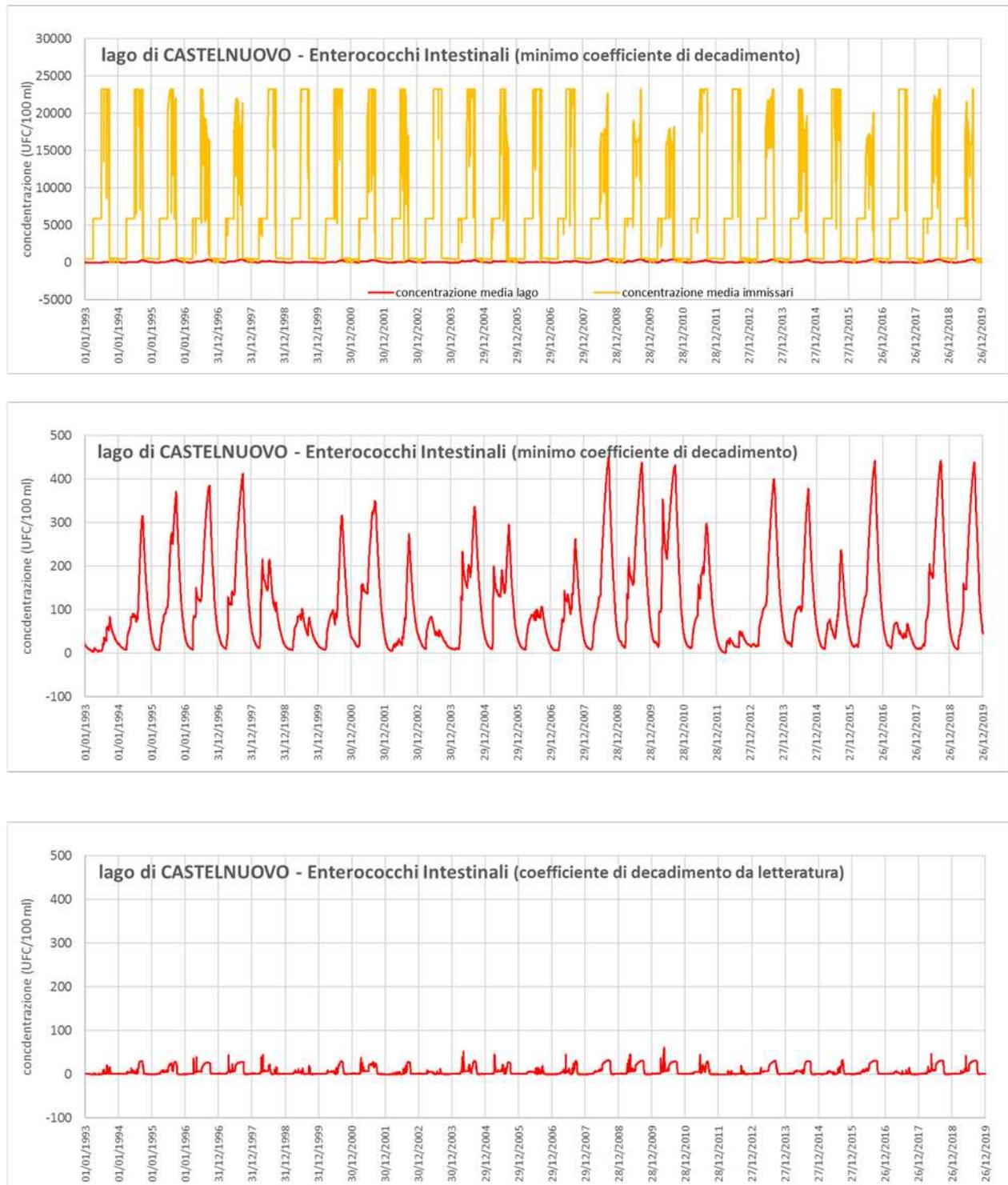


Figura 170 – Lago di Castelnuovo; Enterococchi intestinali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

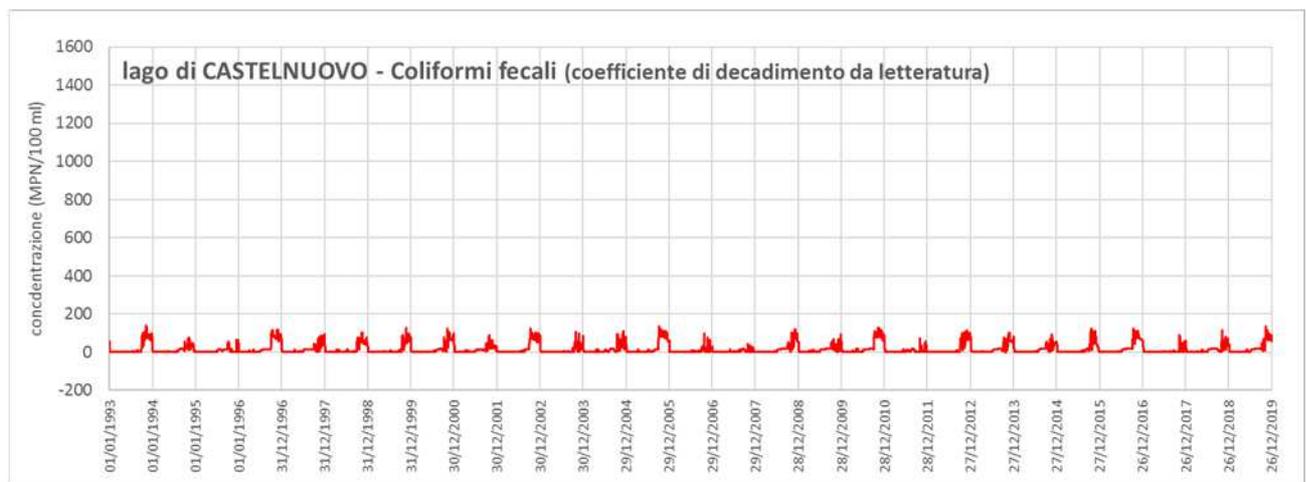
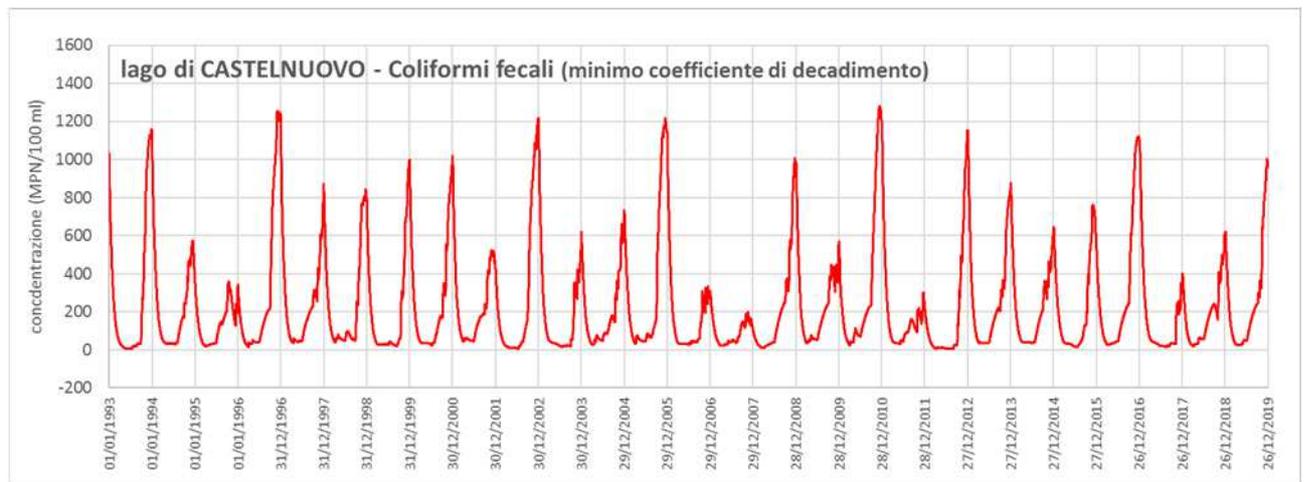
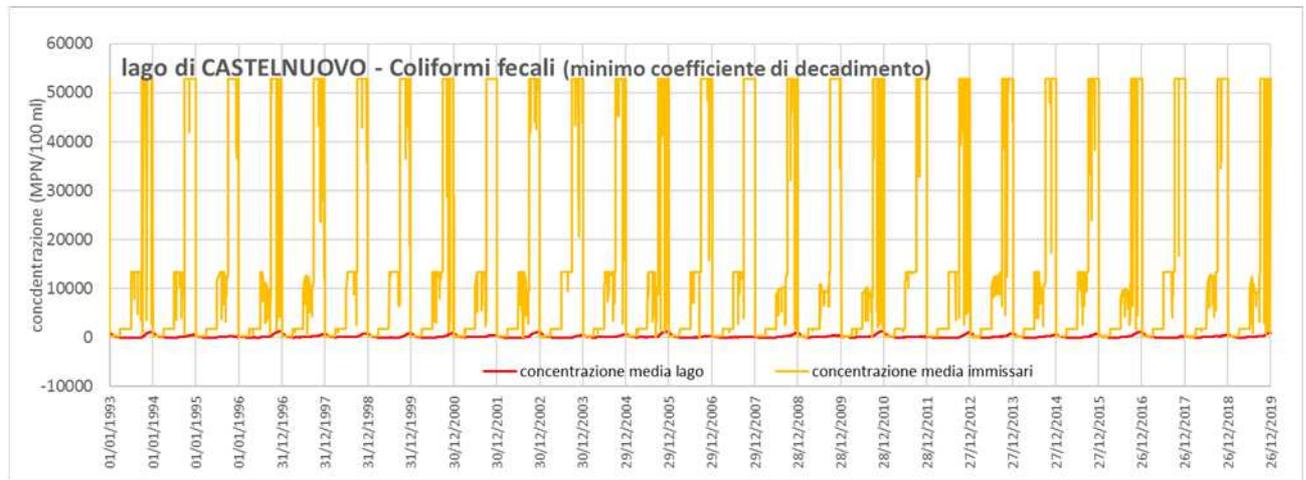


Figura 171 – Lago di Castelnuovo; Coliformi fecali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

TABELLA 44 – Risultati della modellazione della qualità dell’acqua del bacino di Castelnuovo (valori medi mensili) riferiti, cautelativamente, ai minimi coefficienti di decadimento.

Lago di CASTELNUOVO					
concentrazioni medie mensili					
	BOD₅ (mg/l)	Ptot (mg/l)	<i>Ecoli</i> (UFC/100ml)	Enterococchi (UFC/100ml)	Coliformi (MPN/100ml)
GEN	0.037	0.026	25.842	28.510	472.883
FEB	0.047	0.025	11.599	16.063	163.989
MAR	0.056	0.023	6.630	11.695	56.581
APR	0.063	0.023	28.801	54.175	34.595
MAG	0.068	0.022	54.463	102.189	38.320
GIU	0.061	0.021	58.852	110.384	37.206
LUG	0.085	0.023	69.629	142.606	62.396
AGO	0.119	0.029	90.503	198.792	102.675
SET	0.149	0.035	117.206	264.892	144.915
OTT	0.112	0.035	101.430	218.851	301.698
NOV	0.060	0.032	67.317	121.727	542.525
DIC	0.035	0.029	46.268	60.385	711.748
media annua	0.074	0.027	56.545	110.856	222.461

Nelle condizioni ipotizzate, all’interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.074 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.021 e 0.035 mg/l (media annua di circa 0.027 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 0.232 e 9.087 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.267 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.523 e 20.992 UFC/100 ml (media annua di circa 6.337 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 0.308 e 52.817 MPN/100 ml (media annua di circa 15.418 MPN/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella TABELLA 42, la permanenza nell’invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) in un generale miglioramento della qualità dell’acqua rispetto a quella dell’affluente.

7.7 SCENARIO B - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori

7.7.1 Dati di input utilizzati

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Allori è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico dedotte dall'analisi dei dati meteorologici rilevati nel periodo 1/9/1992 – 31/12/2019.

Le concentrazioni dei parametri delle acque affluenti al lago sono dedotte dalle misure stagionali di qualità dell'acqua degli immissari al bacino (paragrafo 7.1.1 che riporta l'analisi dei dati delle campagne di misura autunno 2014 - autunno 2019) sulla base delle quali sono stati calcolati i valori stagionali di concentrazione (TABELLA 45) attribuiti alle portate immesse nel lago (parametri di input al modello matematico).

TABELLA 45 – Concentrazioni stagionali assunte per le portate in ingresso al lago di Allori.

	concentrazione immissari lago ALLORI			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.
BOD5 (mg/l)	1.62	2.76	0.42	0.10
P tot (mg/l)	0.0161	0.0277	0.0167	0.0250
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	36.3	79.9	310.0	71.3
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	8.5	114.9	920.0	12.6
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	92.5	131.8	780.0	1156.1

Come condizione iniziale del lago sono stati assunti i valori misurati nella campagna estiva 2015 dal momento che la simulazione inizia il 1° settembre (TABELLA 46).

TABELLA 46 – Concentrazioni iniziali nel lago Allori.

	concentrazione iniziale lago ALLORI
BOD5 (mg/l)	0.48
P tot (mg/l)	0.0104
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	320
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	420
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	460

7.7.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Allori sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Dalla Figura 172 alla Figura 176 sono illustrati gli andamenti temporali previsti per questi parametri (valori medi giornalieri) e nella TABELLA 47 sono riportate le relative medie mensili.

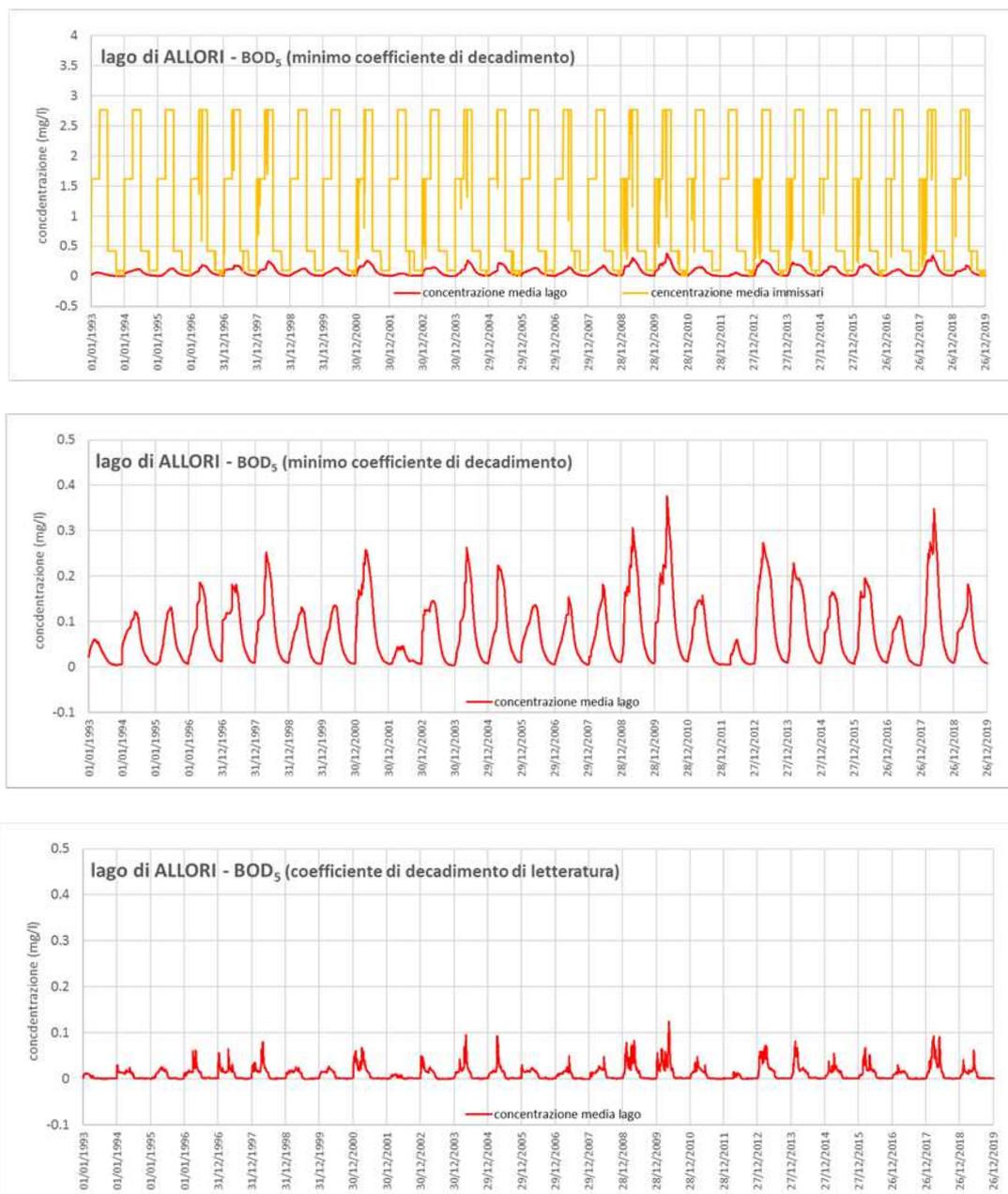


Figura 172 – Lago di Allori; BOD₅ assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{BOD5} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{BOD5} = 0.18$ in paragrafo 7.2).



Figura 173 – Lago di Allori; Fosforo totale.

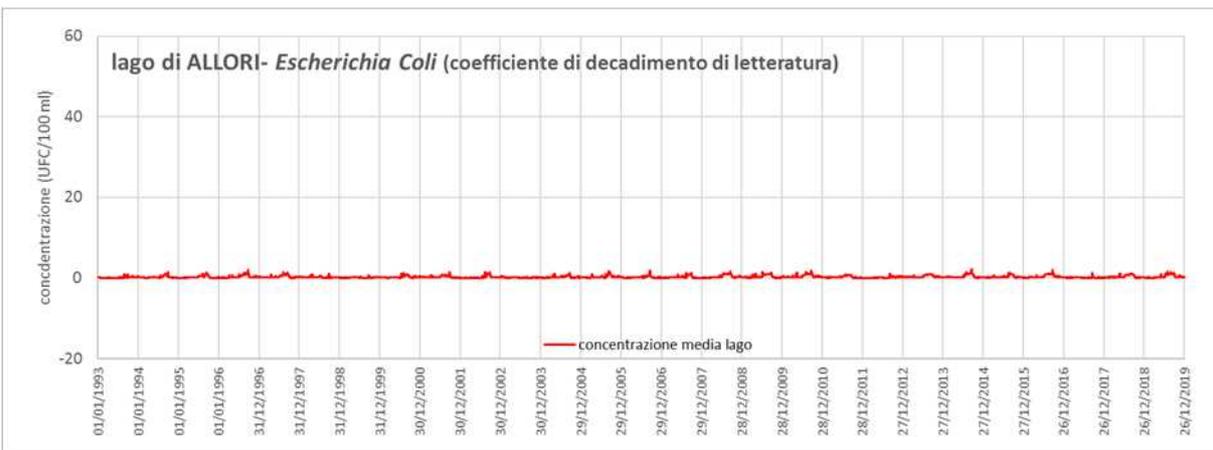
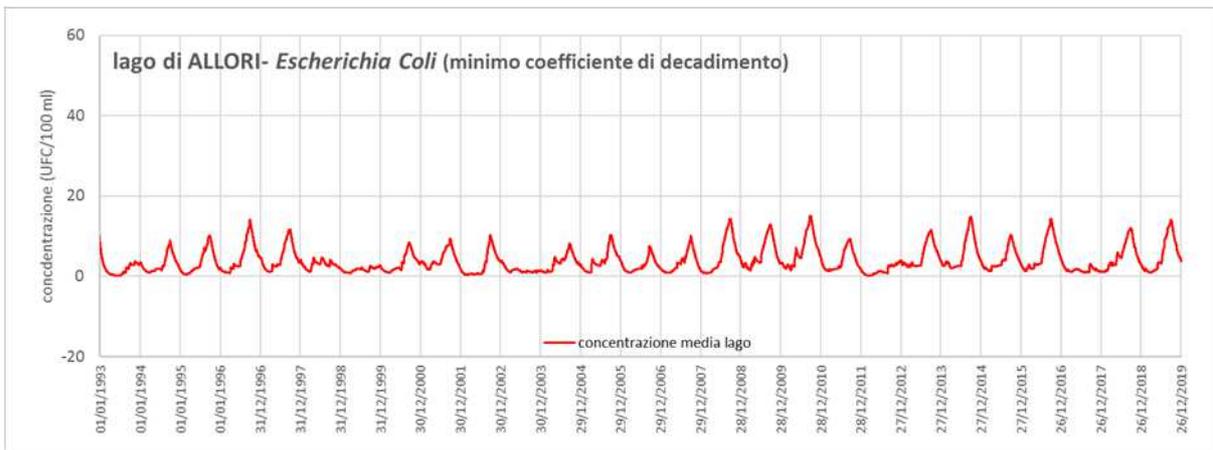
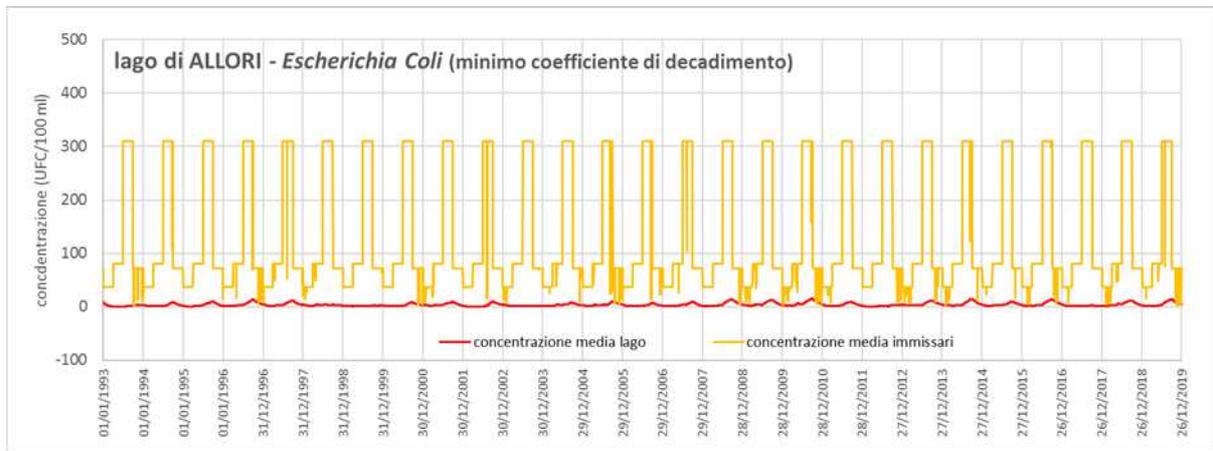


Figura 174 – Lago di Allori; *Escherichia coli* assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

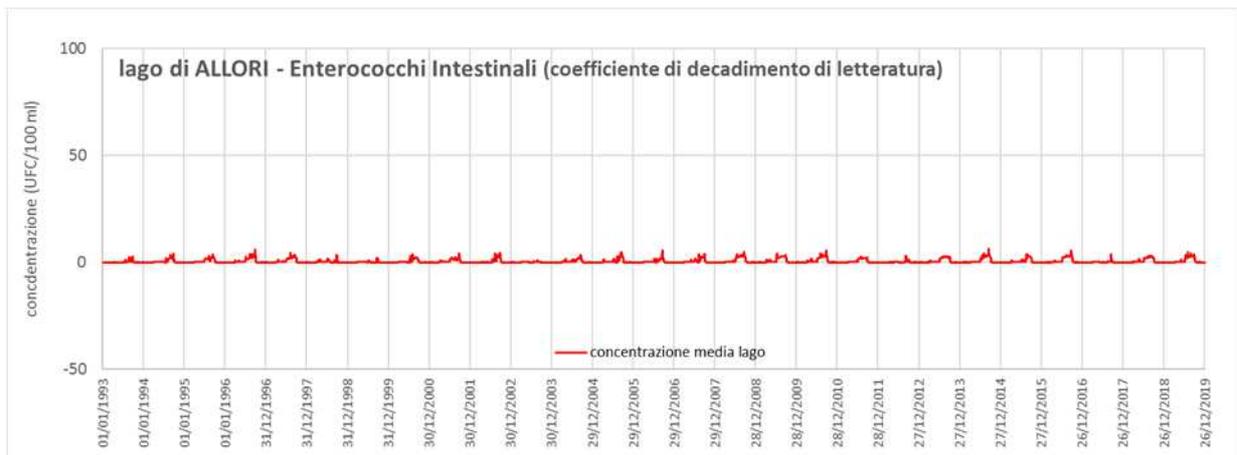
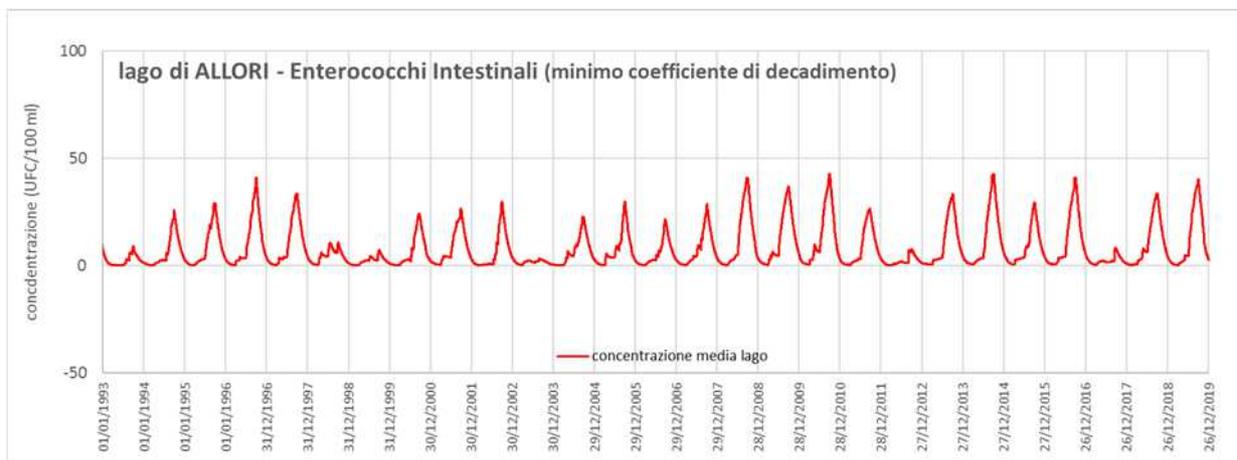
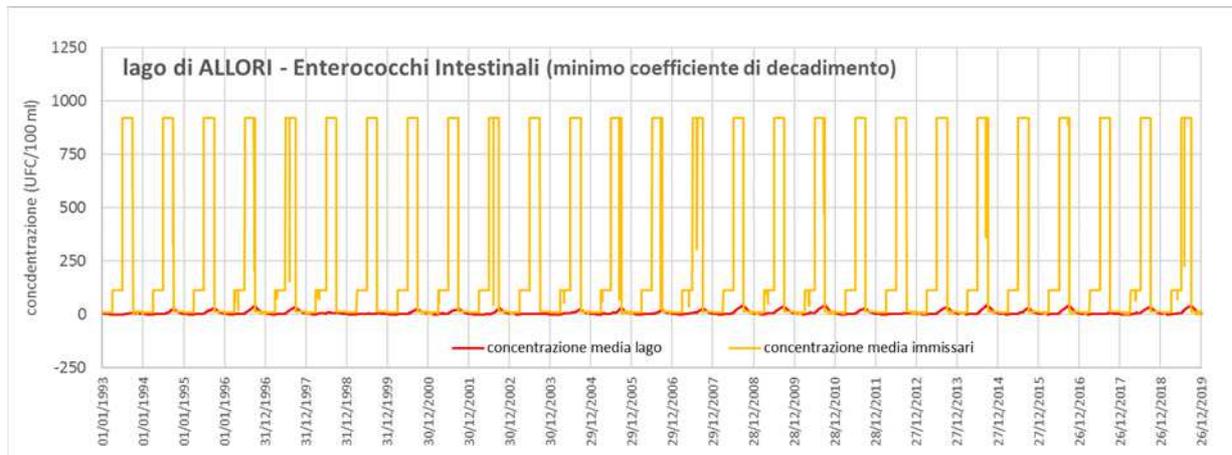


Figura 175 – Lago di Allori; Enterococchi intestinali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

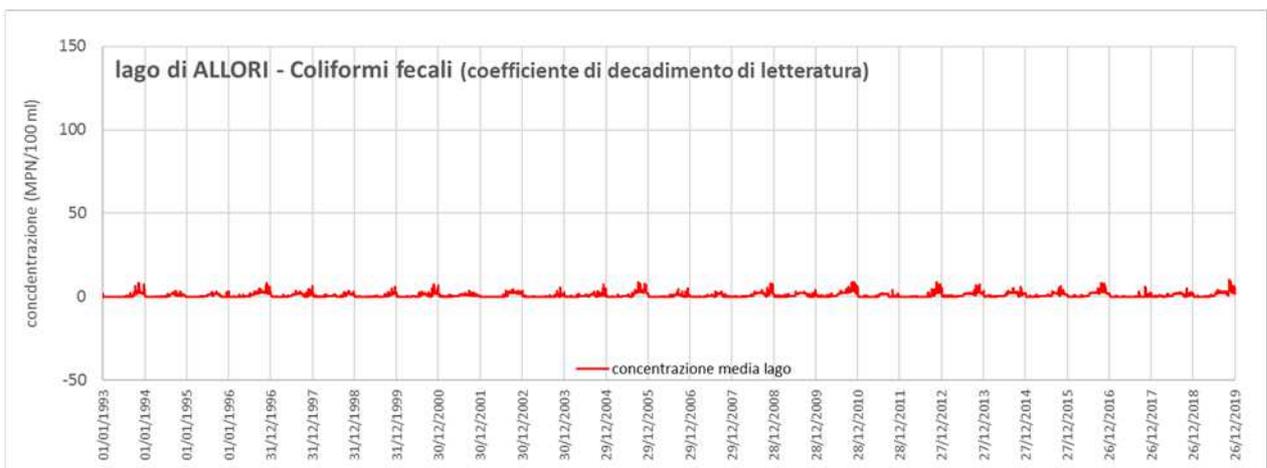
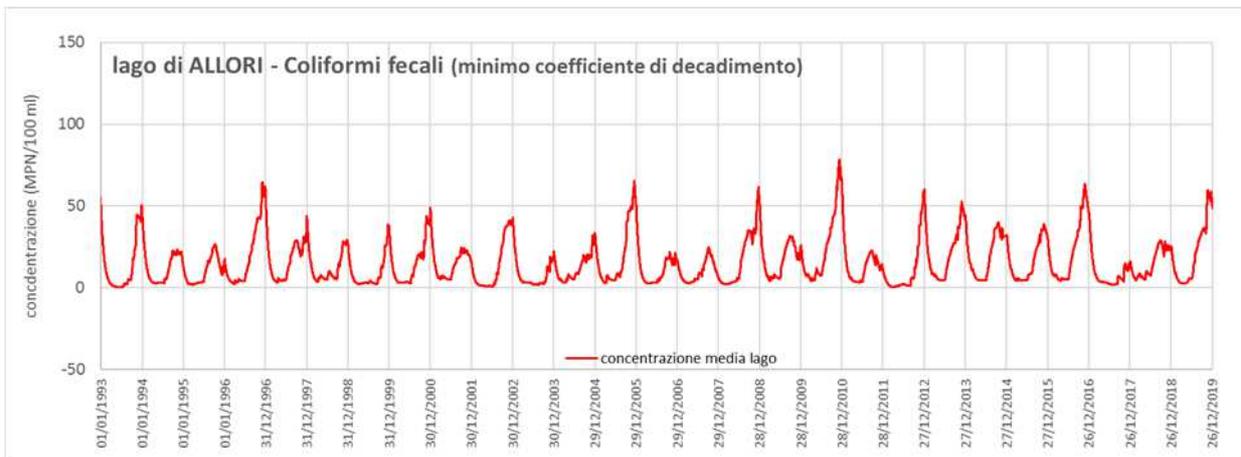
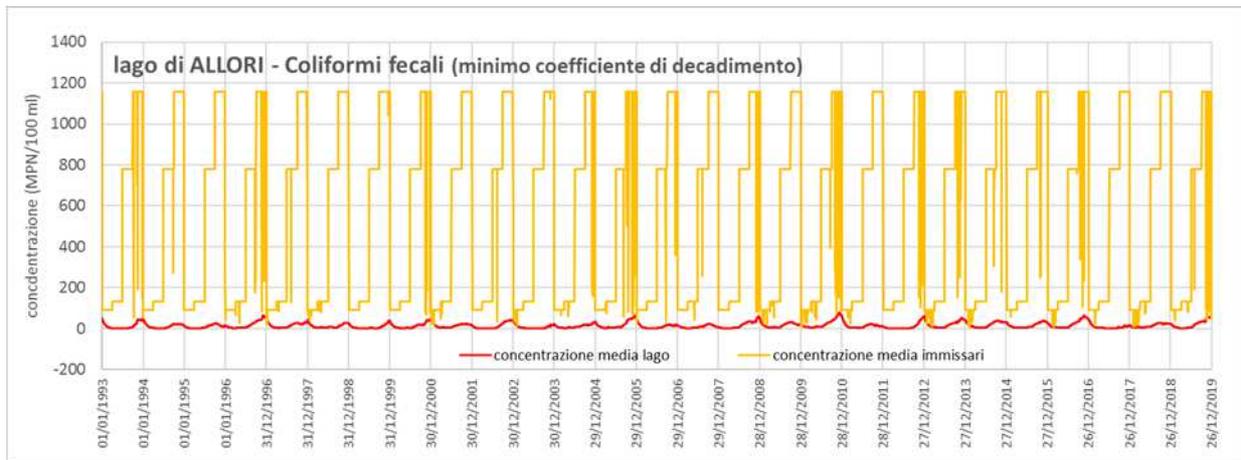


Figura 176 – Lago di Allori; Coliformi fecali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($C_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

TABELLA 47 – Risultati della modellazione della qualità dell’acqua del bacino di Allori (medie mensili riferiti, cautelativamente, ai minimi coefficienti di decadimento).

Lago di ALLORI					
concentrazioni medie mensili					
	BOD₅ (mg/l)	Ptot (mg/l)	Ecoli (UFC/100ml)	Enterococchi (UFC/100ml)	Coliformi (MPN/100ml)
GEN	0.037	0.005	2.357	2.020	21.666
FEB	0.078	0.005	1.581	0.828	8.759
MAR	0.107	0.005	1.317	0.445	4.729
APR	0.138	0.006	1.757	1.723	3.945
MAG	0.165	0.006	2.376	3.128	4.297
GIU	0.156	0.006	2.522	3.500	4.327
LUG	0.105	0.006	3.831	8.448	8.114
AGO	0.055	0.006	5.913	15.795	13.964
SET	0.031	0.005	8.338	23.655	20.411
OTT	0.018	0.005	7.532	20.384	25.096
NOV	0.011	0.005	4.982	10.792	30.292
DIC	0.008	0.005	3.420	4.812	34.017
media annua	0.076	0.005	3.827	7.961	14.968

Nelle condizioni ipotizzate, all’interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.076 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.005 mg/l e 0.006 mg/l (media annua pari a 0.005 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.317 e 8.338 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.8 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.445 e 23.655 UFC/100 ml (media annua intorno a 8.0 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 3.945 e 34.017 MPN/100 ml (media annua intorno a 15.0 MPN/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati in TABELLA 45, la permanenza nell’invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) in un miglioramento della qualità dell’acqua rispetto a quella dell’affluente.

7.8 SCENARIO B - Modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo

7.8.1 Dati di input utilizzati

Il modello previsionale di qualità delle acque del lago di Castelnuovo è stato applicato sullo schema idrico ipotizzato utilizzando come dati di input i valori delle portate dell'immissario, dell'emissario e di evaporazione dall'invaso ottenute dalla simulazione del modello termo-idrologico dedotte dall'analisi dei dati meteorologici rilevati nel periodo 1/9/1992 – 31/12/2019.

Le concentrazioni dei parametri delle acque affluenti al lago sono dedotte dalle misure stagionali di qualità dell'acqua degli immissari al bacino sulla base dei quali sono stati calcolati i valori stagionali di concentrazione (TABELLA 48) attribuiti alle portate immesse nel lago (parametri di input al modello matematico).

TABELLA 48 – Concentrazioni stagionali assunte per le portate in ingresso al lago di Castelnuovo.

	concentrazione immissari lago CASTELNUOVO			
	INV.	PRI.	EST.	AUT.
BOD5 (mg/l)	1.24	1.51	16.64	0.19
P tot (mg/l)	0.0521	0.0573	1.3706	0.1368
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	208.7	3143.1	10034.4	1776.5
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	470.0	5893.9	23248.0	566.6
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	276.4	1834.0	13320.0	52831.9

Come condizione iniziale del lago sono stati assunti i valori misurati nella campagna estiva 2015 dal momento che la simulazione inizia il 1° settembre (TABELLA 49).

TABELLA 49 – Concentrazioni iniziali nel lago Castelnuovo.

	concentrazione iniziale lago CASTELNUOVO
BOD5 (mg/l)	1.59
P tot (mg/l)	0.0254
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 ml)	10
Enterococchi intestinali (UFC/100 ml)	8
Coliformi fecali (MPN/100 ml)	20

7.8.2 Risultati della modellazione

Le simulazioni effettuate con il modello matematico chimico-biologico e i parametri di input descritti hanno permesso di valutare il comportamento del lago di Castelnuovo sotto il profilo delle variazioni di concentrazione del BOD₅, del fosforo totale, della presenza di *Escherichia coli* e di Enterococchi intestinali nelle condizioni ipotizzate.

Dalla Figura 177 alla Figura 181 sono illustrati gli andamenti temporali modellati per questi parametri e nella TABELLA 50 sono riportate le relative medie mensili.

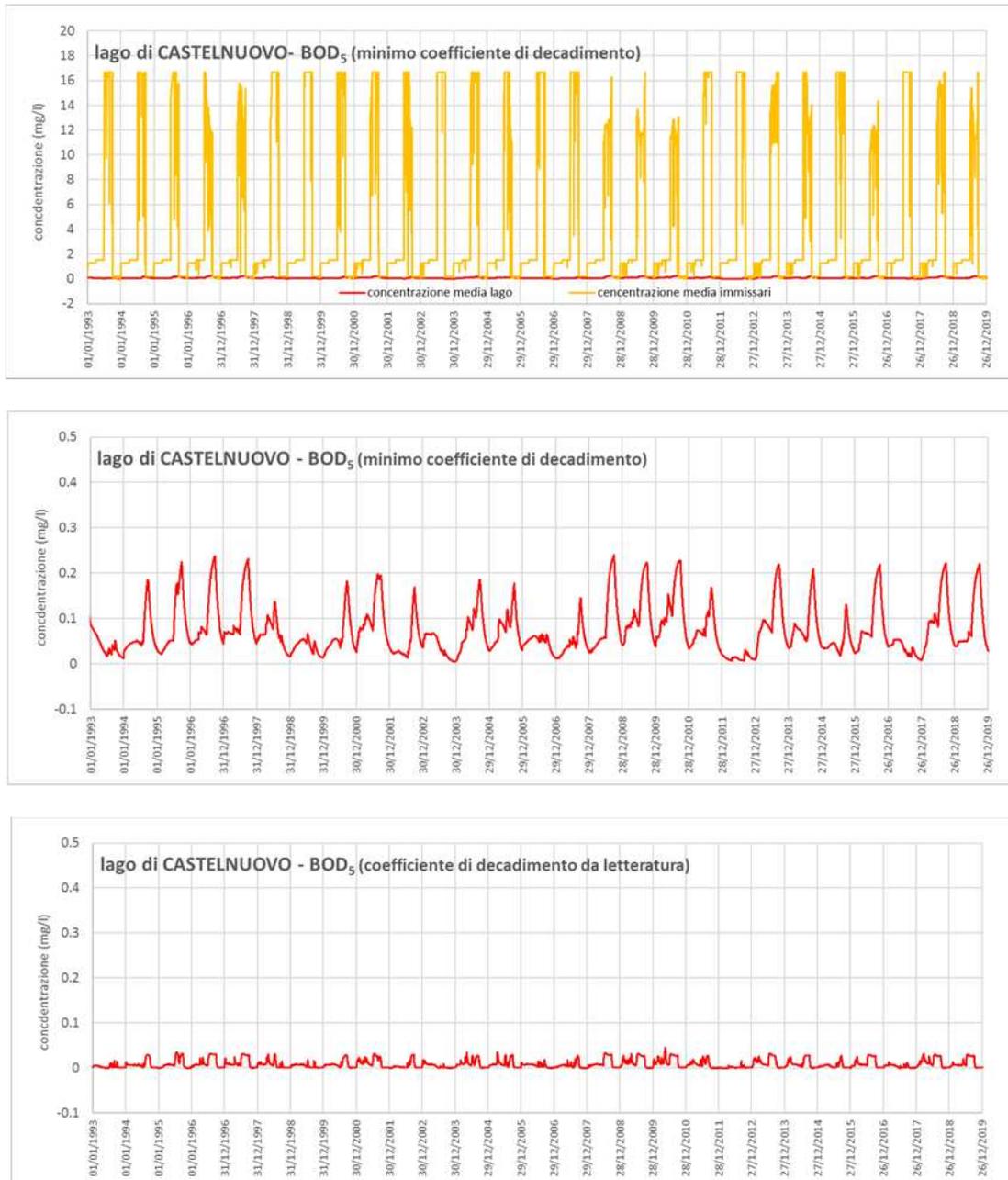


Figura 177 – Lago di Castelnuovo; BOD₅ assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($C_{BOD5} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($C_{BOD5} = 0.18$ in paragrafo 7.2).



Figura 178 – Lago di Castelnuovo; Fosforo totale.

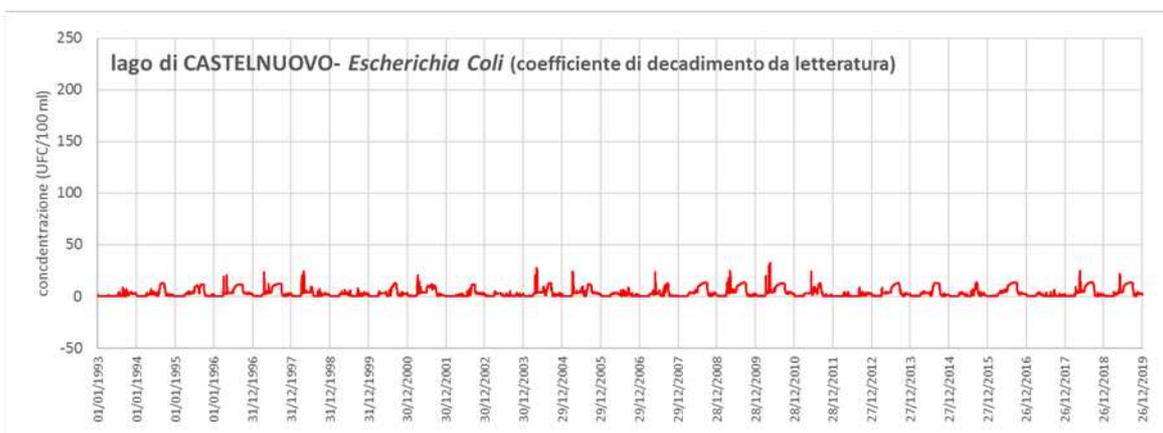
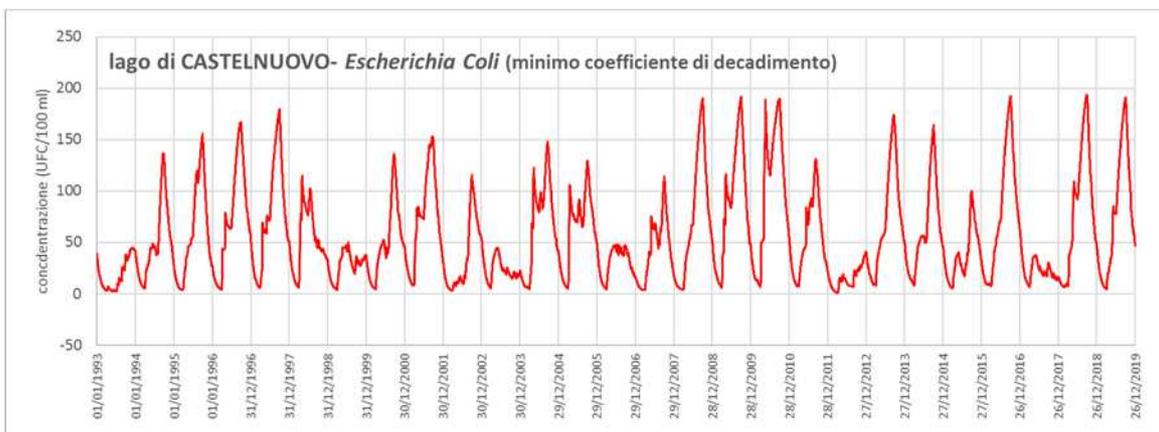
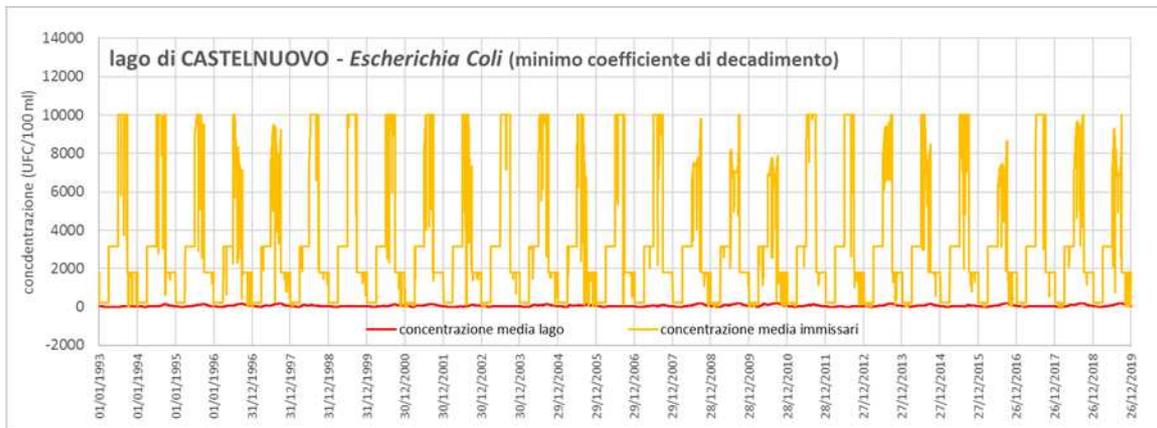


Figura 179 – Lago di Castelnuovo; *Escherichia coli* assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

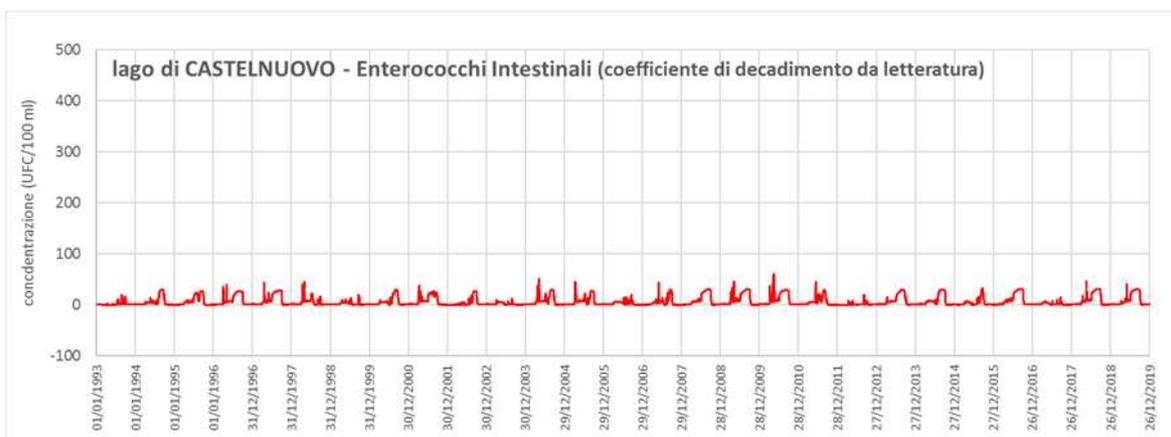
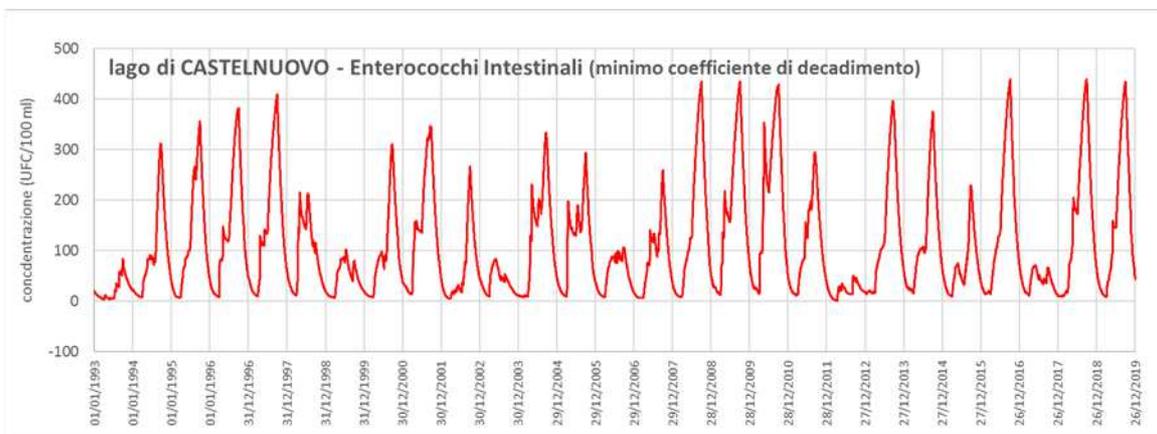
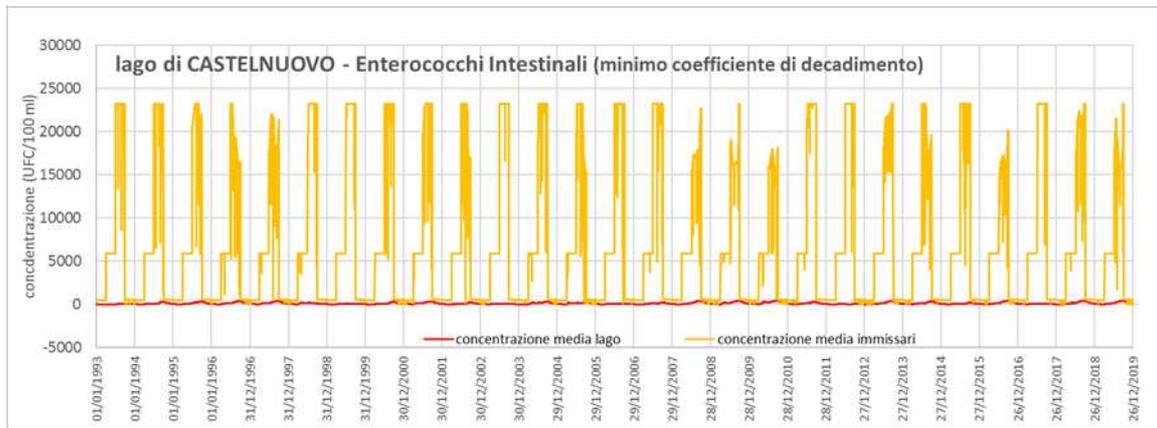


Figura 180 – Lago di Castelnuovo; Enterococchi intestinali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{EC} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{EC} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

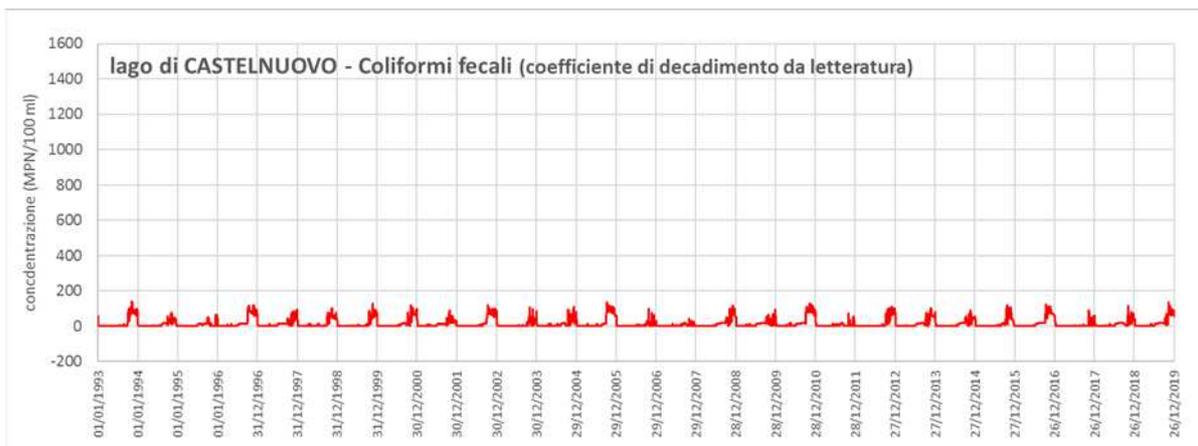
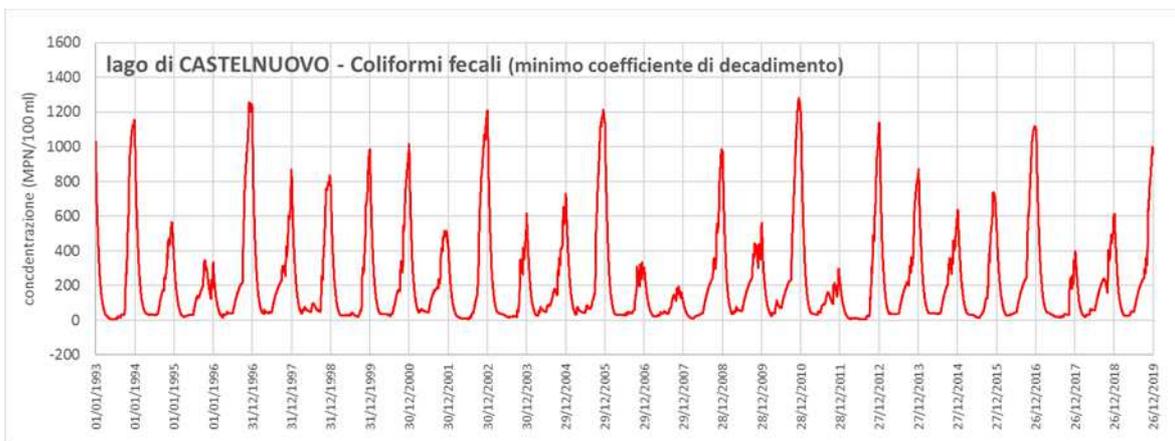
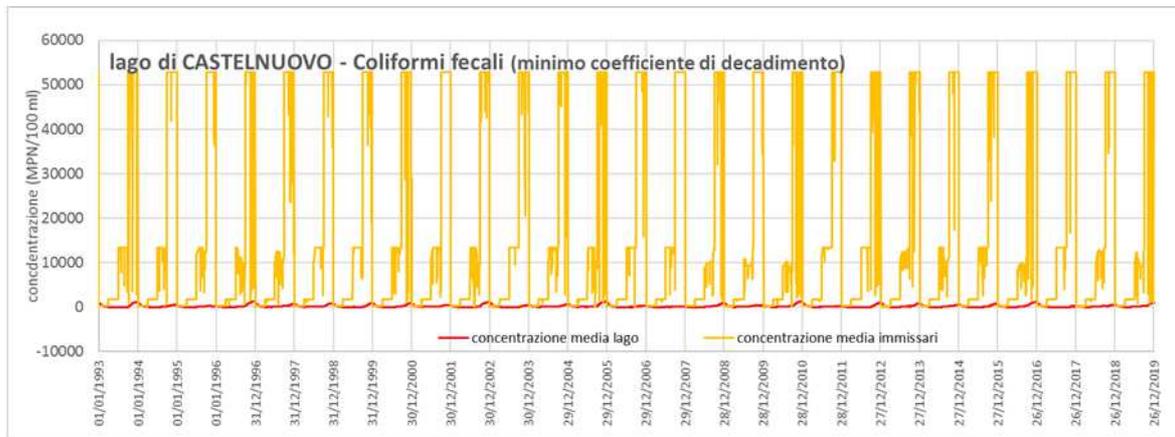


Figura 181 – Lago di Castelnuovo; Coliformi fecali assumendo un coefficiente di decadimento minimo ($c_{Ec} = 0.02$ in paragrafo 7.2) e di letteratura ($c_{Ec} = 0.36$ in paragrafo 7.2).

TABELLA 50 – Risultati della modellazione della qualità dell’acqua del bacino di Castelnuovo (valori medi mensili) riferiti, cautelativamente, ai minimi coefficienti di decadimento.

Lago di CASTELNUOVO					
concentrazioni medie mensili					
	BOD ₅ (mg/l)	Ptot (mg/l)	<i>Ecoli</i> (UFC/100ml)	Enterococchi (UFC/100ml)	Coliformi (MPN/100ml)
GEN	0.037	0.026	25.598	28.179	469.336
FEB	0.047	0.024	11.512	15.930	162.950
MAR	0.056	0.023	6.590	11.623	56.269
APR	0.062	0.022	28.613	53.821	34.382
MAG	0.067	0.022	54.131	101.567	38.080
GIU	0.061	0.021	58.450	109.629	36.945
LUG	0.084	0.023	69.049	141.424	61.883
AGO	0.118	0.028	89.530	196.666	101.586
SET	0.147	0.034	115.681	261.456	143.045
OTT	0.111	0.035	99.954	215.631	297.953
NOV	0.059	0.031	66.331	119.813	536.545
DIC	0.035	0.028	45.700	59.494	705.226
media annua	0.074	0.027	55.928	109.603	220.350

Nelle condizioni ipotizzate, all’interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.074 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.021 e 0.035 mg/l (media annua di circa 0.027 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 6.590 e 115.681 UFC/100 ml (media annua intorno a 56.0 UFC/100 ml) quella di Enterococchi intestinali tra 11.623 e 261.456 UFC/100 ml (media annua di circa 110.0 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 34.382 e 705.226 MPN/100 ml (media annua di circa 220.4 MPN/100 ml).

Confrontando questi valori con quelli riportati nella TABELLA 48, la permanenza nell’invaso si traduce (come del resto avviene di norma in questi casi) in un generale miglioramento della qualità dell’acqua rispetto a quella dell’affluente.

7.9 Discussione dei risultati relativi al sistema Allori - Castelnuovo

Si riporta di seguito una valutazione dei risultati del bilancio biochimico derivanti dagli scenari di gestione A e B ipotizzati per il lago Allori e per il lago Castelnuovo messi a confronto tra loro e con le normative in materia di qualità delle acque.

7.9.1 Risultati della modellazione del bilancio biochimico del lago di Allori

Nei grafici seguenti (Figura 182) sono riportati i valori medi mensili risultanti dalla modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Allori nello scenario A (colore blu) e nello scenario B (colore azzurro).

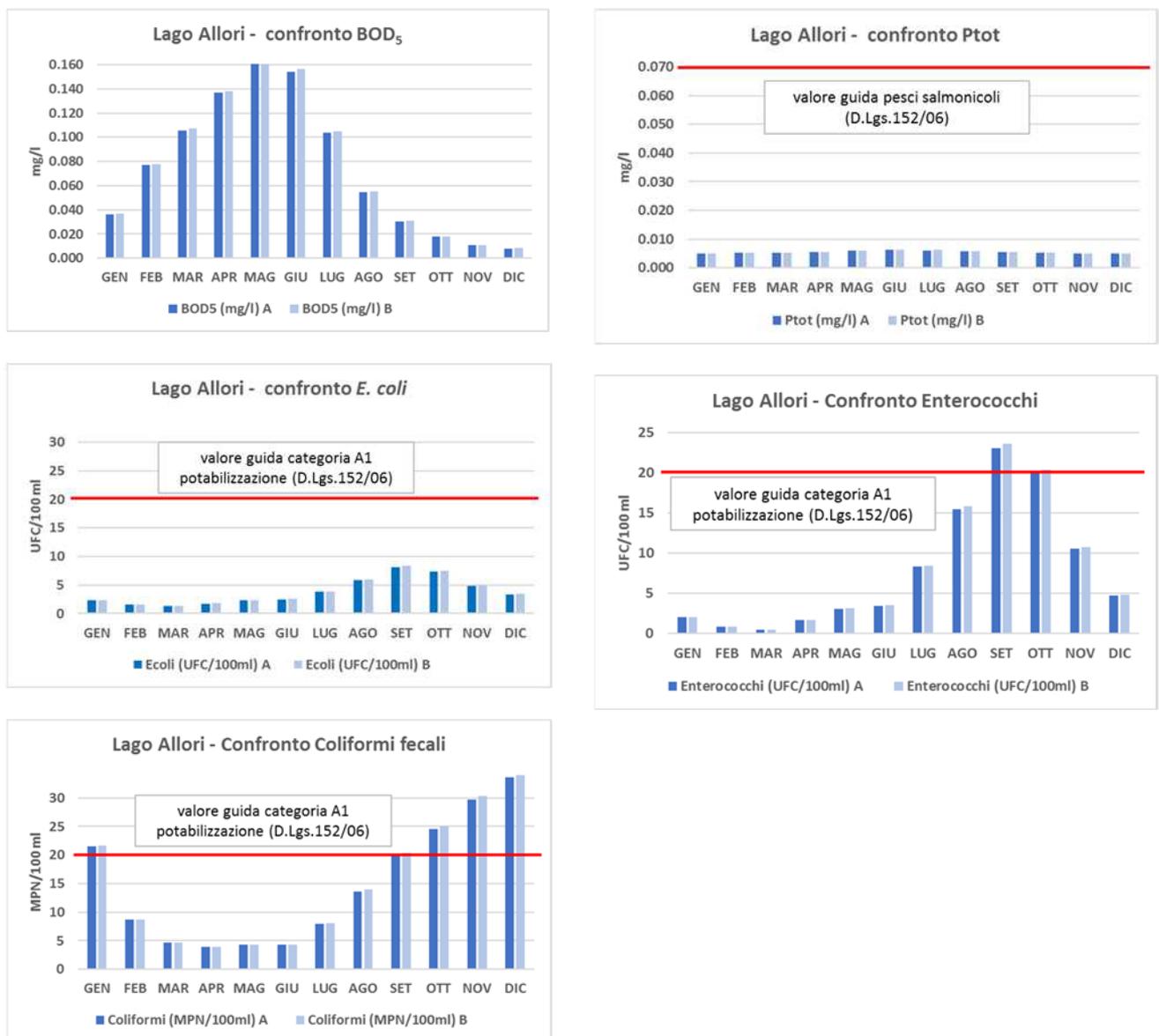


Figura 182 - Valori medi mensili risultanti dalla modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Allori nello scenario A e nello scenario B

Come si può notare, i valori dei parametri considerati non variano in modo significativo nei due scenari considerati. In entrambi i casi, infatti, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (TABELLA 36 al paragrafo 7.4.2).

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione **idropotabile** delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi TABELLA 37 al paragrafo 7.4.2), la concentrazione media annua dei parametri in esame rispetta i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano. Le concentrazioni medie mensili dei parametri Enterococchi e Coliformi fecali mostrano invece qualche superamento di tale limite, pur rientrando nei limiti previsti per la categoria A2 (Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione).

ARPAT riporta una classificazione relativa al lago di Allori per il triennio 2016-2018 "SubA3": i parametri critici rilevati risultano temperatura, solfati e BOD₅ (ARPAT, 2019, "Monitoraggio acque a specifica destinazione idonee alla vita pesci e destinate alla potabilizzazione - Periodo 2016-2018").

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la **balneazione** dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti (TABELLA 38 al paragrafo 7.4.2).

Confrontando le previsioni modellistiche con i dati disponibili della rete di monitoraggio di ARPAT per il controllo delle acque superficiali ai fini della potabilizzazione, previsto dal DLgs 152/06 (BOD₅, fosforo totale, fosfati, Enterococchi intestinali, Coliformi fecali) relativi alla stazione POT-154 Lago di Allori, si evidenzia che i dati del modello risultano generalmente di uno o due ordini di grandezza inferiori rispetto ai dati ARPAT; questa differenza è molto probabilmente dovuta al fatto che il modello biochimico fa riferimento alle condizioni che il lago avrà nell'assetto futuro di progetto caratterizzato da superfici e volumi maggiori di quelli attuali a cui si riferiscono, invece, i dati del monitoraggio ARPAT.

7.9.2 Risultati della modellazione del bilancio biochimico del lago di Castelnuovo

Nei grafici seguenti (Figura 183) sono riportati i valori medi mensili risultanti dalla modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Castelnuovo nello scenario A (colore blu) e nello scenario B (colore azzurro).

Anche per il lago Castelnuovo, i valori dei parametri considerati non variano in modo significativo nei due scenari considerati. In entrambi i casi, infatti, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono generalmente ampiamente entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (TABELLA 36 al paragrafo 7.4.2).

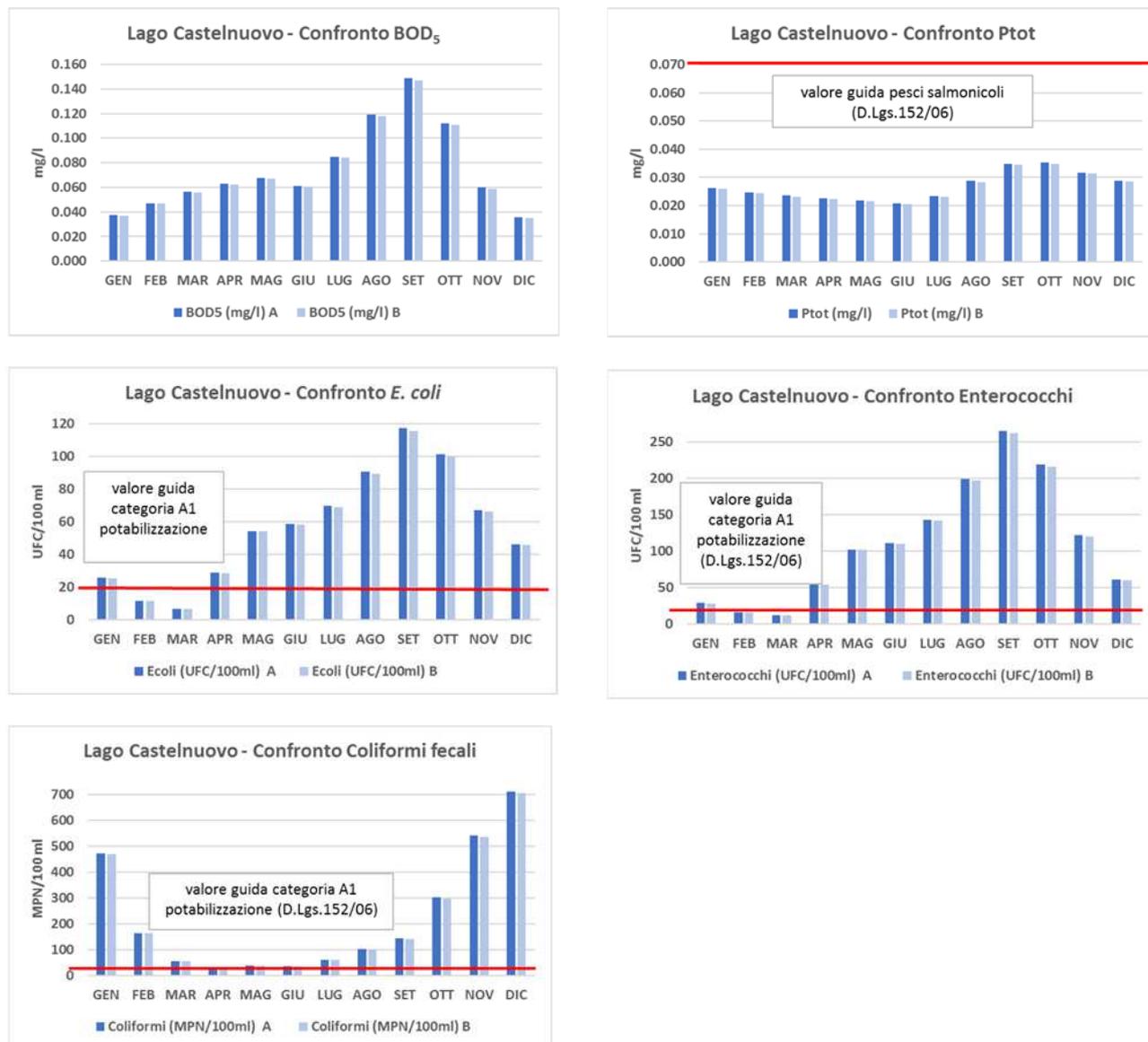


Figura 183 - Valori medi mensili risultanti dalla modellazione della qualità dell'acqua del bacino di Castelnuevo nello scenario A e nello scenario B

Come si può notare, i valori dei parametri considerati non variano in modo significativo nei due scenari considerati. In entrambi i casi, infatti, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli (TABELLA 36 al paragrafo 7.4.2).

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione idropotabile delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato (vedi TABELLA 37), le concentrazioni medie annue dei parametri in esame rispettano generalmente i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento fisico semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano, ad

eccezione del parametro Coliformi fecali che indica invece la necessità di un trattamento previsto per la categoria A2 (Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione).

I valori medi mensili stimati presentano, invece, superamenti dei limiti previsti per la categoria A1 per Escherichia coli, Enterococchi e, soprattutto, per il parametro Coliformi fecali.

Tali risultati sono con ogni probabilità imputabili alle concentrazioni misurate nei borri Pianale e Bicchieraie dovute agli scarichi di Castelnuovo dei Sabbioni, che saranno presto intercettati dalla nuova linea fognaria in progettazione, permettendo di ipotizzare un miglioramento della qualità delle acque in ingresso al lago e del lago stesso.

ARPAT riporta una classificazione relativa al lago di Castelnuovo per il triennio 2016-2018 "SubA3": i parametri critici rilevati risultano temperatura e manganese (ARPAT, 2019, "Monitoraggio acque a specifica destinazione idonee alla vita pesci e destinate alla potabilizzazione - Periodo 2016-2018").

Confrontando le previsioni modellistiche con i dati disponibili della rete di monitoraggio di ARPAT per il controllo delle acque superficiali ai fini della potabilizzazione, previsto dal Dlgs 152/06 (BOD₅, fosfati, Enterococchi intestinali, Coliformi fecali) relativi alla stazione POT-156 Lago di Castelnuovo, si evidenzia che i dati di BOD₅, fosforo totale e Coliformi fecali del modello risultano generalmente di un ordine di grandezza inferiore rispetto ai dati ARPAT, mentre i dati di Enterococchi intestinali risultano in linea; queste differenze sono probabilmente imputabili al fatto che il modello biochimico fa riferimento alle condizioni che il lago avrà nell'assetto futuro di progetto caratterizzato da superfici e volumi maggiori di quelli attuali a cui si riferiscono, invece, i dati del monitoraggio ARPAT.

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la balneazione dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti (TABELLA 38 al paragrafo 7.4.2).

7.10 Valutazione dello stato trofico dei laghi S. Cipriano, Allori e Castelnuovo

I risultati ottenuti dall'applicazione del modello biochimico, descritti nel precedente paragrafo, possono essere contestualizzati nel quadro ambientale risultante dai monitoraggi eseguiti nel periodo 2014-2019, che hanno messo in evidenza una situazione dei tre laghi artificiali buona o quantomeno sufficiente.

TABELLA 51 Stato chimico, LTLecco e Stato Ecologico dei laghi S. Cipriano, Allori, Castelnuovo

<i>corpi idrici</i>		<i>Lago S. Cipriano</i>	<i>Lago Allori</i>	<i>Lago Castelnuovo</i>
Stato Chimico	2014-2015	Non Buono	Buono	Non Buono
	2016	Buono	Buono	Buono
	2017	Buono	Buono	Buono
	2018	Buono	Buono	Buono
	2019	Buono	Buono	Buono
LIM eco/ LTL eco	2014-2015	Sufficiente	Buono	Sufficiente
	2016	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2017	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2018	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2019	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
Stato Ecologico	2014-2015	Sufficiente	Buono	Sufficiente
	2016	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2017	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2018	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente
	2019	Sufficiente	Sufficiente	Sufficiente

In particolare, è stato valutato l'indice LTLecco (Livello trofico dei laghi per la classificazione dello stato ecologico), previsto dal D.Lgs. 152/06 ai sensi della Direttiva quadro sulle acque 2000/60/CE per la classificazione dello Stato Ecologico dei corpi idrici lacustri, ottenuta in base ai monitoraggi dei parametri biologici, limnologici e trofici.

Il giudizio derivante dall'applicazione dell'Indice LTLecco (Livello trofico dei laghi per la classificazione dello stato ecologico) risulta generalmente "Sufficiente" per tutti e tre i laghi artificiali e non evidenzia una situazione di trofia critica dei corpi idrici in esame.

Confrontando i valori di fosforo totale ottenuti dalle indagini eseguite nei laghi con le soglie previste per la valutazione dello stato trofico dei corpi idrici dall'indice LTLecco e dalle categorie di trofia della classificazione O.E.C.D. (1982, Figura 184) emerge che:

- le concentrazioni medie di fosforo totale del periodo di monitoraggio ricadono nel Livello 3 dell'indice LTLecco e nella categoria trofica "Mesotrofia" secondo la classificazione O.E.C.D. 1982, categoria confermata anche dai valori di clorofilla e trasparenza;
- le concentrazioni medie di fosforo totale nel periodo di massima circolazione alla fine della stagione invernale (valutate sulla base dei rilievi disponibili) ricadono nel Livello 1 dell'LTLecco per i laghi di Allori e di S. Cipriano, nel Livello 2 per il Castelnuovo.

Valore di fosforo per macrotipi		Livello 1	Livello 2	Livello 3
	Punteggio	5	4	3
L1, L2, I1, I2		$\leq 8^{(*)}$	≤ 15	>15
L3, L4, I3, I4		$\leq 12^{(**)}$	≤ 20	>20

Categoria trofica (valori medi annui)	P	Clor	max Clor.	D.S.	min D.S.
		$\mu\text{g L}^{-1}$			m
Ultraoligotrofo	≤ 4.0	≤ 1.0	≤ 2.5	≥ 12.0	≥ 6.0
Oligotrofo	≤ 10.0	≤ 2.5	≤ 8.0	≥ 6.0	≥ 3.0
Mesotrofo	10 – 35	2.5 – 8	8 – 25	6 – 3	3 – 1.5
Eutrofo	35 – 100	8 – 25	25 – 75	3 – 1.5	1.5 – 0.7
Iperotrofo	≥ 100	≥ 25	≥ 75	≤ 1.5	≤ 0.7

Figura 184 - Soglie di concentrazione del fosforo totale previste dall'indice LTLecco (a sinistra) e dalla classificazione O.E.C.D. (1982) (a destra)

Inoltre, per valutare lo stato trofico in relazione al parametro fosforo totale dei laghi S. Cipriano, Allori e Castelnuovo, oggetto di studio del presente rapporto, viene per completezza presentata un'applicazione del modello Vollenweider, ad integrazione del modello biochimico descritto nel precedente paragrafo 7.2, che calcola il bilancio di massa degli inquinanti considerati. Nel modello biochimico, infatti, per la valutazione dei carichi teorici si è fatto riferimento alle misure di concentrazione sugli affluenti, adottando un approccio più specifico e puntuale di quanto si possa fare con un censimento dei carichi potenziali.

L'analisi per verificare le condizioni trofiche dei laghi di S. Barbara mediante il modello di Vollenweider è stata effettuata utilizzando le seguenti relazioni (E. Cominu et al. 2005):

$$Lc(inf) = 10 q_s \left(1 + \sqrt{\frac{Z}{q_s}} \right)$$

$$Lc(sup) = 20 q_s \left(1 + \sqrt{\frac{Z}{q_s}} \right)$$

dove:

- Lc è il carico critico (g/(m² anno))
- Z è l'altezza media del lago = V/S (m);
- V è il volume invasato (m³);
- S è la superficie del lago corrispondente al volume V (m²)
- q_s è il carico idraulico superficiale = Z/Tw (m/anno);
- Tw è il tempo medio di ricambio delle acque = V/Qe (anni);
- Qe è il volume d'acqua medio annuo in ingresso al lago (m³/anno).

Le due equazioni, specifiche per ogni lago, consentono, sulla base del carico annuo di fosforo immesso nel lago, di caratterizzarne lo stato trofico. Al di sopra della curva Lc(sup) il lago risulta in condizioni eutrofiche; al di sotto della curva Lc(inf) il lago è in condizioni oligotrofiche.

Per la stima della concentrazione media annua di fosforo in ingresso allo specifico lago (indicata con cP nelle tabelle successive) è stata utilizzata la media delle concentrazioni stagionali rilevate nei vari borri afferenti al lago. Tale concentrazione moltiplicata per il volume d'acqua medio annuo in ingresso al lago (Qe) fornisce il carico di fosforo medio annuo scaricato nel lago (carP nelle tabelle seguenti). Dividendo il carico medio annuo per la superficie del lago si ottiene il carico medio annuo per unità di superficie da inserire nel grafico di Vollenweider, unitamente alla corrispondente coordinata q_s.

Sulla base dei dati rilevati si sono ottenuti i risultati riportati di seguito per i tre laghi dell'area di Santa Barbara, che indicano una condizione oligotrofica per ciascuno dei tre laghi.

S. CIPRIANO		
quota di riferim.	152.3	m slm
V	2183039	m ³
S	472948	m ²
Z = V/S	4.62	m
Qe	5186808	m ³ /anno
Tw = V/Qe	0.42	anno
qs = Z/Tw	10.97	m/anno
cP	27	mg/m ³
carP = cP x Qe	140043816	mg/anno
carP/S	296.11	mg/(m ² anno)
carP/S	0.30	g/(m² anno)

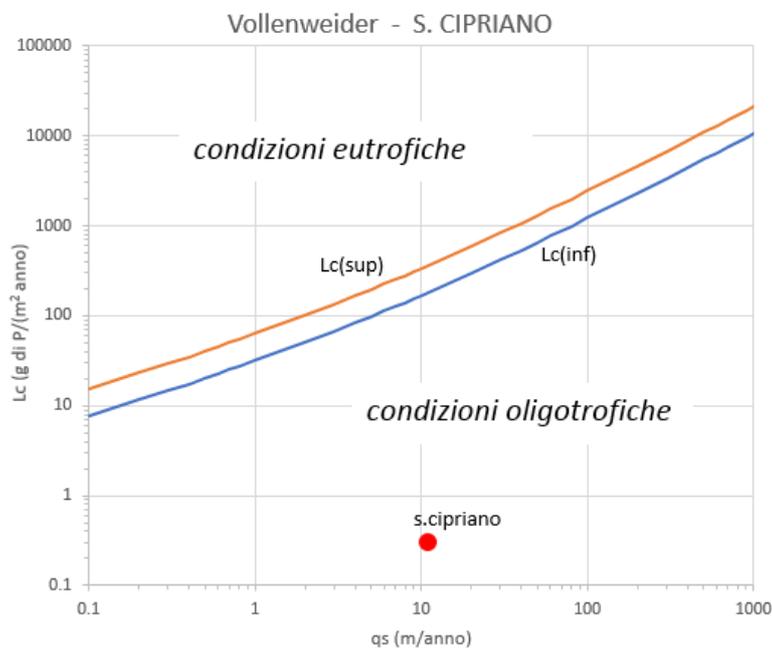


Figura 185 – Risultati dell'analisi dello stato trofico del lago di S. Cipriano con il modello di Vollenweider

ALLORI		
quota di riferim.	182	m slm
V	4404684	m ³
S	530470	m ²
Z = V/S	8.30	m
Qe	2593668	m ³ /anno
Tw = V/Qe	1.70	anno
qs = Z/Tw	4.89	m/anno
cP	21.4	mg/m ³
carP = cP x Qe	55504495	mg/anno
carP/S	104.63	mg/(m ² anno)
carP/S	0.10	g/(m ² anno)

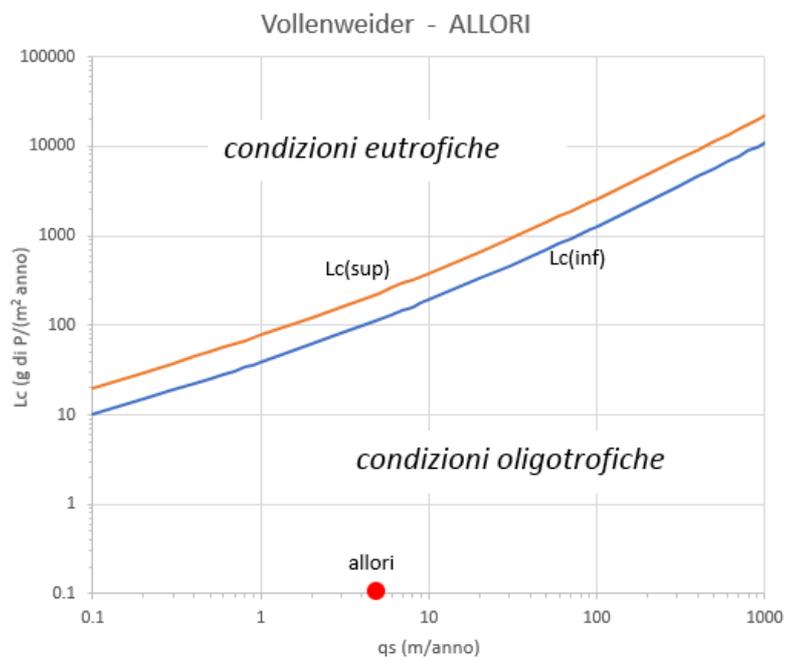


Figura 186 – Risultati dell'analisi dello stato trofico del lago di Allori con il modello di Vollenweider

CASTELNUOVO		
quota di riferim.	146	m slm
V	12102000	m ³
S	1260000	m ²
Z = V/S	9.60	m
Qe	4327260	m ³ /anno
Tw = V/Qe	2.80	anno
qs = Z/Tw	3.43	m/anno
cP	404	mg/m ³
carP = cP x Qe	1748213040	mg/anno
carP/S	1387.47	mg/(m ² anno)
carP/S	1.39	g/(m ² anno)

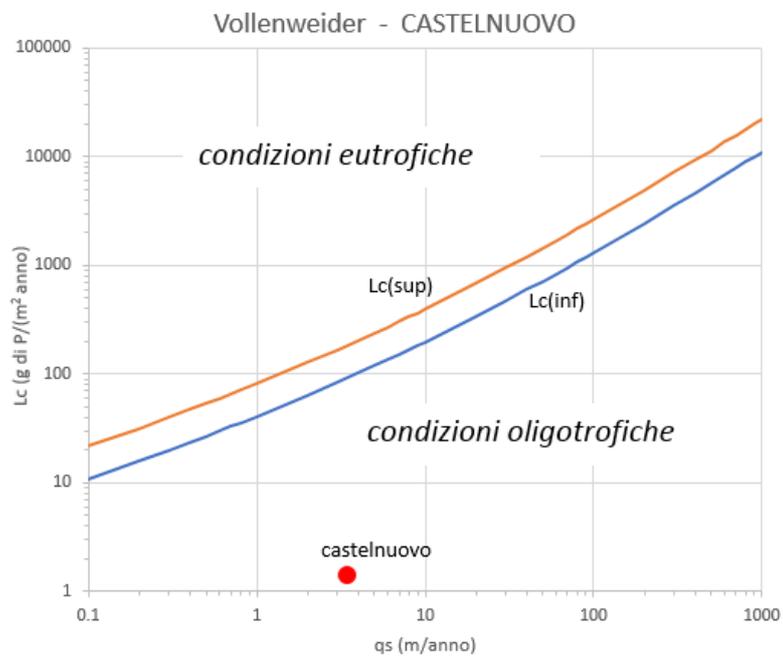


Figura 187 – Risultati dell’analisi dello stato trofico del lago di Castelnuovo con il modello di Vollenweider

8 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio in oggetto, commissionato da Enel Produzione SpA a CESI, si colloca nell'ambito delle attività connesse al progetto di recupero ambientale dell'area mineraria di Santa Barbara, secondo quanto previsto dal Decreto attuativo della Regione Toscana n.416 del 09 febbraio 2010. La verifica numerica ha riguardato, in particolare, gli aspetti di sostenibilità idraulica e di qualità delle acque dei corpi idrici interessati dalla risistemazione dell'area, nella fattispecie i laghi di Allori, Castelnuovo e San Cipriano, nella configurazione di progetto approvata

L'analisi numerica si è avvalsa dei dati di monitoraggio della qualità delle acque dei tre laghi e dei rispettivi borri immissari raccolti nel periodo novembre 2014 – agosto 2015 (rilievi CESI di cui al rapporto in Allegato CESI B6002088), nel periodo autunnale dal 2016 al 2019 e nel mese di giugno per gli anni 2018 e 2019 (rilievi società CIERRE).

La modellazione idrologico – idraulica dei tre laghi, intesa a verificare la sostenibilità idraulica complessiva del sistema, è iniziata con la taratura e la validazione dei parametri del modello idrologico HEC-HMS avvenuta con riferimento al bacino imbrifero del lago di San Cipriano scelto, congiuntamente all'Autorità di Bacino del fiume Arno, grazie alla disponibilità di prolungate serie di misure giornaliere di livello e di volumi prelevati e rilasciati dall'invaso eseguite nel corso degli ultimi 11 anni (2009 – 2019). Le misure sono state utilizzate per la messa a punto di un modello "idraulico" che, attraverso un bilancio di massa, ha consentito di ricavare le portate naturali afferenti al bacino di San Cipriano. Queste portate, confrontate con quelle ricavate attraverso il modello idrologico HEC-HMS per il medesimo bacino imbrifero, hanno consentito la messa a punto dei parametri di quest'ultimo. La descrizione di questa prima parte dello studio è stata oggetto del rapporto CESI Prot. C0007404.

Le specifiche del modello idrologico così ricavate sono state assunte, nella successiva fase di aggiornamento e rifacimento dell'analisi idro-biochimica delle acque dei laghi, per caratterizzare l'intera area mineraria di S. Barbara secondo quanto illustrato nel presente rapporto.

La modellazione idrologico – idraulica dei tre laghi è stata aggiornata rispetto agli studi precedenti sia nella serie meteorologica dei dati di input delle simulazioni (ci si è avvalsi di quasi un trentennio di dati meteorologici dal 1992 al 2019 forniti dal Servizio Idrologico della Regione Toscana e trattati, in particolare per quanto concerne la definizione delle piogge medie areali, secondo le indicazioni dell'Autorità di Bacino del fiume Arno), sia nella formulazione modellistica basata sulle curve di invaso e sulle scale di deflusso fornite da Enel per ciascuno dei tre laghi considerati.

La successiva modellazione biochimica della qualità delle acque dei tre invasi ha assunto come dati di input sia i bilanci aggiornati di cui al punto precedente, sia le misure ricavate dalle campagne di monitoraggio stagionale (in Allegato quelle eseguite da CESI); l'analisi ha riguardato l'andamento nel tempo di diversi parametri: BOD5, Fosforo totale, *Escherichia coli*, Enterococchi intestinali e Coliformi fecali in accordo con le prescrizioni formulate dal Ministero dell'Ambiente e dalla Regione Toscana.

Rimandando ai precedenti capitoli per i necessari approfondimenti, si riportano nel seguito alcune considerazioni conclusive in merito ai risultati delle analisi condotte.

8.1 Modellazioni idrologiche – idrauliche

Le **temperature** di tutti gli invasi analizzati evidenziano andamenti stagionali con escursioni massime generalmente superiori a 5 °C e inferiori a 30 °C; appaiono generalmente più contenute le oscillazioni termiche delle acque del lago Castelnuovo compatibilmente con la maggiore volumetria che lo caratterizza.

Analoghe considerazioni riguardano le **evaporazioni nette** riscontrate nei tre bacini esaminati: gli andamenti hanno carattere stagionale con picchi estivi che assumono i valori massimi (circa 11000 m³/gg) per il lago di Castelnuovo caratterizzato dalla superficie maggiore.

Le massime **oscillazioni di livello** calcolate nel periodo si sono riscontrate in corrispondenza dell'invaso più piccolo, il San Cipriano come evidenziato dai risultati riassunti in TABELLA 52. Il livello del lago di San Cipriano diminuisce durante i mesi estivi per le minori precipitazioni, sia per il divieto di prelievi di portate dall'Arno. Analoghe diminuzioni durante i mesi estivi si riscontrano nei livelli degli altri laghi.

TABELLA 52 - Esito delle modellazioni idrologiche – idrauliche: livelli

	quota max ritenuta (m slm)	Livelli (m slm) calcolati nel periodo 9/'92 – 12/'19		Escursione massima (m)
		minimo	massimo	
Castelnuovo (A)	146.0	144.33	147.19	2.86
Castelnuovo (B)		144.44	147.19	2.74
Allori (A)	182.0	180.66	183.18	2.52
Allori (B)		180.48	183.18	2.70
S. Cipriano	152.3	147.81	153.26	5.46

Diversamente dal **Deflusso Minimo Vitale** di 10 l/s sempre garantito dal lago di San Cipriano al suo emissario, il borro Sinciano, le condizioni meteorologiche del periodo simulato non sono sempre state tali da garantire i DMV dai laghi di Allori e Castelnuovo verso i rispettivi emissari. In particolare, nell'ipotesi di gestione denominata A (nessun rilascio dall'Allori al Castelnuovo) la disponibilità del DMV di 10 l/s dal lago di Allori verso il suo emissario Lanzi è venuta meno per 187 giorni (meno del 2% del periodo simulato) ripartiti in due periodi consecutivi negli anni 2012 e 2017; nella medesima ipotesi gestionale, il DMV di 12 l/s dal lago Castelnuovo non è stato garantito all'emissario Sinciano per un totale di 647 giorni totali non consecutivi (6.5% del periodo simulato) di nuovo principalmente contenuti negli anni 2012 e 2017.

Nell'ipotesi di gestione denominata B (con rilascio di 10 l/s, quando disponibili, dal lago Allori al lago Castelnuovo) i periodi di indisponibilità del DMV aumentano a 757 giorni non consecutivi (7.6% del periodo simulato) per il lago di Allori e diminuiscono a 356 giorni totali non consecutivi (3.6% del periodo totale simulato) per il lago Castelnuovo, coerentemente con gli ipotizzati rilasci verso il lago Castelnuovo.

Indipendentemente dall'ipotesi di gestione, l'esiguità dei periodi di indisponibilità del DMV riscontrata per i laghi di Allori e Castelnuovo depone a favore della stabilità idrologica complessiva del sistema. La disponibilità idrica dei volumi a disposizione negli invasi è comunque tale da consentire la messa a punto di procedure di gestione utili a garantire il mantenimento del DMV anche nei periodi di emergenza idrica.

I risultati della modellazione idrologiche - idrauliche dei laghi hanno permesso di valutarne anche il **tempo di ricambio**, ossia il tempo che impiega il corpo idrico emissario per far defluire un volume d'acqua pari a quello dell'invaso. Dall'analisi effettuata i tempi di ricambio medi per il periodo 1993-2019 sono risultati di 6.6 mesi per il lago di San Cipriano, 44 e 42.4 mesi per il lago di Allori, nelle ipotesi gestionali A e B rispettivamente, e 89.1 e 75.8 mesi per il lago di Castelnuovo sempre nelle due ipotesi gestionali A e B. La minore tempistica di ricambio associata al lago San Cipriano è dovuta sia alla sua capacità (largamente inferiore a quella degli altri due laghi), sia ai rilasci verso il proprio emissario, garantiti costanti e pari a 10 l/s, e verso la centrale, parzialmente compensati dai pompaggi in Arno peraltro limitati ai soli mesi di aprile, maggio e giugno.

Per quanto concerne il ridotto idrodinamismo del lago Castelnuovo, caratterizzato dai maggiori tempi di ricambio, è stato altresì verificato che il trasferimento di tutti i deflussi dell'Allori al Castelnuovo produce un ridimensionamento del tempo di ricambio di quest'ultimo fino a valori molto simili a quelli del lago Allori.

I risultati della modellazione idrologica dei 3 bacini sono stati posti a confronto con le evidenze del **Piano Stralcio** di Bilancio Idrico redatto dall'Autorità di Bacino del fiume Arno nel 2008. Il parallelo è stato sviluppato sia in termini generali di approccio tecnico-scientifico, sia in termini puntuali, ossia con riferimento alla determinazione di alcuni parametri specifici, primo fra tutti il Deflusso Minimo Vitale assunto pari alla portata minima di 7 giorni consecutivi con 2 anni di tempo di ritorno ($Q_{7,2}$). L'esito del confronto è stato positivo: i valori delle portate $Q_{7,2}$, ricostruiti per i tre bacini con l'applicazione delle formule di regionalizzazione, sono risultati pari a 5.07 l/s, 5.32 l/s e 9.0 l/s rispettivamente per i laghi di Allori, Castelnuovo e San Cipriano, e sono apparsi generalmente superiori anche se confrontabili con quelli ottenuti per mezzo dell'analisi delle portate minime fornite dal modello idrologico per il periodo 1992-2019. In entrambi i casi, i DMV calcolati sono risultati inferiori a quelli ipotizzati nella presente verifica del progetto di riassetto dell'area che assume come deflussi minimi 10 l/s per i laghi di Allori e San Cipriano, e 12 l/s per il lago di Castelnuovo.

Qualora si adottassero i deflussi minimi ricavati mediante le formule di regionalizzazione predisposte nel Piano Stralcio del Bilancio Idrico della Regione Toscana, sarebbe ragionevole attendersi una riduzione dei periodi di indisponibilità dei DMV precedentemente segnalati per i laghi di Allori e Castelnuovo.

8.2 Modellazioni bio – chimiche

Lago San Cipriano

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.5 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.010 e 0.018 mg/l (media annua di circa 0.013 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 10.506 e 24.983 UFC/100 ml (media annua di 15.9 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 4.092 e 51.971 UFC/100 ml (media annua intorno a 18.7 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 18.062 e 444.381 MPN/100 ml (media annua intorno a 125.7 MPN/100 ml).

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli.

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione **idropotabile** delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato, le concentrazioni medie annue dei parametri in esame rispettano generalmente i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento fisico semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano, ad eccezione

del parametro Coliformi fecali che indica invece la necessità di un trattamento previsto per la categoria A2.

I valori medi mensili stimati presentano, invece, qualche superamento dei limiti previsti per la categoria A1 per *Escherichia coli*, Enterococchi e, soprattutto, per il parametro Coliformi fecali.

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la **balneazione** dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti.

Il confronto tra i valori di concentrazione dei parametri considerati ricavati dalle periodiche campagne di misura condotte da CESI, CIERRE ed ARPAT e quelli calcolati dal modello previsionale ha avuto esito generalmente positivo, nelle more delle inevitabili schematizzazioni adottate dal modello.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata per il bacino di San Cipriano, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Lago Allori

IPOTESI GESTIONALE A

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.075 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.005 mg/l e 0.006 mg/l (media annua pari a 0.005 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.312 e 8.137 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.8 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.445 e 23.076 UFC/100 ml (media annua intorno a 7.8 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 3.922 e 33.593 MPN/100 ml (media annua intorno a 14.7 MPN/100 ml).

IPOTESI GESTIONALE B

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.076 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.005 mg/l e 0.006 mg/l (media annua pari a 0.005 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 1.317 e 8.338 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.8 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.445 e 23.655 UFC/100 ml (media annua intorno a 8.0 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 3.945 e 34.017 MPN/100 ml (media annua intorno a 15.0 MPN/100 ml).

I valori dei parametri considerati non variano in modo significativo nelle due ipotesi gestionali considerate. In entrambi i casi, infatti, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli.

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione **idropotabile** delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della qualità dell'acqua del corpo idrico considerato, la concentrazione media annua dei parametri in esame rispetta i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano. Le concentrazioni medie mensili dei parametri Enterococchi e Coliformi fecali mostrano invece qualche superamento di tale limite, pur rientrando nei limiti previsti per la categoria A2 (Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione).

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la **balneazione** dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti.

Il confronto tra i valori calcolati dal modello previsionale e quelli ricavati dalle campagne di misura condotte da ARPAT per il lago di Allori ha evidenziato differenze compatibili con il diverso assetto del lago, simulato nelle future condizioni del progetto di riassetto caratterizzate da volumetrie superiori a quelle che lo caratterizzano attualmente a cui si riferiscono i rilievi ARPAT.

Lago Castelnuovo

IPOTESI GESTIONALE A

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.074 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.021 e 0.035 mg/l (media annua di circa 0.027 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 0.232 e 9.087 UFC/100 ml (media annua intorno a 3.267 UFC/100 ml), quella di Enterococchi intestinali tra 0.523 e 20.992 UFC/100 ml (media annua di circa 6.337 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 0.308 e 52.817 MPN/100 ml (media annua di circa 15.418 MPN/100 ml).

IPOTESI GESTIONALE B

Nelle condizioni ipotizzate, all'interno del bacino il modello prevede valori medi mensili di BOD₅ molto contenuti, anche ipotizzando un decadimento basso (circa 0.074 mg/l come media annua); per quanto riguarda gli altri parametri considerati, la simulazione matematica colloca la concentrazione media mensile di fosforo totale in un campo di valori compreso tra 0.021 e 0.035 mg/l (media annua di circa 0.027 mg/l), quella di *Escherichia coli* tra 6.590 e 115.681 UFC/100 ml (media annua intorno a 56.0 UFC/100 ml) quella di Enterococchi intestinali tra 11.623 e 261.456 UFC/100 ml (media annua di circa 110.0 UFC/100 ml) e quella di Coliformi fecali tra 34.382 e 705.226 MPN/100 ml (media annua di circa 220.4 MPN/100 ml).

Anche per il lago Castelnuovo, i valori dei parametri considerati non variano in modo significativo nei due scenari gestionali considerati. In entrambi i casi, infatti, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai soli parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che la ritenzione nel bacino induce un miglioramento della qualità dell'acqua dell'affluente e mostra la possibilità di usi plurimi della risorsa idrica.

Ai fini della valutazione della compatibilità con la vita dell'**ittiofauna**, i valori di BOD₅ e di fosforo totale forniti dalla modellazione ricadono generalmente ampiamente entro i limiti previsti dal DLgs 152/06 per i corpi idrici salmonicoli.

Relativamente alle categorie di potabilizzazione previste per l'utilizzazione **idropotabile** delle acque nel DLgs n° 152/06, che stabilisce il tipo di trattamento di potabilizzazione necessario in funzione della

qualità dell'acqua del corpo idrico considerato, le concentrazioni medie annue dei parametri in esame rispettano generalmente i limiti riportati dal DLgs. 152/06 per la categoria A1, che richiede un trattamento fisico semplice e disinfezione, prima della distribuzione al consumo umano, ad eccezione del parametro Coliformi fecali che indica invece la necessità di un trattamento previsto per la categoria A2 (Trattamento fisico e chimico normale e disinfezione).

I valori medi mensili stimati presentano, invece, superamenti dei limiti previsti per la categoria A1 per *Escherichia coli*, Enterococchi e, soprattutto, per il parametro Coliformi fecali.

In riferimento ai criteri di qualità previsti per la **balneazione** dal D.M. 30/03/2010, i valori ottenuti rispettano i limiti di legge previsti.

In conclusione, la previsione modellistica effettuata, con riferimento ai parametri considerati e alle condizioni al contorno ipotizzate, indica che il transito delle acque degli affluenti nei laghi indurrebbe un miglioramento della qualità e mostra la possibilità di eventuali usi plurimi della risorsa.

Vista l'idrologia complessiva dell'area, la morfologia degli invasi e le caratteristiche qualitative delle acque affluenti ai bacini di Allori, S. Cipriano e Castelnuovo, l'analisi complessiva dei risultati ha consentito di verificare l'assenza di specifiche problematiche di peggioramento della qualità dell'acqua. Viste le portate in ingresso ai laghi, i volumi di invaso sarebbero comunque tali da mitigare gli effetti dovuti alle differenze qualitative e quantitative dei rispettivi corpi idrici immissari.

Anche dalle valutazioni dello stato trofico dei laghi in riferimento alla concentrazione di fosforo totale, tramite applicazione dell'indice LTLeco (Livello trofico dei laghi per la classificazione dello Stato Ecologico) previsto dal DM. 260/2010 e del modello Vollenweider non risultano situazioni di particolare criticità.

In aggiunta a quanto sopra evidenziato, si sottolinea che è prevista la derivazione delle acque reflue degli abitati di Neri e Castelnuovo dei Sabbioni (fonte Publiacqua, 2013) al fine di non scaricare più direttamente nei borri, non andando quindi più a confluire nel lago di Castelnuovo. Si può ipotizzare che, realizzata tale derivazione, la qualità dell'acqua del lago di Castelnuovo sarà migliore rispetto a quella risultante dalle presenti modellazioni.

Si fa osservare che la verifica in oggetto non ha preso in alcuna considerazione i benefici sulla qualità delle acque dei laghi (miglioramento del profilo ecologico) che deriveranno dagli interventi di rinaturalizzazione e fitodepurazione in progetto per l'area mineraria ed i laghi.

In ogni caso, alla luce dei risultati emersi dalle campagne di misura recentemente eseguite (2019), concernenti il monitoraggio dei parametri chimico-fisici dei borri e dei laghi, della comunità macrobentonica e delle diatomee bentiche dei corsi d'acqua, si evidenzia, per completezza di informazione, che la qualità delle acque della maggior parte dei borri non mostra compromissione in riferimento ai parametri considerati, raggiungendo lo Stato Ecologico e lo Stato Chimico "Buono"; fanno eccezione il borro Meleto che risulta in Stato Ecologico "Scarso", i borri Pianale e Bicchieraie, che risultano in Stato Ecologico "Sufficiente". I tre laghi presentano Stato Chimico "Buono" e Stato Ecologico "Sufficiente".

Tali risultati sono stati confrontati anche, per quanto possibile, con i dati riportati nel Piano di Gestione delle Acque del Distretto dell'Appennino Settentrionale (Il ciclo approvato con Deliberazione n. 234 del 3 marzo 2016) facendo particolare riferimento alle schede dei corpi idrici appartenenti al bacino idrografico Valdarno superiore: Borro di San Cipriano dei Frati (cod. WISE IT09CI_N002AR021fi) e Borro Lanzi del Pianale (cod. WISE IT09CI_N002AR026fi). Entrambi i corpi idrici sono classificati in Stato Ecologico "sufficiente" e in Stato Chimico "buono" al 2014, il lago di S. Cipriano risulta invece classificato

in Stato Ecologico “sufficiente” e in Stato Chimico “non buono”, sostanzialmente in linea con i risultati dei monitoraggi effettuati nel periodo 2014-2019.

Il confronto tra i valori calcolati dal modello previsionale e quelli ricavati dalle campagne di misura condotte da ARPAT per il lago di Castelnuovo ha evidenziato differenze compatibili con il diverso assetto del lago, simulato nelle future condizioni del progetto di riassetto caratterizzate da volumetrie superiori a quelle che lo caratterizzano attualmente a cui si riferiscono i rilievi ARPAT.

9 BIBLIOGRAFIA CITATA O CONSULTATA

- Autorità di Bacino del fiume Arno, 2008. Progetto Piano Stralcio "Bilancio Idrico". Adottato nella seduta del Comitato Istituzionale del 28 febbraio 2008 e pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 78 del 2 aprile 2008.
- ARPAT <http://sira.arpat.toscana.it> (dati di monitoraggio ARPAT per acque destinate alla potabilizzazione, POT, e acque superficiali, MAS)
- CESI, 2013 "Aggiornamento dell'analisi modellistica del bilancio idrico e della qualità delle acque dei bacini dei laghi Castelnuovo, Allori e S.Cipriano". Prot. N. B3018674.
- CESI, 2020 "Area mineraria di S. Barbara – calibrazione del modello idrologico HEC-HMS attraverso le misure effettuate nel bacino idroelettrico di S. Cipriano e le evidenze del Piano Stralcio di Bilancio Idrico della Regione Toscana.". Prot. N. C0007404.
- Dragoni e Valigi, 1994. "Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia Centrale." GEOLOGIA ROMANA, **30**, 1994
- EISENBERG D. & KAUZMANN W., 1969 - "The Structure and Properties of Water". Oxford University Press 1969.
- Enel Spa, 2003. Ingegneria Civile e Idraulica. Unità di Idrologia, Mestre (VE). "Progetto per il recupero ambientale della miniera di S.Barbara nei comuni di Cavriglia (AR) e Figline Valdarno (FI). Relazione idrologica".
- Enel SpA, 2014. "Progetto per il recupero ambientale della miniera di S.Barbara nei comuni di Cavriglia (Ar) e Figline Valdarno (Fi). Prima fase attuativa. Studio generale su bilancio idrologico e qualità delle acque. Relazione di sintesi. Revisione 01.", 10 Luglio 2014.
- EPRI, 1979: "Methodology for evaluation of multiple power plant cooling system effects", vol.III, Data Requirements; EA-1111, Vol.III, Research project 878-1; 1979.
- FISCHER, 1979: "Mixing in inland and coastal waters"; H.B.Fischer, E.J.List, R.C.Y. Koh, J.Imberger, N.H.Brooks; Academic Press, Inc.; 1979. Italie. Traduit de l'anglais par S. Christophe. EUR 19044 FR, 45pp.
- G. P. Megale, 2008. DAGA Università di Pisa in collaborazione con ARSIA. "Acqua e paesaggi. Cultura, gestione e tecniche nell'uso di una risorsa." Firenze, 29-30 maggio 2008. Atti pubblicati da Il Verde Editoriale.
- LAMMA-CRES, 2004: Valutazione del rischio erosione: applicazioni del modello Rusle.
- LORENZEN, 1976: "A long term phosphorus model for lake application in lake Washington", in "Modeling the biochemical process in aquatic systems"; A. Arbor Sci; R.P. Canale editor; 1976.
- Menduni G., 2008 "Un caso nazionale. Il bilancio idrico dell'Arno." Convegno Regione Toscana, AdB Arno dal titolo: "H2 zero. Le soluzioni alla crisi della risorsa idrica in Toscana."
- M. GRIMM, R. J.A. JONES, E. RUSCO and L. MONTANARELLA, 2003: Soil Erosion Risk in Italy: a revised USLE approach.
- VISMARA R., 1982: "Depurazione delle acque"; Hoepli Editore; Milano.
- VISMARA R., 1984: "Ecologia applicata, Quaderni, n°1"; Hoepli Editore; Milano.
- VISMARA R., 1992: "Ecologia applicata"; Hoepli Editore; Milano.

- <http://www.sir.toscana.it>
- <http://agrometeo.arsia.toscana.it>
- E. Cominu, M. Cardu, S. Ranieri, M. Vascetta (2005). "Valutazione dello stato trofico di un lago di cava finalizzata alla mitigazione degli effetti ambientali causati dall'attività estrattiva", XV Congresso della Società Italiana di Ecologia, Torino 2005.
- Enel Produzione, 2015. E-mail del 2/9/2015 di Iacopo Brogi.
- US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2000). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual." March 2000
- US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (2018). "Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual." Version 4.3. September 2018

ALLEGATO 1 AL RAPPORTO C0011329

PROTOCOLLO n. B6002088
PAGG. 95

**Monitoraggio della qualità dell'acqua dei laghi Castelnuovo, Allori e S. Cipriano e dei rispettivi
emissari (novembre 2014- settembre 2015) Rev. 1**