

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI AGRONOMIA, ALIMENTI, RISORSE NATURALI,

ANIMALI E AMBIENTE

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di Laurea Magistrale in Scienze e Tecnologie Agrarie

**EFFICACIA DEGLI INVASI ARTIFICIALI NELLA
MITIGAZIONE DELLA SICCATÀ IN AGRICOLTURA**

Relatore:

Prof. Paolo Tarolli

Correlatore:

Dott.ssa Wendi Wang

Laureando:

Davide Odorizzi

Matricola:

2062900

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

INDICE

Abstract	1
Riassunto	2
1. Introduzione	3
1.1. Siccità e settore agricolo	3
1.1.1. <i>Caratteristiche e cause del fenomeno della scarsità idrica</i>	3
1.1.2. <i>L'impatto della siccità agronomica</i>	6
1.2. Gli invasi artificiali ad uso irriguo	11
1.2.1. <i>La raccolta dell'acqua in agricoltura</i>	11
1.2.2. <i>Diffusione degli invasi in Italia e nel mondo</i>	15
1.2.3. <i>La copertura degli invasi come strategia di riduzione delle perdite idriche</i>	19
1.3. Obiettivo della tesi	23
2. La siccità del 2022 nel nord Italia	25
2.1. Il contesto climatico europeo	25
2.2. Le cause meteorologiche	26
2.3. La situazione idrologica sul basso corso del fiume Brenta	31
2.4. Le conseguenze sulle produzioni agricole	33
3. L'area sperimentale di Fossò	35
3.1. Descrizione del sito pilota	35
3.1.1. <i>Caratteristiche generali dell'opera</i>	35
3.1.2. <i>Tipologie di copertura ipotizzate</i>	37
3.2. Simulazione delle perdite per evaporazione	39
3.2.1. <i>Il processo fisico di evaporazione</i>	39
3.2.2. <i>Modalità di stima dell'evaporazione da superficie libera dell'acqua</i>	41
3.2.3. <i>Stima delle perdite per evaporazione da uno dei quattro invasi sperimentali</i>	44
4. Ipotesi di dimensionamento ed utilizzo di un invaso ideale	47
4.1. Descrizione dell'area esaminata	47
4.1.1. <i>Inquadramento idrografico</i>	47
4.1.2. <i>Analisi climatica</i>	50
4.1.3. <i>Analisi agronomica</i>	52
4.2. Assetto aziendale ipotizzato	54

4.3. Determinazione del fabbisogno idrico colturale	55
4.3.1. <i>Apporti pluviometrici</i>	57
4.3.2. <i>Asportazioni evapotraspirative</i>	58
4.3.3. <i>Applicazione del bilancio idrico in forma semplificata</i>	62
4.4. Dimensionamento dell'invaso ideale	65
4.4.1. <i>Caratteristiche del sistema irriguo</i>	65
4.4.2. <i>Scenario 1</i>	66
4.4.3. <i>Scenario 2</i>	68
4.4.4. <i>Determinazione del volume da invasare</i>	71
5. Criticità e vantaggi dello stoccaggio idrico tramite invasi aziendali	72
5.1. <i>Convenienza economica</i>	72
5.2. <i>Applicabilità su larga scala</i>	75
5.3. <i>Impatto ambientale</i>	77
Conclusioni	79
Bibliografia	80

ABSTRACT

In 2022 drought affected seriously northern Italy, causing severe losses to the agricultural production, especially in the Po Valley. The lack of rainfall already started in the early spring, associated to the scarcity of snow cover and summer's temperatures above the average value, defined a widespread drought at all the hydrologic cycle. From agriculture perspective this event showed issues in the local irrigation system, among which the incapacity of maintain a minimal supply during drought periods. This inefficiency is mainly due to the absence of secondary sources of water. Artificial basins are in these situations a useful instrument in helping use efficiently this resource and in maintaining it for long periods, making it available during dry seasons. This work wants to demonstrate the real utility of water harvesting techniques in a situation of growing climatic instability due to climate change that is causing the increase of extreme meteorological events. The analysis is focused on the low course of the Brenta river, where in 2023 was born the experimental site for agricultural reservoir, in the municipality of Fossò (VE). According to the climatic, agronomical and hydrographical condition of the surrounding area, the analysis define a hypothetical farm structure, used as a model in determining crop needs in term of water. Two scenarios have been identified, the first characterized by normal meteorological conditions and rainfall, instead of the second by extreme drought. The rainfall and potential evapotranspiration data used in the analysis comes respectively from 2016 and 2022. In addition to the technical aspects of the irrigation use of reservoirs, this work observe also advantages and disadvantages under the economic and ecologic point of view and considering a potential diffusion in the future on a wide area.

RIASSUNTO

Nel 2022 la siccità ha colpito gravemente il nord Italia causando ingenti danni alle produzioni agricole, soprattutto nell'area della Pianura Padana. La scarsità di piogge che si è manifestata già a partire dal periodo primaverile, associata ad una carenza degli accumuli nevosi e a temperature estive decisamente sopra la media, hanno determinato una situazione di scarsità idrica diffusa a tutti livelli del ciclo idrologico. Dal punto di vista dell'agricoltura, questo evento ha evidenziato la vulnerabilità del sistema irriguo locale, mettendo in luce molte criticità, tra cui l'incapacità di garantire apporti minimi in situazioni di carenza prolungata. Le cause di tale inefficienza sono legate alla mancanza, nella rete idraulica, di fonti di approvvigionamento secondarie da cui attingere risorsa idrica nel caso di siccità. Gli invasi artificiali rappresentano in questa situazione, una risorsa molto efficace nel conservare l'acqua, accumulandola nelle stagioni più umide e rendendola così disponibile nei periodi di scarsità idrica. Questa tesi si pone l'obiettivo di dimostrare la reale utilità di queste opere, in un contesto di crescente instabilità meteorologica legata al cambiamento climatico il quale sta causando un incremento dei fenomeni climatici estremi. Lo studio si focalizza sull'area del basso corso del fiume Brenta, dove nel 2023 è sorto un sito sperimentale per lo studio degli invasi artificiali, nel comune di Fossò (VE). In funzione delle condizioni climatiche, agronomiche ed idrografiche della zona circostante si è ipotizzato un assetto aziendale, utilizzato come modello per la determinazione dei fabbisogni idrici colturali ed irrigui. Dal punto di vista idrologico si sono distinti due scenari, il primo caratterizzato da piovosità e condizioni meteorologiche medie, mentre il secondo da estrema siccità. Si sono perciò utilizzati i dati meteorologici di piovosità ed evapotraspirazione potenziale (ET_0), relativi rispettivamente al 2016 e al 2022. Oltre agli aspetti di carattere tecnico relativi alla funzione irrigua sono stati infine discussi benefici e criticità dal punto di vista economico, ecologico e della potenziale diffusione su larga scala in un prossimo futuro.

1. INTRODUZIONE

1.1 Siccità e settore agricolo

1.1.1 Caratteristiche e cause del fenomeno della scarsità idrica

La siccità costituisce, assieme alle alluvioni, la principale calamità naturale associata all'acqua ed è quella che interessa una più ampia fascia di popolazione, rispetto a qualsiasi altro rischio. Nonostante il crescente numero di studi sul fenomeno, non esiste ancora ad oggi, una definizione univoca di "siccità", tuttavia, secondo D.A. Wilhite (2000) questa sarebbe qualcosa di poco realistico, considerando la grande variabilità, sia nelle modalità con cui il problema si manifesta, sia nell'impatto che esso può avere sulla popolazione e sulle attività economiche. Viene spesso indicata semplicemente come una "mancanza o carenza di pioggia che si protrae per un periodo di tempo eccezionalmente lungo" (Treccani). Essa, tuttavia, non dipende esclusivamente da un parametro meteorologico, ma è funzione del territorio e della società che interessa (Kuwayama et al., 2018).

La siccità può essere convenzionalmente suddivisa in quattro forme principali (Fig.1), menzionate per la prima volta da Donald A. Wilhite (2000) e condivise in seguito da tutta la comunità scientifica. Tale suddivisione, oltre a distinguere le modalità di manifestazione del fenomeno, definisce una serie di fasi spesso interconnesse, che riassumono l'evolversi della calamità. La prima è detta siccità meteorologica, ed è espressa come l'assenza di precipitazioni per un dato periodo, la cui durata determina generalmente l'intensità della carenza idrica. Da questo punto di vista però, vi sono forti differenze tra aree geografiche più o meno vulnerabili al problema, per le quali due eventi della stessa durata possono avere conseguenze molto diverse tra loro. Perciò, in funzione ad esempio della tipologia di suolo o della disponibilità fonti idriche alternative, il momento in cui la carenza si manifesta, oppure l'entità della calamità stessa possono essere anche molto differenti.

La seconda forma individuata da Wilhite è la siccità agronomica, la quale interessa direttamente le attività di coltivazione ed allevamento (D.A. Wilhite, 2000). Questa, data la forte dipendenza del settore agricolo dall'acqua atmosferica, segue in ordine temporale la siccità meteorologica spesso anche molto rapidamente. I parametri utilizzati per la sua descrizione sono molti, sia di tipo meteorologico che agronomico e in particolare tra questi, troviamo: l'umidità del suolo, la temperatura atmosferica, la

ventosità e l'evapotraspirazione. Solo un'analisi corale di queste variabili può dare un'indicazione su quello che è l'impatto della siccità agronomica sulle colture e quindi sulle produzioni.

Il protrarsi della scarsità idrica porta a coinvolgere per intero tutto il ciclo dell'acqua, fino ad una situazione detta di siccità idrologica. Questa si manifesta con una riduzione diffusa del livello di tutte riserve idriche sia superficiali che sotterranee, a causa dei ridotti apporti a livello dei bacini di ricarica dei corpi idrici, i quali non sono sufficienti per mantenere i livelli idrometrici alle condizioni normali. E sono proprio le quote di falde sottosuperficiali, laghi e corsi d'acqua, l'indice principale che ne descrive l'intensità.

Il quarto ed ultimo livello di siccità si raggiunge quando la società e l'ambiente, sperimentano gli impatti delle tre forme precedenti (Fleming-Muñoz et al., 2023). Si parla dunque di siccità socioeconomica ed ambientale, oppure di siccità ecologica facendo riferimento solo all'impatto nei confronti dell'ambiente. Questa tipologia più complessa nella sua manifestazione, rispetto alle altre tre, ha un impatto altrettanto polimorfico sulle attività economiche, sui bisogni e sulle abitudini della società e nei confronti dei diversi ecosistemi. Tra le conseguenze troviamo ad esempio, la scarsità negli approvvigionamenti di acqua potabile, carenze di prodotti agricoli o l'aumento dei prezzi degli stessi, riduzione della produzione di energia idroelettrica, aumento degli incendi boschivi e nei casi più gravi anche migrazioni.

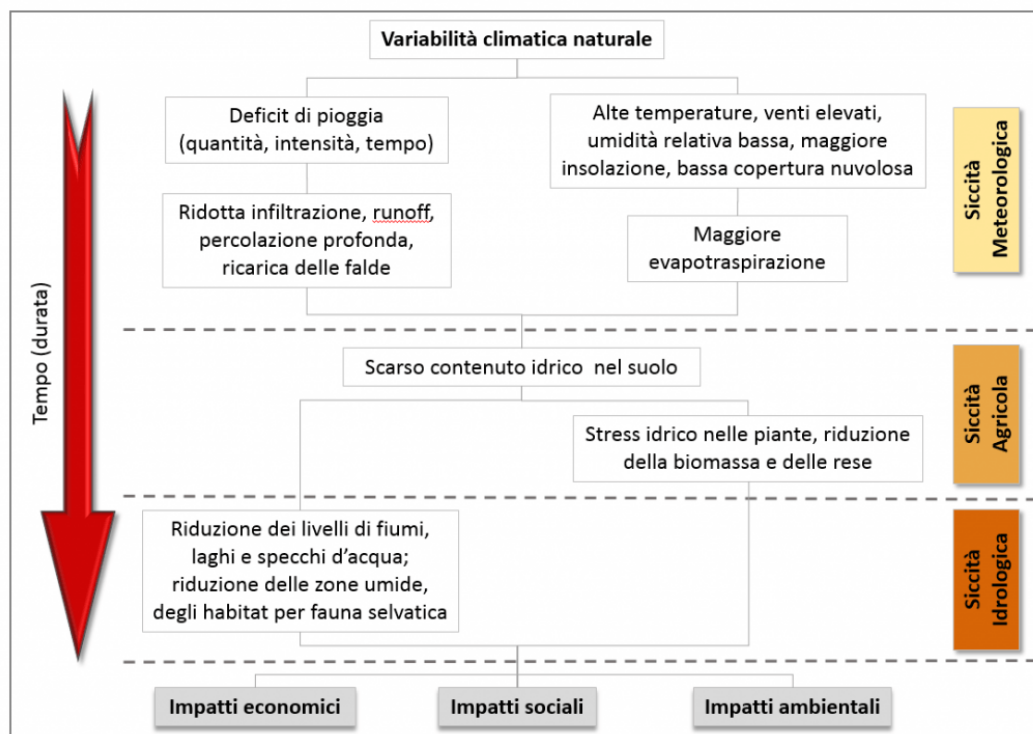


Fig. 1. Schema riassuntivo delle diverse forme di siccità, e degli elementi che le caratterizzano, secondo un'evoluzione temporale.

(figura presa da Osservatorio Siccità CNR, 2023)

Le principali caratteristiche che delineano un evento siccitoso sono l'intensità, la durata e la distribuzione spaziale. Come già visto descrivendone le diverse forme, la siccità si può manifestare con diversi range di intensità in termini quantitativi, di scarsità d'acqua. Questo parametro si determina confrontando le precipitazioni dell'annata asciutta, rispetto ad una situazione di riferimento (D.A. Wilhite, 2000) rappresentata generalmente dalla media storica degli anni precedenti. In questo modo si valuta il deficit di apporti idrici sul lungo periodo, anziché la singola stagione con mancanza di precipitazioni. Spesso, infatti, ad indurre la comparsa di fenomeni siccitosi, non è un singolo evento meteorologico caratterizzato da alte temperature e assenza di pioggia, ma piuttosto una lenta riduzione nella piovosità stagionale che porta ad una problematica "cronica", la quale manifesta i propri sintomi dopo un periodo di tempo anche lungo. D.A. Wilhite (2000) sostiene che la siccità richiede generalmente dai due ai tre mesi per divenire una criticità stabile ed in seguito a ciò può protrarsi anche per diversi anni, anche alternandosi a momenti più umidi nei quali tuttavia i corpi idrici non sono in grado di ristabilire i livelli normali. Ne è un esempio l'Australia, che dal 1996 al 2010 sperimentò la più grave siccità dai tempi della colonizzazione europea, conosciuta come "millennium drought". La calamità interessò la parte meridionale del continente e vide alternarsi periodi con intensità differente senza però mai mostrare una vera e propria ripresa, che si ebbe solo dopo quindici anni. L'evento costrinse il Paese ad attuare misure efficaci di tutela della risorsa idrica, sia dal punto di vista strutturale che politico.

Rispetto alla maggior parte delle altre calamità naturali, gli effetti della carenza idrica si accumulano lentamente ed è necessario altrettanto tempo perché si venga a ristabilire una situazione di normalità (D.A. Wilhite, 2000). In questo modo è pressoché impossibile definire un esatto momento di inizio ed uno di fine dell'evento, e soprattutto prevederne comparsa e durata. Questo rende estremamente difficile attivare strategie preventive di mitigazione e protezione, dato che al momento della comparsa delle prime manifestazioni di siccità, sarà già troppo tardi per mettere in atto interventi di prevenzione. La relazione tra le due caratteristiche, durate ed intensità è quella che meglio ne descrive la magnitudo o l'entità dell'evento siccitoso. Situazioni più gravi si avranno in caso di carenze idriche intense e prolungate che portano nella maggior parte dei casi a siccità di tipo socioeconomico ed ambientale. Anche dal punto di vista spaziale la siccità si differenzia dalle altre calamità, infatti è in grado di colpire porzioni di territorio estremamente ampie. Inoltre, l'impatto può variare di intensità di anno in anno e interessare aree differenti all'interno di uno stesso territorio. Quando la siccità è di tipo idrologico e perciò si verifica una scarsità diffusa nei corpi idrici, le conseguenze si ripercuotono su tutti gli approvvigionamenti presenti su di essi, portando l'impatto ad essere delocalizzato e presentarsi in aree non affette direttamente da carenza di precipitazioni.

Le cause principali della siccità sono di natura meteorologica. In particolare, la riduzione delle precipitazioni, associata ad alte temperature ed elevata ventosità, contribuiscono ad aumentare l'evaporazione dell'acqua dal suolo e dalle superfici. Per questo motivo anche e soprattutto su questi eventi calamitosi, si ripercuotono i cambiamenti climatici che ne intensificano l'entità. L'IPCC (Caretta et al., 2022) spiega come una maggior concentrazione di gas serra in atmosfera, abbia come conseguenza un aumento dell'energia termica ceduta all'acqua e di conseguenza un'intensificazione del ciclo idrologico. Il surriscaldamento globale sta inducendo negli ultimi 50 anni, un preoccupante incremento dei fenomeni siccitosi oltre ad una loro espansione in termini spaziali e diffusione in ambienti che finora non sembravano soffrire la carenza idrica (Wang et al, 2014; Mukherjee et al., 2018; Kuwayama et al., 2018; Afreen, 2023; Kose and Kongas, 2023; Caretta et al., 2022; Madadgar et al., 2017). Secondo l'IPCC ciò che si sta verificando nell'area Mediterranea e nella parte occidentale del Nord America, come una maggiore frequenza e un incremento della gravità degli eventi siccitosi, è da attribuire al riscaldamento globale di origine antropica. Recenti studi dimostrano come nell'ultimo ventennio anche in Italia, nello specifico nell'area del nord-est, si stia verificando un cambiamento delle condizioni meteorologiche, verso un clima sempre più arido (Straffelini & Tarolli, 2023). Oltre a questo, dagli anni '80 si sta osservando un aumento del tasso di evapotraspirazione globale, che a sua volta intensifica le perdite di umidità dal suolo, in quanto la vegetazione tende a richiamare più acqua. È stato dimostrato come il trend di crescita della siccità agronomica ed ecologica sia più evidente, rispetto a quella meteorologica proprio a causa dell'elevata domanda di acqua da parte degli organismi vegetali (Caretta et al., 2022). Questo fenomeno è attribuibile, da un lato alle maggiori temperature, le quali regolano i fenomeni evaporativi, e dall'altro alla più alta concentrazione di CO₂ in atmosfera, che influenza invece la traspirazione, regolando la conduttività stomatica. Anche la criosfera risulta profondamente deteriorata negli ultimi decenni e ad oggi la copertura nivale e glaciale, scorte idriche perenni, spesso non è in grado di garantire la ricarica primaverile delle falde (Caretta et al., 2022).

1.1.2 L'impatto della siccità agronomica

Definire l'impatto di un qualunque evento dannoso, è il primo passo per mettere in atto interventi di prevenzione idonei, e adattarli alle necessità del territorio e del livello di rischio che si presenta. Tuttavia, la stima dei danni di grandi calamità non è mai un'operazione semplice soprattutto a causa dell'enorme complessità che essi possono assumere. Spesso vengono colpiti molti settori diversi, sia in maniera diretta che indiretta e in quest'ultimo caso, l'impatto può essere attribuito anche all'effetto di

altre variabili. Tutto questo genera incertezza nella determinazione del reale danno inferto dalla calamità, a tal punto che l'impatto reale diviene difficilmente quantificabile.

Nel caso della siccità, questo è un tema poco studiato e le ricerche in merito sono scarse (Fleming - Muñoz et al., 2023). Per la carenza idrica, infatti, la complessità di questa operazione è ancora maggiore date le caratteristiche "criptiche" del fenomeno e l'assenza, per sua natura, di una definizione quantitativa (Kuwayama et al., 2018) in grado di delimitare esattamente cosa può essere considerato siccità e cosa invece no. La maggior parte dei danni causati dalla siccità non sono strutturali (D.A. Wilhite, 2000) come ad esempio nel caso della riduzione delle disponibilità idriche potabili per la popolazione, piuttosto che una riduzione nella produttività delle colture agricole. Per questa ragione non esistono delle vere e proprie soglie di danno, in grado di quantificare il problema. Nell'esempio precedente è alquanto difficile tradurre in termini economici una carenza di acqua potabile, così come definire esattamente quanta parte del calo di resa di una coltura sia da associare alla siccità e quanto ad altre variabili ambientali. Spesso, infatti, non si è in grado di attribuire la responsabilità interamente alla carenza idrica, proprio perché assieme ad essa si verificano altri fattori di danno, come ondate di calore o deficit di umidità atmosferica, i quali vanno ad intensificarne la dannosità. A tutto ciò si aggiunge l'enorme multi settorialità del problema che si traduce in una serie di impatti diversi per ogni attività economica, i quali richiedono di conseguenza diverse modalità di stima (D.A. Wilhite, 2000). Tra i settori più colpiti troviamo in primis quello agricolo, il quale secondo la FAO è interessato da ben l'83% dei danni causati dalla siccità (Fleming - Muñoz et al., 2023), seguito poi da quello manifatturiero, minerario ed energetico.

Una forte influenza sull'impatto della siccità è determinata dalla vulnerabilità della società (Fleming - Muñoz et al., 2023). Questa dipende essenzialmente, dalla frequenza con cui il problema si presenta alla popolazione e perciò dalle misure di prevenzione che sono messe in atto. Le aree che di recente stanno sperimentando per la prima volta situazioni gravi di scarsità idrica, si trovano maggiormente a rischio rispetto ad aree per loro natura aride, perché l'intero sistema ambientale, sociale ed economico è meno preparato ad affrontarla. Proprio a causa di questa relazione con l'areale climatico, si tende spesso ad ignorare la vulnerabilità nella già complicata equazione della siccità; tuttavia, questo è un fattore del quale deve essere tenuto in debito conto nella pianificazione strutturale dei vari settori. Essa, infatti, deriva da una coevoluzione della società con il problema ed è una conseguenza delle azioni dell'uomo. L'Australia viene spesso citata come un esempio in questo campo, proprio perché durante e dopo la "siccità del millennio" (millennium drought), le istituzioni hanno investito nell'implementazione di tecnologie idrauliche, nella determinazione del prezzo dell'acqua e in educazione ed informazione (Fleming - Muñoz et al., 2023). Anche in Italia, tra nord e sud, sussistono grandi differenze di vulnerabilità alla carenza idrica, soprattutto dal punto di vista agricolo. La parte meridionale del Paese presenta un'agricoltura co-evoluta con un clima per sua natura secco e per questo si è adattata a

condizioni di scarsità idrica sia nella scelta delle specie coltivate che nelle pratiche agronomiche. Al nord invece, parecchie produzioni dipendono ancora da un'elevata piovosità atmosferica e da irrigazioni frequenti, basti pensare alla coltivazione del riso o a quella del mais, le quali per questo motivo sono state maggiormente colpite dalla recente siccità del 2022.

La Commissione europea ha avviato nel 2021 il programma EDORA (European Drought Observatory for Resilience and Adaptation), che si pone come obiettivo quello di migliorare le conoscenze in materia di resilienza e adattamento alla calamità, per definirne in modo migliore l'impatto e per affrontare il problema da un punto di vista comunitario. Tra gli strumenti che a breve verranno messi a disposizione vi sarà un database dedicato all'impatto della siccità e un atlante in grado di descrivere la distribuzione del rischio in Europa (EDORA, 2023). La siccità è stata analizzata da diversi punti di vista, in termini di settori o sistemi (e.g. ecosistemi), per ognuno dei quali si sono valutati la componente climatica, l'influenza degli elementi di vulnerabilità, gli "elementi" esposti (persone o cose) e le fasi transitorie fino al danno finale. Il tutto riassunto in un diagramma di impatto o impact chain (Fig. 2) attraverso cui è possibile individuare chiaramente e in modo mirato tutte le variabili che portano alla siccità.

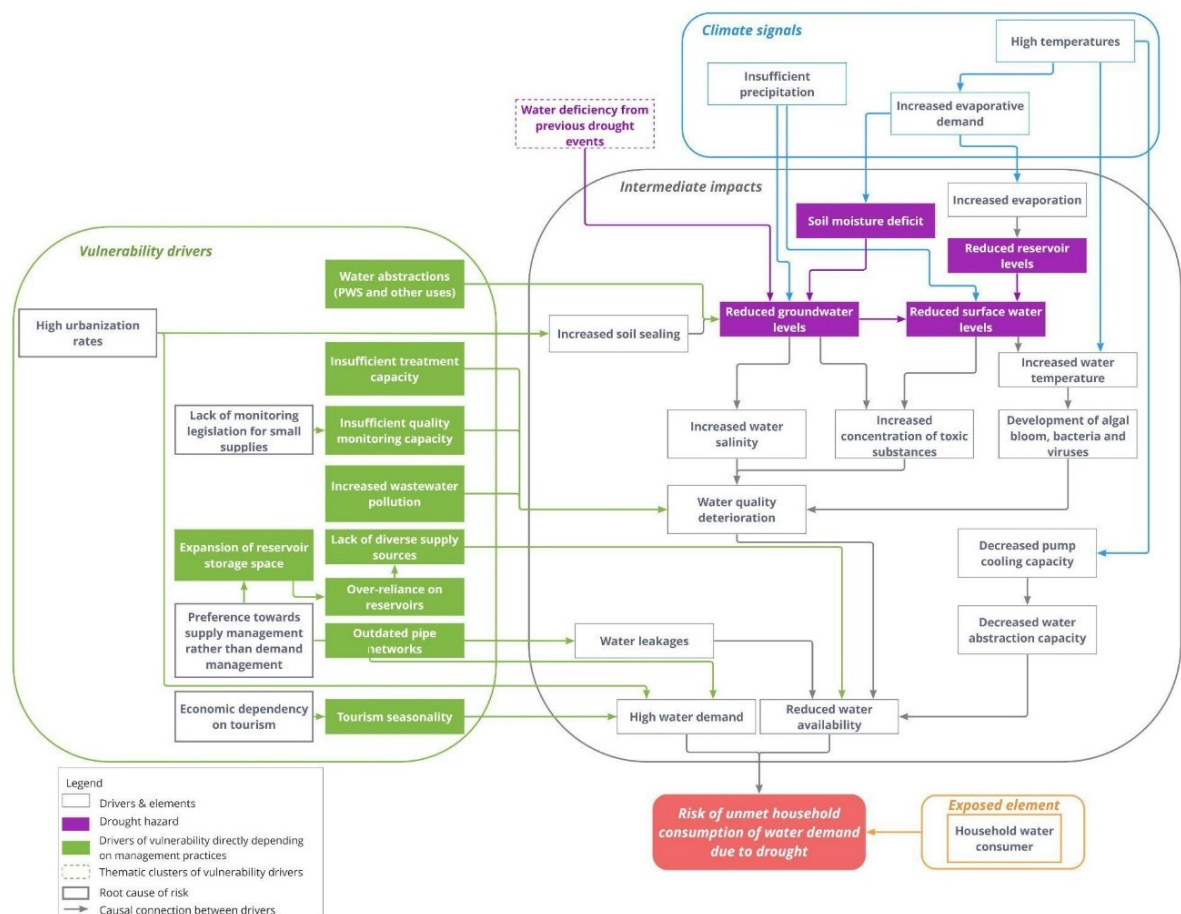


Fig. 2. Diagramma di impatto della siccità sugli approvvigionamenti idrici potabili

(figura presa da EDORA, 2023)

La stima del reale danno economico causato deve perciò tenere conto di tutti questi aspetti anche se, come visto finora, la loro “traduzione” in termini monetari è spesso difficile. La siccità è uno dei disastri naturali più costosi (Wang et al., 2014) e il database EM-DAT mostra come, nonostante il numero di eventi siccitosi rispetto al totale ammonti solo ad un 5%, questi siano responsabili di ben un 30% dei danni economici. Solo nel 2007, la stima dei danni da essa causati negli Stati Uniti ammonta a 2,7 miliardi di dollari (Wang et al., 2014).

Come già evidenziato, la siccità è la calamità che colpisce in maniera più severa l’agricoltura ed è stata individuata come il principale fattore di riduzione delle rese agricole a livello mondiale (Caretta et al., 2022). La forte relazione tra siccità ed agricoltura non deve sorprendere se si considera che, secondo il “Rapporto mondiale delle NU sullo sviluppo delle risorse idriche” del 2021, l’agricoltura è ritenuta responsabile in media del 69% dei prelievi idrici globali di acqua dolce per irrigazione ed abbeveraggio del bestiame, con percentuali che arrivano fino al 95% nei Paesi in via di sviluppo. Si pensi inoltre, che solamente il 23% dei terreni coltivati a livello mondiale sono irrigati (Caretta et al., 2022) e provvedendo a circa il 34% delle calorie globali. La restante parte, dipende esclusivamente dall’acqua atmosferica e perciò è sottoposta ad un rischio ancora maggiore di perdite.

La riduzione delle rese è certamente la principale e più grave conseguenza della scarsità idrica sul settore agricolo. Tra il 1961 e il 2006 queste perdite sono state stimate attorno ad un 25% del totale della produzione, con maggiore incidenza su mais, riso e soia (Caretta et al., 2022). Per questo l’agricoltura si trova da un lato a dover fronteggiare le problematiche meteorologiche, mentre allo stesso tempo deve sostenere l’aumento della popolazione mondiale e la conseguente richiesta di cibo. La crescita demografica e i cambiamenti sociali e nella distribuzione del reddito, fanno prevedere entro il 2050, un aumento nella domanda di alimenti a livello mondiale stimato tra il 70 e il 100%. D’altra parte, le prospettive di sviluppo del settore agricolo sono molto limitate e ad esempio, un’espansione delle aree coltivate, può sopperire solo ad un 20% di questo incremento (Assouline et al., 2015). L’impatto sulla produttività varia ovviamente in funzione dell’entità della carenza idrica, ma anche in funzione del momento in cui questa colpisce la coltura, ovvero in quale fase fenologica. Nella maggior parte delle piante agrarie la fioritura è la più sensibile, e ciò è dovuto al disturbo dei processi meiotici, di fecondazione e di antesi, che si traduce ad esempio nei cereali, in una riduzione del numero di cariossidi per spiga, la quale su riso e frumento può arrivare anche al 35-75% (Afreeen, 2023). Oltre a questo aspetto, molti altri parametri agronomici, morfo-fisiologici e biochimici della pianta, sono influenzati dal trattamento idrico e si ripercuotono in modo più o meno importante sulla produttività. Nei cereali, inoltre, come la combinazione di stress idrico e stress da calore, porta ad avere danni proporzionalmente maggiori rispetto alla somma dell’impatto delle due problematiche considerate singolarmente.

Per quanto riguarda il settore zootecnico, la mancanza di acqua per l'abbeveramento del bestiame porta a un calo nell'appetibilità e perciò nella quantità di alimento ingerita. Questa condizione di stress si ripercuote sulla produzione, dal punto di vista degli animali da carne, con una riduzione nell'accrescimento muscolare, mentre per gli animali in lattazione, con scadimenti qualitativi e quantitativi del latte e dei prodotti caseari derivati. La mancanza d'acqua può interessare inoltre le materie prime utilizzate per l'alimentazione animale, la maggior parte delle quali sono di origine vegetale (Afreeen, 2023). Una riduzione nella resa delle colture foraggere può far aumentare i prezzi dei mangimi e di conseguenza riflettersi su un aumento dei costi dei prodotti di origine animale o costringere gli allevatori a rifornirsi presso altre fonti di approvvigionamento, con caratteristiche qualitative più scadenti.

Oltre alle conseguenze dirette sulla produzione, la siccità determina una serie di altre problematiche secondarie che solamente in parte sono correlate al calo delle rese, come appunto i maggiori costi produttivi. Spesso, infatti, la mancanza di piogge costringe gli agricoltori a ricorrere ad irrigazioni aggiuntive in caso di terreni irrigui o di soccorso nei terreni coltivati in asciutto, per evitare di perdere l'intera coltura. Nei casi più gravi la persistente condizione di scarsità idrica può costringere l'azienda a scelte che vedono un cambio di ordinamento colturale o produttivo, modificando le pratiche agronomiche e la scelta delle specie o varietà coltivate. Scelte che richiedono cambiamenti a livello strutturale, del tipo di lavorazioni e di macchinari, nonché degli impianti. Nell'Europa meridionale si ipotizzano nei prossimi anni, possibili riduzioni di resa per le colture a semina primaverile come mais, soia e girasole, le quali potrebbero portare ad un adattamento con sfasamenti del ciclo colturale o sostituzione delle coltivazioni (Afreeen, 2023). Il tutto si traduce in un aumento non indifferente dei costi, ma di difficile determinazione in fase di stima, a cui si aggiungono le fluttuazioni dei prezzi di mercato. Queste conducono spesso ad errori sia nelle stime dei danni che dei redditi degli agricoltori, falsando in maniera più o meno importante la determinazione dell'impatto di una carenza idrica (Kuwayama et al., 2018).

L'aumento dei costi e la riduzione dei ricavi, porta a serie conseguenze sulle società rurali che basano buona parte delle loro attività sull'agricoltura. In molti casi si parla anche di una dimensione di impatto individuale della siccità, sul singolo agricoltore o su un singolo nucleo familiare e nonostante questo punto di vista sia raramente preso in considerazione, è stato confermato un peggioramento della salute dal punto di vista mentale, con un aumento dei fenomeni di depressione di circa il 10%, rispetto ad una situazione normale. Tali disturbi vengono associati in primo luogo a problemi economici indotti dalla siccità, tuttavia, anche la degradazione ambientale può avere conseguenze fisiologiche di angoscia e impotenza nei confronti di un grave danno ecologico o paesaggistico, conosciute con il nome di "solastalgia" (Fleming - Muñoz et al., 2023).

Tutto ciò rimarca la grande vulnerabilità delle aree rurali al problema della siccità, le quali si presentano

in tutti gli ambienti del mondo, le più esposte alla siccità sia da un punto di vista economico che sociale, per la loro naturale dipendenza dall'acqua (Fleming - Muñoz et al., 2023).

1.2 Gli invasi artificiali ad uso irriguo

1.2.1 La raccolta dell'acqua in agricoltura

Le attività dell'uomo si sono sviluppate fin dai tempi più antichi attorno all'acqua, usata come fonte di cibo, via di comunicazione e forza motrice. Di conseguenza anche la siccità caratterizza da sempre la storia della nostra civiltà e con essa, tutti i popoli succedutisi nel corso dei secoli hanno dovuto convivere. Nelle aree più aride del mondo le popolazioni locali sono coevolute con una costante scarsità idrica, sviluppando tecniche agronomiche e costruttive, volte alla conservazione dell'acqua, nelle quali ancora oggi è possibile imbattersi soprattutto nei Paesi meno sviluppati. Negli ultimi decenni il progresso tecnologico e scientifico ha portato ad una migliore conoscenza del fenomeno e allo sviluppo di sistemi di contrasto della siccità efficienti e basati su nuove tecniche, come ad esempio la dissalazione delle acque marine o i sistemi di ricarica degli acquiferi sotterranei. Tuttavia, la complessa natura della calamità non mai permesso di trovare vere e proprie soluzioni al problema. L'azione dell'uomo si è sempre dovuta limitare alla riduzione della vulnerabilità del territorio ed anche le nuove tecniche messe a punto con il recente progresso scientifico, non hanno permesso di adottare un approccio "curativo". In una situazione di siccità in atto, infatti, la scarsità d'acqua diffusa a tutte le fonti di approvvigionamento, impedisce qualsiasi azione di conservazione o trasferimento dell'acqua. Oltre a ciò, devono essere considerati anche i tempi di realizzazione delle opere strutturali. L'iter di costruzione di un bacino artificiale di medio-grandi dimensioni, ad esempio, richiede dalla decisione di costruzione all'effettivo utilizzo dell'acqua, un tempo medio di dieci anni (Weiss, 2022). Per questi motivi, qualsiasi azione di contrasto della siccità deve essere attuata preventivamente e in totale assenza del problema, in modo da disporre degli strumenti necessari nei momenti di emergenza. Nazioni come l'Australia e la Cina, già da anni stanno orientando le proprie politiche in questa direzione, promuovendo la costruzione di opere di monitoraggio e di prevenzione, nonché formando la popolazione al risparmio idrico. Infatti, secondo l'approccio proposto da Fleming - Muñoz et al. (2023), che individua tre dimensioni di impatto della siccità: individuale, settoriale e generale (o di sistema), è estremamente importante l'adozione di interventi preventivi a tutela non solo del singolo settore ma anche della popolazione e dell'intera società. In ogni caso la massima efficacia si ottiene aumentando

la resilienza dell'intero sistema idrico, attraverso l'integrazione di interventi che mirano ad aumentare la disponibilità della risorsa idrica in caso di siccità, uniti ad un migliore e più efficiente utilizzo della stessa.

In questo processo di adattamento della gestione idrica al problema della siccità, quello agricolo è il settore maggiormente coinvolto, essendo il principale utilizzatore di acqua dolce. Come evidenziato anche dall'IPCC gli interventi più efficaci per mitigare la siccità sono quelli messi in atto dal settore agricolo, tra i quali vi sono al primo posto la scelta della coltura e le pratiche agronomiche (Caretta et al., 2022). In generale il primo strumento a disposizione degli agricoltori per contrastare la carenza idrica è proprio quello di scegliere specie o cultivar più resistenti o meno esigenti in termini irrigui. Il miglioramento genetico si sta muovendo verso varietà più performanti anche in questi termini, soprattutto in Paesi dove la siccità è una problematica grave, come Marocco (El Idrissi et al., 2023), Kazakistan (Sapakhova et al., 2023), Sudan (Kose e Kongas, 2023). Tuttavia, non sono solo le decisioni in fase di semina a giocare un ruolo fondamentale nella gestione della siccità. Molte pratiche agronomiche tendono a favorire o a ridurre la concentrazione di umidità nel terreno o nella pianta. È ben noto ormai come, ad esempio, la conservazione della sostanza organica sia di fondamentale importanza anche per le proprietà idrauliche del suolo e per un ottimale trattenimento dell'acqua. L'irrigazione ha invece, un ruolo molto dibattuto nella mitigazione della siccità. Infatti, al contrario di quanto si potrebbe pensare, in alcuni casi l'adattamento delle colture ha un effetto contrario, aumentandone la vulnerabilità e perciò di conseguenza anche l'impatto di una eventuale mancanza d'acqua repentina e prolungata (Nazioni Unite, 2021). Colture esigenti e adattate ad un'irrigazione intensa, saranno così sottoposte ad un maggiore stress in caso di carenza, rispetto a sistemi in asciutto.

Gli interventi colturali ed agronomici rivestono grande importanza nella riduzione dell'esposizione della coltura ai danni da siccità, tuttavia, la loro efficacia è pur sempre limitata e condizionata dalla disponibilità di acqua. Per questo motivo è di estrema importanza la gestione dell'acqua stessa sia meteorica che di irrigazione, nel caso di coltivazioni irrigue. In questo caso non è possibile parlare di una categoria di interventi vera e propria, piuttosto di un obiettivo generale, quale la conservazione e l'uso efficiente dell'acqua nell'agrosistema a partire dalla fonte idrica, fino alla coltura. In questo contesto le tecniche che si basano in qualche modo sullo stoccaggio idrico, rivestono un ruolo fondamentale per l'agricoltura in qualsiasi realtà rurale, soprattutto perché caratterizzate da una grande semplicità e relativa economicità rispetto ad altri metodi. L'accumulo di acqua è un sistema che permette di aumentarne la quantità disponibile (Kose e Kongas, 2023), raccogliendola nella stagione più umida e conservandola in vista di un periodo più asciutto. Tutti i sistemi basati su questo principio vengono raggruppati sotto il termine di pratiche di "water harvesting" (WH), le quali nonostante l'estrema semplicità del procedimento che hanno all'origine, comprendono un insieme molto ampio

ed eterogeneo di opere di stoccaggio, di captazione, di gestione e di controllo. La risorsa idrica accumulata può essere sia di origine idrologica e perciò prelevata da fiumi o acquiferi sotterranei, che di origine atmosferica, intercettata convogliando l'acqua di scorrimento superficiale durante gli eventi piovosi. In quest'ultimo caso si parla anche di "rainwater harvesting" (RWH). Un'analisi globale degli studi riguardanti l'uso di tecniche di WH in agricoltura, mostra che dal 1999 al 2018 le pubblicazioni sono passate da 1 a 57 all'anno con una crescita esponenziale, considerando che ben il 50% di questo materiale è stato pubblicato tra il 2014 e il 2018 (Velasco-Muñoz et al., 2019). Nello specifico i principali Paesi "produttori" di materiale scientifico sono, in ordine decrescente di numero di pubblicazioni, India, Cina, USA e Sud Africa, seguiti poi da alcuni Paesi europei come Olanda, Germania e Regno Unito ed infine l'Australia. Da notare che, al contrario di India e Cina che sono state tra i pionieri nel campo della gestione delle riserve idriche, nazioni come il Sud Africa, la Germania, l'Olanda sono emerse solamente dopo il 2005 con i primi studi (Velasco-Muñoz et al., 2019).

Già in passato la raccolta dell'acqua era una pratica consolidata, grazie alla semplicità con cui poteva essere messa in atto anche nei contesti più poveri in termini di risorse. Alcuni di questi sistemi, che riguardano in particolare la sistemazione del terreno, le modalità di impianto della coltura, oppure la costruzione vera e propria di particolari strutture irrigue o per lo stoccaggio dell'acqua, sono utilizzati ancora oggi. Un esempio tradizionale di WH su terreni ad elevata pendenza, sono i "contour terracing" o "contour ridges" (Fig. 3), una particolare forma di terrazzamento che troviamo con struttura e funzione analoga, sia in Sud America che in Africa centrale. Il loro scopo è, oltre al sostegno dei versanti, quello di trattenere le acque di scorrimento superficiale che altrimenti andrebbero perse. Altre tecniche per captare l'acqua atmosferica e convogliarla in prossimità della coltura su terreni pianeggianti, sono gli "zay pitting" africani e i "negarim" (Fig. 3) in Giordania, sistemazioni che consistono rispettivamente nella coltivazione all'interno di buche o di vasche quadrate. Questo consente di convogliare l'acqua, nel primo caso sul fondo della buca, nel secondo caso in un angolo della fossa, dove viene posta la coltura, generalmente costituita da alberi da frutto.

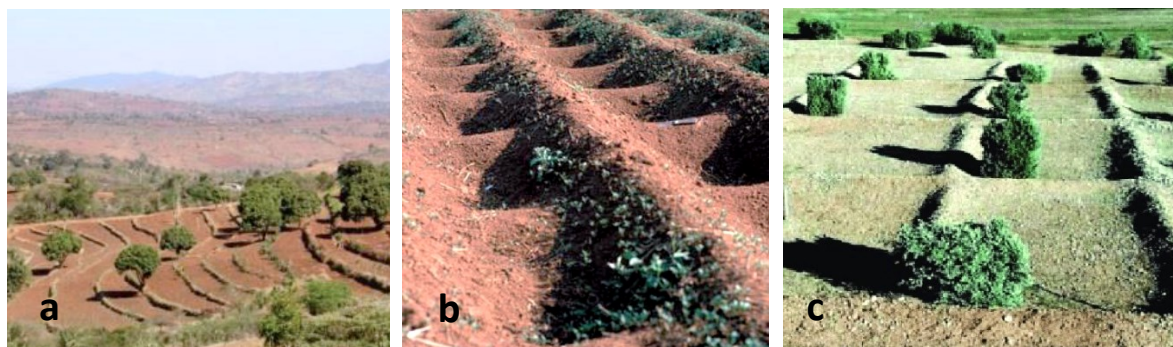


Fig. 3. Sistemazioni: contour terracing (a), zay pitting (b), negarim (c)

(figure prese da Pradhan & Sahoo, 2019)

A queste tecniche più semplici si aggiungono opere più complesse destinate all'accumulo di grandi quantitativi di acqua come bacini, cisterne, pozzi. Non esiste tuttora una esatta classificazione dei sistemi di WH data la difficoltà nel definirne esattamente le caratteristiche e di raggrupparli in categorie omogenee. Questa difficoltà si riscontra ancor più nei contesti rurali poveri, dove le tecniche sono ancora fortemente legate a tradizioni antiche piuttosto che basate su dei parametri scientifici, e pertanto caratterizzate da una elevata variabilità. Tuttavia, per fare un po' di chiarezza nella vastità delle soluzioni presenti, è possibile identificare tre elementi strutturali fondamentali, comuni a ciascun sistema: l'area di raccolta o la fonte, una struttura di stoccaggio e un target o una rete di utilizzatore finale. T. Oweis e A. Hachum (2009) propongono una distinzione sulla base delle dimensioni, in microsistemi e macrosistemi di raccolta (Tab.1). I primi comprendono strutture molto semplici, destinate all'intercettazione e alla raccolta delle acque meteoriche di scorrimento superficiale su un'area ridotta, per concentrarlo immediatamente in prossimità della coltura. Appartengono a questa tipologia le tecniche già citate dei "contour ridges", la coltivazione in buche (*zay pits*) e in vasche (*negarim*). Questi sistemi, vista l'estrema semplicità e i bassi costi di realizzazione, sono appunto i più diffusi nei contesti più poveri dove l'agricoltura assume talvolta una forma di sussistenza. Nei macrosistemi troviamo invece una serie di opere più complesse che vanno dai bacini aziendali, compresi gli invasi oggetto di studio successivamente, fino a cisterne e stoccaggi di maggiori dimensioni.

Technique	Crop	Soil		Land		Socio-economics			Storage type
		Depth ^a	Texture	Slope ^b	Stoniness ^c	Capital ^d	Labour ^e	Skill	
Microcatchment									
Contour ridges	Range	Variable	Variable	Medium, steep	Low, medium	Low	Medium	Local/training	Soil profile
	Field	Medium, deep	Variable	Medium	Low	Low	Medium	Local/training	Soil profile
	Trees	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Low	Medium	Local/training	Soil profile
	Vegetable	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Low	Medium	Local/training	Soil profile
Semicircular bunds (trapezoidal and triangular)	Range	Medium, deep	Variable	Low, medium	Low, medium	Low	High	Local/no training	Soil profile
	Field	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	High	Local/no training	Soil profile
	Trees	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Low	High	Local/no training	Soil profile
	Vegetable	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Low	High	Local/no training	Soil profile
Small pits	Field	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Low	Medium	Local/no training	Soil profile
	Range	Shallow, medium	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	Medium	Local/no training	Soil profile
Small basins (<i>Negarim</i>)	Range	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	High	Local/no training	Soil profile
	Trees	Deep	Medium, heavy	Low	Low, medium	Low	High	Local/no training	Soil profile
Run-off strips	Range	Variable	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	Low	Local/no training	Soil profile
	Field	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	Low	Local/no training	Soil profile
Meskat (<i>Khushkaba</i>)	Trees	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	Low	Local/no training	Soil profile
	Field	Medium	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Low	Low	Local, no training	Soil profile
Contour bench terraces	Trees	Deep	Medium, heavy	Steep	Low, medium	High	Medium	External skill	Soil profile
	Field	Medium	Medium, heavy	Steep	Low, medium	High	Medium	External skill	Soil profile
Macrocatchment and floodwater									
Small farm reservoirs	All crops	Variable	Medium, heavy	Low, medium	Variable	High	High	External skill	Surface/subsurface
Wadi-bed cultivation	Trees/vegetable	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low	Medium	Medium, high	Local	Surface/soil
Jessour	Trees	Medium, deep	Medium, heavy	Medium, steep	Variable	Medium	High	Local/training	Surface/soil
Water spreading	Field/trees	Medium, deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Medium	Medium	External skill	Soil profile
Large bunds	Trees	Deep	Medium, heavy	Low, medium	Low, medium	Medium	Medium	Local/training	Soil profile
	Field	Medium	Medium, heavy	Low, medium	Low	Medium	Medium	Local/training	Soil profile
	Range	Shallow, medium	Variable	Low, medium	Variable	Medium	Medium	Local/training	Soil profile
Tanks and <i>hafair</i>	All crops	Variable	Medium, heavy	Low	Variable	Medium, high	Medium	External skill	Surface/subsurface
Cisterns	Vegetables/trees	Deep	Rock	All slopes	Variable	Medium	High	Local/training	Subsurface

^a Shallow <50 cm, medium 50–100 cm, deep >100 cm; ^b low <4%, medium 4–12%, steep >12%; ^c low <10%, medium 10–25%, high >25%; ^d low <\$ 25/ha, medium \$ 25–100/ha, high >\$ 100/ha; ^e low <5 man-day/ha, medium 5–20 man-day/ha, high >20 man-day/ha.

Tab. 1. Line guida per la scelta dei sistemi di water harvesting negli ambienti aridi

(tabella presa da Oweis e Hachum, 2009)

Oltre all'aspetto dimensionale, è opportuno differenziare i sistemi in funzione della forma di stoccaggio dell'acqua, la quale può avvenire: come umidità negli orizzonti superficiali del suolo, in forma liquida negli acquiferi sotterranei oppure in superficie per mezzo di bacini o cisterne. Spesso i microsistemi di raccolta sfruttano, come visto, la prima tipologia di accumulo idrico, molto semplice, che tuttavia costituisce una riserva poco persistente. Per poter trattenere l'acqua più a lungo, stoccandola in forma liquida in superficie o nelle falde, sono necessarie strutture più complesse. A questo proposito la FAO stima che circa il 40% delle aree agricole nel mondo dipenda proprio da acque sotterranee per l'irrigazione, perciò, ridurre la pressione dell'attività agricola su questi serbatoi naturali porterebbe grandi benefici ambientali.

1.2.2 Diffusione degli invasi in Italia e nel mondo

La forma di stoccaggio idrico, più elementare e allo stesso tempo diffusa in ambito agricolo è certamente quella dei bacini artificiali. La loro grande versatilità e la semplicità di realizzazione sono solo alcuni degli aspetti che determinano questo successo. A livello mondiale si stima che il volume globale di acqua stoccata in invasi artificiali di dimensioni superiori a $0,1 \text{ km}^3$ sia di 6.200 km^3 , mentre aggiungendo anche tutti bacini di dimensioni inferiori, si arrivi a circa 8.070 km^3 (Aminzadeh et al., 2018). Chiaramente non tutta quest'acqua è necessaria o disponibile per l'agricoltura. Infatti, la maggior parte dei laghi artificiali ha come funzione principale la produzione idroelettrica, mentre lo stoccaggio per usi agricoli è al secondo posto. L'immagazzinamento dell'acqua in questo caso è una tecnica che permette di aumentarne la disponibilità e nelle stagioni più asciutte dell'anno o durante eventi di siccità improvvisa. Le opere di stoccaggio artificiale possono inoltre avere un ruolo importante in ambito industriale, nonché in alcuni contesti, nella difesa dalle alluvioni. I bacini con questa particolare funzione detta "di laminazione", agiscono per prevenire esondazioni, prelevando parte della portata dei corpi idrici superficiali e riducendo così l'entità del colmo di piena. A questo punto è bene sottolineare che non sempre un invaso riveste una sola funzione, per questo motivo molte opere, definite ad uso plurimo, possono condividere più utilizzi, energetico e irriguo, piuttosto che irriguo e di laminazione. Una progettazione sostenibile del territorio deve tenere conto anche di questo, affinché l'efficienza di ciascuna opera venga massimizzata in funzione delle esigenze.

L'irrigazione basata su bacini artificiali anche di modeste dimensioni è una pratica ormai consolidata in molte aree del mondo. Ne sono un esempio nazioni come l'India (Mahalle e Adhau, 2014; Chaudari & Chaudari, 2015) e l'Arabia Saudita (Alam e AlShaikh, 2013), ma anche Stati europei come la Spagna

(Fig.4). Qui, nella regione di Almeria, questi bacini garantiscono l'irrigazione alla più estesa area con coltivazioni protette al mondo, raccogliendo e stoccando l'acqua piovana caduta sui tetti delle serre stesse (Carvajal et a., 2014).

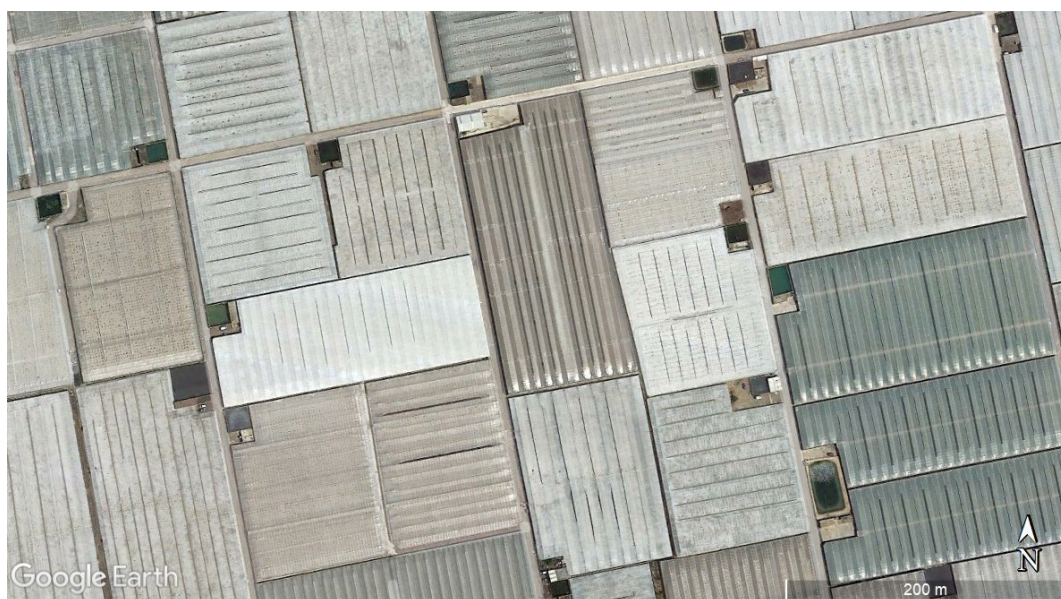


Fig. 4. Immagini satellitari di aree agricole servite da invasi artificiali di piccole dimensioni, sopra - Almeria (Spagna), sotto - Shahrud (Iran)

(foto prese da Google Earth, 2023)

Anche l'Italia dispone di un numero discretamente elevato di invasi in termini assoluti, questi tuttavia non rappresentano, se non in aree molto limitate, una pratica consolidata nella tradizione irrigua. Nel nostro Paese vengono distinti i bacini artificiali in grandi dighe, di competenza statale, e i piccoli invasi di competenza regionale. Nella prima categoria rientrano i serbatoi con capacità di invaso superiore al

milione di metri cubi o il cui sbarramento supera i 15 metri di altezza, i quali ammontano a 532 laghi, per un totale di 11.800 milioni di metri cubi invasabili. Il 58% di questi, ha come principale scopo la produzione idroelettrica, mentre l'utilizzo irriguo è al secondo posto (Massariolo, 2023). Per quanto riguarda invece i "piccoli invasi" la loro diffusione sul territorio nazionale non rappresenta un sistema capillare se non in aree molto limitate e la loro distribuzione non è omogenea. Al nord prevale ancora la captazione da corsi d'acqua e falde acquifere per l'irrigazione, mentre lo stoccaggio in bacini artificiali riguarda principalmente il centro-sud Italia e le isole (Tab. 2) (Felci, 2018). Attualmente in Italia le captazioni da invaso per utilizzi irrigui sono un 3% circa. Di cui la maggior parte al sud e nelle isole. Rappresentano un 66% delle captazioni della Sardegna e un 40% di quelle della Sicilia, mentre al nord sono solamente un 1-2% (Felci, 2018). Questo è dovuto prevalentemente a ragioni climatiche che, eccezion fatta per il 2022, vedono nella parte settentrionale del Paese una certa abbondanza di acqua, garantita anche dalle coperture nivali accumulate durante l'inverno. Questo fa sì che vi sia affidabilità nei confronti dei corpi idrici come fonte di approvvigionamento per tutto l'anno. Al contrario nelle zone d'Italia con clima meno piovoso gli invasi sono l'unica alternativa al prelievo dalla falda acquifera. Secondo le stime Istat, nell'ultimo ventennio, si registra un notevole incremento che ha visto passare i piccoli invasi, da circa 8.000 nel 1998 a più di 26.000 nel 2021 (Massariolo, 2023). Aumento da ricondurre almeno in parte al mutevole andamento climatico e a condizioni più instabili relativamente al ciclo idrogeologico, che si ripercuotono inevitabilmente sul settore agricolo e sugli approvvigionamenti idrici. Secondo uno studio dell'Università di Torino, i corsi d'acqua del nord Italia stanno evolvendo verso un regime di "mediterraneizzazione", caratterizzato da una maggiore intermittenza nelle portate e dalla possibilità, in alcuni momenti dell'anno, che l'acqua scompaia totalmente dal letto del fiume (Levantesi, 2022). Questo obbliga a ridurre la dipendenza da questa fonte idrica in favore di sistemi meno vulnerabili alle fluttuazioni meteorologiche.

Distretti idrografici	Captazione (numero e %)											
	da canale		da sorgente		da falda		da lago/invaso		da fiume		altro tipo di opera	
	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%	n.	%
Padano	271	10,0	310	11,4	588	21,6	32	1,2	1.394	51,3	122	4,5
Alpi Orientali	194	15,3	63	5,0	511	40,3	15	1,2	282	22,2	204	16,1
Appennino Settentrionale			2,0	2,7	21	28,0	8	10,7	31	41,3	13	17,3
Serchio							1	33,3	1	33,3	1	33,3
Appennino Centrale	11	8,1	2	1,5	45	33,1	19	14,0	54	39,7	5	3,7
Appennino Meridionale	30	3,8	57	7,3	567	72,1	21	2,7	99	12,6	12	1,5
Sicilia			10,0	14,7	13	19,1	27	39,7	13	19,1	5	7,4
Sardegna	1	3,7					18	66,7	8	29,6		
ITALIA	507	10,0	444	8,7		34,3	141	2,8	1.882	37,0	362	7,1

Tab. 2. Tipologia opere di presa in Italia

(tabella presa da Felci, 2018)

Nonostante in termini assoluti gli invasi in Italia siano quasi triplicati in poco più di un ventennio, l'Associazione nazionale dei consorzi di bonifica ANBI sostiene che il sistema di stoccaggio delle acque meteoriche nel nostro Paese è tuttora inefficiente (Massariolo, 2023). Dei 300 miliardi di metri cubi che ogni anno cadono come pioggia, solamente un 11% viene trattenuto, rispetto a realtà come la Spagna dove questa percentuale arriva anche ad un 35% (Massariolo, 2023). A questo proposito nell'autunno del 2021, ANBI e Coldiretti hanno sottoposto al governo un piano di investimenti, con l'obiettivo di implementare le attuali infrastrutture irrigue e potenziarle con la realizzazione di bacini di accumulo. Il progetto definito anche "Piano Laghetti" prevederebbe la costruzione di una rete di 10.000 invasi, di cui 4.000 di carattere consortile e 6.000 bacini aziendali (Il Punto Coldiretti, 2023). Tuttavia, la mancanza di fondi e gli intoppi burocratici stanno rallentando le ottime prospettive iniziali e per il momento solo una minima parte dei progetti sembra essere avviata. Nonostante ciò, le prospettive del settore agricolo italiano sembrano voler proseguire nella direzione dello stoccaggio idrico su diverse scale, in forma di invasi artificiali.

Anche per i bacini di stoccaggio non esiste una vera e propria classificazione da un punto di vista normativo, tuttavia, sono convenzionalmente distinti in base a dimensioni, funzioni e modalità costruttive. Il volume invasabile è la principale discriminante per gli invasi in quanto è connessa alle modalità di utilizzo e gestione del bacino, oltre a determinarne i parametri strutturali. Non esistono dei volumi soglia universali, tuttavia possiamo utilizzare come riferimento quelli forniti dalla Regione Veneto nell'Allegato A del DGR 178-2023, nuova normativa tecnica regionale in merito alle opere di stoccaggio per uso irriguo. I bacini di dimensioni più elevate, superano generalmente i 150.000 m³ e hanno una gestione di tipo consortile o comiziale, mentre per invasi interaziendali ed aziendali i volumi si aggirano attorno ai 30.000 – 100.000 m³. Opere con capacità di stoccaggio ancora inferiore rientrano in quelli che vengono definiti micro-invasi, il cui volume è molto modesto e non supera le poche decine di metri cubi. Questi stoccaggi sono legati a piccole porzioni di superficie agricola irrigata e la loro diffusione sul territorio deve essere necessariamente capillare, pena la perdita della propria funzione. Sono molto diffusi in contesti rurali in via di sviluppo, tuttavia, recenti studi condotti proprio in nord Italia, ne evidenziano una grande importanza anche su terreni ad elevata pendenza, nella riduzione dell'erosione superficiale e nella mitigazione degli effetti della siccità (Wang et al., 2023).

1.2.3 La copertura degli invasi come strategia di riduzione delle perdite idriche

Lo stoccaggio dell'acqua comprende in sé due distinte operazioni, quella di accumulo della risorsa idrica, con il riempimento dell'invaso attingendo ad una fonte, sia essa meteorica o idrologica, e quella di conservazione della riserva nel tempo. Questa seconda fase è fondamentale nella determinazione dell'efficienza dell'invaso in quanto una maggiore durata dell'acqua stoccata, consentirà di superare periodi siccitosi più lunghi e di ridurre maggiormente le perdite inflitte dalla scarsità idrica alle colture. La variazione del volume all'interno di un bacino non dipende però, esclusivamente dalla frazione di acqua utilizzata, nel caso in esame, a scopo irriguo. Vi è infatti una percentuale di asportazioni non produttive le quali determinano una riduzione continua e più o meno costante della massa d'acqua nel corso del periodo di conservazione, anche in assenza di un suo utilizzo. Queste perdite sono una sfida all'efficienza dell'invaso e del processo di gestione (Aminzadeh et al., 2018), pertanto una loro riduzione permette un prolungamento della durata dello stoccaggio.

Le principali fonti di allontanamento dell'acqua, per ragioni diverse da quelle produttive, sono l'evaporazione dalla superficie libera e l'infiltrazione profonda attraverso la pavimentazione (van del Meer et al., 2022). Tuttavia, nella maggior parte dei casi, gli invasi agricoli vengono rivestiti internamente con delle membrane impermeabili in modo da evitare qualsiasi tipo di percolazione. Questo permette innanzitutto di poter posizionare gli stoccaggi indipendentemente dalla permeabilità del suolo, inoltre, di evitare le perdite per infiltrazione e con esse il fenomeno del sifonamento, ovvero la risalita dell'acqua all'esterno degli argini, particolarmente pericolosa per la stabilità strutturale dell'opera. Solo nel caso di bacini completamente interrati è possibile evitare il posizionamento della membrana, nei casi in cui le perdite assumono livelli tollerabili o l'invaso ha funzione di ricarica delle falde sottosuperficiali.

Per questi motivi la principale fonte di asportazione, diversa da quella produttiva, è costituita dall'evaporazione dalla superficie dell'invaso. E nonostante a prima vista, il fenomeno possa sembrare trascurabile, in condizioni favorevoli, il suo impatto sul volume stoccato può essere anche molto elevato. La determinazione della quantità d'acqua persa per evaporazione è un'operazione complessa a causa delle molte variabili in gioco, sia di natura meteorologica, che strutturale dell'invaso. A livello globale, gli studi più recenti stimano che circa il 50% delle piccole riserve d'acqua sia perso per evaporazione (Aminzadeh et al., 2018). Il fenomeno, infatti, si manifesta con maggiore intensità nei bacini di dimensioni ridotte, per ragioni fisiche legate soprattutto alla minore capacità di regolazione termica posseduta dalla massa d'acqua, la quale tende a riscaldarsi maggiormente e più velocemente nei piccoli invasi. Inoltre, nonostante le aree più calde da un punto di vista climatico mostrino tassi di evaporazione molto elevati, come in India, dove si stima che le perdite annuali possono superare anche

il 40% (Chaudhari & Chaudhari, 2015), queste rappresentano un'asportazione improduttiva non indifferente anche nelle regioni temperate alle nostre latitudini.

Già nel 1977 presso il Water Research Center dell'Università dell'Arizona si lavorò a dei sistemi di contrasto del problema, rivolti in particolare ai grandi laghi. Tuttavia, è solo nell'ultimo decennio che si è osservato un crescente interesse della comunità scientifica internazionale, nei confronti dei bacini di dimensioni minori, ed in particolare verso quelli ad uso agricolo. Categoria, quest'ultima, maggiormente a rischio da questo punto di vista, considerati i volumi ridotti spesso di poco superiori alle reali necessità produttive, e maggiormente soggetti ad evaporazione intensa. Questi studi hanno permesso di sviluppare e mettere a punto diversi sistemi di controllo dell'evaporazione, la maggior parte dei quali legati alla copertura della superficie dell'acqua o volti ad ombreggiare l'invaso o a proteggerlo dai venti prevalenti. Il processo evaporativo dell'acqua dipende infatti principalmente da due fattori meteorologici, radiazione solare e la ventosità. La prima costituisce l'apporto energetico che sta alla base del passaggio di stato, il quale permette alle particelle di acqua di accrescere la propria energia cinetica e passare alla fase di vapore. Su questa variabile agiscono i principali sistemi di copertura ed ombreggiamento. Per quanto riguarda invece il vento, questo contribuisce ad aumentare il rimescolamento dell'aria soprastante il corpo idrico, asportando l'umidità che tenderebbe a ristagnare in prossimità del pelo dell'acqua. Questo fa sì che non si verifichino condizioni di saturazione in termini di vapor acqueo e che il processo evaporativo continui con intensità massima. Anche le barriere antivento sono perciò considerate sistemi di contrasto delle perdite evaporative, con una riduzione che può arrivare anche al 20-30% (van del Meer et al., 2022). Nonostante ciò, i sistemi più efficaci nella mitigazione dell'evaporazione, da invasi ad uso produttivo, rimangono i sistemi di copertura di varia natura, dove l'Australia anche in questo campo, ha avuto un ruolo da apripista soprattutto per quanto riguarda gli invasi ad uso potabile ma non solo (Kumar, 2018). Questi possono agire in contrasto all'evaporazione, secondo tre meccanismi, riflettendo la radiazione solare, isolando il corpo idrico evitando di trasferire calore alla massa d'acqua e infine interferendo con i flussi di aria superficiali (Aminzadeh et al., 2018).

L'ampio panorama di industrie produttrici mette a disposizione una serie di prodotti molto eterogenea e per questo motivo con efficacia variabile in funzione del prodotto stesso e della situazione in cui viene applicato. Ad oggi la maggior parte di questi sistemi si trova ancora in fase sperimentale o comunque non costituisce una realtà diffusa, tuttavia, alcuni di essi stanno dimostrando ottimi risultati in un'ottica di un loro utilizzo anche su larga scala. La distinzione principale vede da un lato le coperture integrali, mentre dall'altro quelle modulari o parziali. Le prime consistono essenzialmente in teli di varia natura, i quali interessano tutta la superficie dell'invaso. In questo caso la scelta del materiale e della tipologia di copertura varia in funzione delle finalità costruttive. Nonostante, infatti, siano disponibili sul mercato

delle membrane completamente impermeabili, nel caso di invasi ad uso irriguo la scelta si orienta verso materiali permeabili alle precipitazioni atmosferiche, leggeri ed economici. Non vi è infatti la necessità di isolare totalmente il bacino dall'esterno, operazione onerosa anche da un punto di vista della gestione, la quale è invece necessaria nel caso di stoccaggi di acque potabili o reflui zootecnici. Ciò che viene utilizzato nella copertura di bacini ad uso irriguo sono piuttosto delle reti in polipropilene intrecciato, le quali vengono poste in tensione poco sopra gli argini (van del Meer et al., 2022) (Fig.5). La proprietà essenziale per questi materiali è l'ombreggiamento, il quale può variare da un 80% circa, fino al 100%. In base a come vengono poste, queste reti consentono inoltre, un effetto più o meno marcato di contrasto alla ventosità.



Fig. 5. *Invaso coperto con rete ombreggiante in tensione (foto presa da East Gippsland Water, 2023)*

La categoria dei sistemi modulari invece comprende un insieme di soluzioni costituite da elementi di forma e materiale differente, i quali galleggiando sulla superficie dell'acqua esercitano la propria azione di copertura (Fig.6). Queste differenti proprietà si traducono in un diverso comportamento fisico e perciò in una diversa efficienza nella riduzione delle perdite. I vantaggi dei sistemi modulari rispetto alla copertura totale riguardano principalmente una minore richiesta di manutenzione, una maggiore stabilità del materiale ai raggi UV che ne determina una maggiore durata nel tempo, oltre che ad un migliore adattamento ad eventuali strumentazioni presenti nell'invaso. Per contro questi sistemi a diretto contatto con l'acqua possono rilasciare tossine o residui plastici nella risorsa idrica, nonché creare problemi negli scambi gassosi e perciò all'ossigenazione dell'acqua (Chaudhari e Chaudhari, 2015). Uno studio internazionale, condotto sugli invasi in California, mostra inoltre come sia possibile la proliferazione batterica sulla superficie degli elementi galleggianti, problematica soprattutto per quanto riguarda la qualità dell'acqua poi erogata (Haghighi et al., 2018).

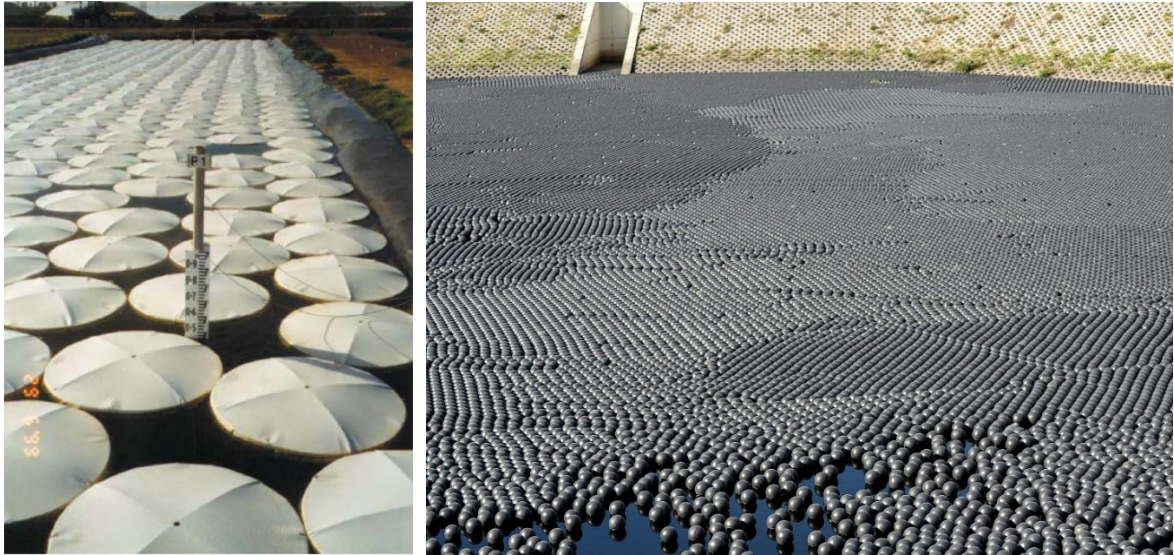


Fig. 6. *Copertura con dischi galleggianti Aqua-Cap a sinistra (foto presa da Aminzadeh et al., 2018), copertura con sfere galleggianti "Shade balls" a destra (foto presa da AWTT, 2023)*

Ulteriori forme di copertura degne di nota, soprattutto in un'ottica di sostenibilità, sono l'utilizzo di materiale vegetale di scarso o organismi vegetali vivi, e il posizionamento di pannelli solari sospesi o galleggianti.

Nel primo caso questi sistemi permetterebbero una notevole riduzione nell'utilizzo di materie plastiche, con conseguente decremento dell'impatto generale dell'opera. Inoltre, esse rappresentano soluzioni applicabili anche in contesti meno sviluppati da un punto di vista economico, dove l'acquisto di sistemi più complessi potrebbe essere proibitivo. A questo proposito si citano alcune forme di copertura ipotizzate, quali del materiale vegetale intrecciato o semplicemente depositato sulla superficie dell'acqua, oppure il posizionamento di piante, sia nell'invaso, come le specie di ninfee, oppure ai margini con effetto di ombreggiamento e riduzione della ventosità. Alcuni studi eseguiti in Arabia Saudita dimostrano come l'uso di uno strato di fronde di palma intrecciate porti ad una riduzione, in condizioni sperimentali, del 47% dell'umidità, percentuale che può raggiungere il 58% posizionandone un secondo (Alam e AlShaikh, 2013).

Di maggiore interesse per il panorama europeo e italiano, sono invece le coperture con pannelli fotovoltaici, le quali, oltre a garantire una riduzione delle perdite idriche, divengono un'importante fonte di energia rinnovabile. L'obiettivo di questi impianti è quello di intercettare la radiazione solare, che altrimenti andrebbe a determinare l'evaporazione dell'acqua, per convertirla in energia elettrica (Gozálvez et al., 2012). Questi sistemi possono essere installati su una piattaforma modulare galleggiante, oppure su dei supporti fissi, sospesi sopra l'invaso, generalmente utilizzati nel caso di superfici molto ridotte. Degli studi eseguiti in Spagna su un impianto pilota esteso su una superficie di

4490 m², riportano una produzione annua di energia elettrica pari a 475.000 kWh/anno ed una riduzione dell'evaporazione pari a 5.000 m³ (Gozàlvez et al., 2012) (Fig.7). Sistemi di questo tipo sono stati installati recentemente anche in Italia. Ne è un esempio il consorzio di Bonifica della Romagna Occidentale, dove sono stati recentemente realizzati sei impianti fotovoltaici galleggianti della potenza complessiva di 520 kW, i quali permetteranno l'abbattimento di circa il 35-40% dei costi di gestione degli invasi su cui sono posizionati (Rete Rurale nazionale, 2023) (Fig.7).

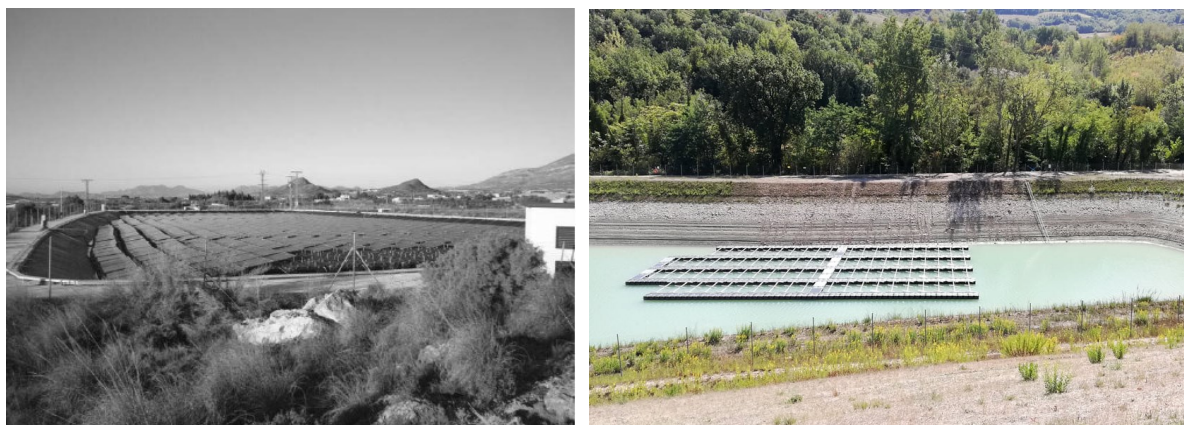


Fig. 7. *Impianto fotovoltaico galleggiante, a sinistra, Alicante, Spagna (foto presa da Gozàlvez et al., 2012), a destra, Brisighella, Italia (foto presa da, Rete Rurale Nazionale, 2023)*

1.3 Obiettivo della tesi

Il crescente interesse verso un maggiore sfruttamento degli invasi artificiali in agricoltura, associato all'incremento di eventi meteorologici estremi anche siccitosi, impone da parte della comunità tecnico scientifica un'attenta valutazione di questa potenziale misura di mitigazione delle carenze idriche. L'agricoltura è uno dei settori maggiormente interessati dalla problematica della siccità, per la quale i bacini di stoccaggio potrebbero portare grandi vantaggi in termini di riduzione delle perdite di produzione, piuttosto che ad un aumento delle rese, oltre ad altri benefici sociali, economici ed ambientali.

L'obiettivo generale che si pone questo lavoro è perciò quello di valutare la reale efficacia degli stoccaggi artificiali agricoli, nel contrastare gli effetti dannosi della siccità, in particolare nei confronti del panorama agricolo italiano.

La situazione meteorologica di riferimento è quella del 2022, anno caratterizzato da una severa carenza

idrica in molte regioni d'Europa, tra cui il nord Italia. Si eseguirà pertanto a priori, un'analisi dell'andamento climatico e dell'impatto che questo ha avuto sul panorama agricolo, focalizzando l'attenzione sull'area di bassa pianura, tra le provincie di Padova e Venezia. La scelta dell'area in esame è data dalla presenza in quella zona del sito sperimentale di Fossò, nato dalla collaborazione tra il Consorzio di bonifica Bacchiglione e il Dipartimento TESAF dell'Università di Padova, proprio per studiare più da vicino le dinamiche relative alla gestione degli invasi aziendali.

Sulla base dei dati meteorologici forniti da ARPA Veneto si procederà poi ad esaminare i valori di evapotraspirazione, determinando i fabbisogni colturali per le principali colture irrigue della zona, in funzione dei quali, verrà poi individuato un volume ideale per un invaso di riferimento.

Infine, su base bibliografica, si opererà un'analisi multidisciplinare dei vantaggi e delle criticità associate a questo genere di opere, anche dal punto di vista economico, in modo da evidenziare le potenzialità e i benefici di una diffusione dello stoccaggio idrico su larga scala.

2. LA SICCIÀ DEL 2022 NEL NORD ITALIA

2.1 Il contesto climatico europeo

Nonostante non rientri tra le prime aree geografiche a livello mondiale per rischio di siccità, anche l'Europa è colpita in maniera sempre più frequente ed intensa da eventi di scarsità idrica. Secondo l'ultimo rapporto tecnico, relativo all'impatto del riscaldamento globale e della siccità in Europa e redatto dal Centro Comune di Ricerca (JRC) della Commissione europea nell'ambito del progetto PESETA (*Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis*), le perdite annuali attribuibili alla siccità ammontano complessivamente a circa nove miliardi di euro. I Paesi europei più colpiti sono la Spagna, con 1,5 miliardi di euro/anno, l'Italia con 1,4 miliardi di euro/anno e la Francia con 1,2 miliardi di euro/anno (Cammalleri et al., 2020). Questo viene confermato anche dal progetto EDORA (European Drought Observatory for Resilience and Adaptation), il quale analizzando tutti i report e le pubblicazioni in merito all'impatto della siccità in Europa, osserva come la maggior parte di questi siano riconducibili agli otto Paesi dell'Europa meridionale, ovvero l'area affacciata sul Mediterraneo (EDORA, 2023). Da diversi anni ormai la Commissione Europea ha istituito, nell'ambito del programma Copernicus, l'EDO (European Drought Observatory), da cui si è sviluppato poi anche il GDO (Global Drought Observatory, 2023). L'obiettivo di questi enti è quello di monitorare costantemente l'impatto e l'evoluzione della siccità, attraverso la determinazione degli indici di impatto e la redazione mensile di report in merito alle situazioni più critiche di scarsità idrica in Europa e nel mondo.

A livello comunitario, a partire dagli anni 50 i Paesi Settentrionali mostrano un aumento delle precipitazioni soprattutto nei mesi invernali e primaverili. Nella parte meridionale e orientale dell'Europa invece, la tendenza mostra un clima sempre più secco, con meno eventi piovosi ma più intensi (Cammalleri et al., 2020). L'aumento delle temperature dovuto al riscaldamento globale porterà senza dubbio ad un aumento della frequenza e dell'intensità della scarsità idrica. Secondo le analisi del progetto PESETA, un incremento di 3°C entro il 2100, porterebbe a far raddoppiare la frequenza dei fenomeni di siccità in un 25% delle regioni mediterranee e in un 15% di quelle atlantiche. Mentre ipotizzando un incremento di soli 1,5°C la frequenza di eventi siccitosi, aumenterebbe comunque per circa due terzi delle aree mediterranee e un terzo delle regioni atlantiche. Per quanto riguarda invece la zona boreale e parte dell'Europa continentale, ciò che si prospetta è una riduzione della scarsità

idrica dovuta appunto all'aumento delle precipitazioni legato al cambiamento climatico (Fig.8). Tutto ciò da un punto di vista economico si traduce in un incremento delle perdite annuali, le quali tenendo conto di cambiamenti socioeconomici, possono arrivare a quintuplicare entro fine secolo. Lo scenario peggiore relativo all'aumento di 3°C di temperatura, fa prevedere infatti un costo annuo della siccità di 45 miliardi di euro, mentre negli scenari meno critici con l'incremento di 1,5 o 2°C le perdite si attestano sui 25 e 31 miliardi di euro (Cammalleri et al., 2020).

Di tutti i danni legati alla scarsità idrica, ad oggi il 60% riguardano l'agricoltura (Cammalleri et al., 2020) e, oltre a questo, in molti casi le aree maggiormente colpite ospitano produzioni agricole di particolare importanza economica e qualitativa. Si pensi ad esempio alla Spagna, la quale si colloca al primo posto in Europa per la coltivazione di ortaggi, frutta ed agrumi, piuttosto che all'area della Pianura Padana nel nord Italia, anch'essa sede di importanti produzioni orticole, cerealicole e viticole.

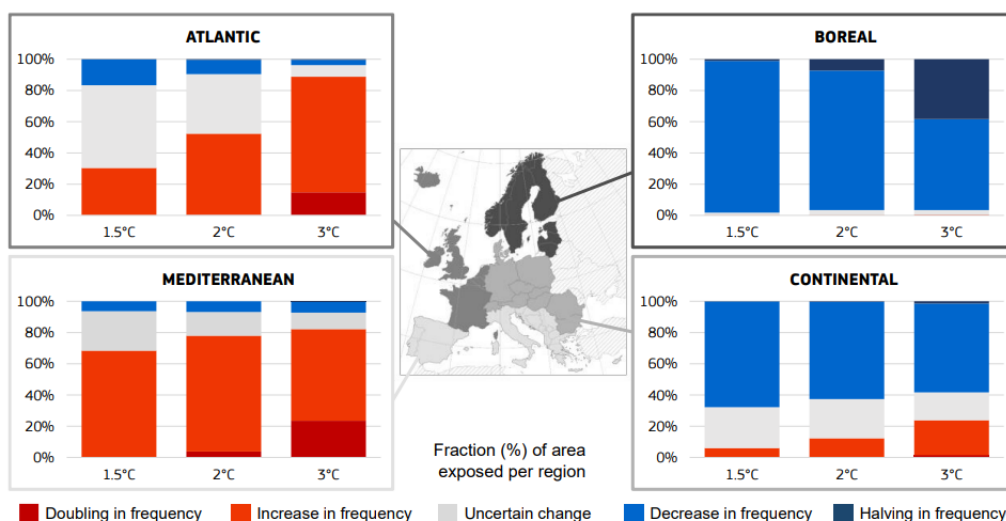


Fig.8. *Frazione di area esposta ad un cambiamento nella manifestazione della siccità, per ciascuna sotto-regione europea*

(figura presa da Cammalleri et al., 2020)

2.2 Le cause meteorologiche

L'inverno 2021-2022 in nord Italia è stato caratterizzato, soprattutto a partire da gennaio 2022, da anomalie sia dal punto di vista termico, che da quello pluviometrico. Nel primo caso si parla di anomalie positive, le quali hanno visto temperature invernali più miti del solito, a cui si è associato, un intenso deficit negativo della piovosità con precipitazioni di molto inferiori alla mediana storica (SNPA, 2023).

Questo ha portato alla comparsa fin dai primi mesi dell'anno, di una grave situazione di siccità (Straffellini & Tarolli, 2023) che da subito ha interessato con grande intensità il Piemonte, il quale si rivelerà poi la regione più colpita. Qui la piovosità cumulata tra dicembre 2021 e febbraio 2022 ammontava a soli 40 mm a fronte dei 160 mm attesi (Toreti et al., 2022a). La scarsità idrica nel periodo invernale, si è manifestata anche come carenza nell'accumulo di neve in quota. Così facendo nel corso dell'anno, oltre ad una riduzione degli apporti immediati in termini di precipitazioni piovose, si è associata la mancanza di riserve nevose, le quali dovrebbero garantire un apporto continuativo e costante durante l'anno, essenziale per i corsi d'acqua. I dati relativi all'andamento dell'equivalente idrico nivale (SWE, Snow Water Equivalent), valore che fornisce un'indicazione sulla quantità di risorsa idrica stoccata nel manto nevoso, mostrano chiaramente il deficit relativo all'inverno 2021-2022. Inizialmente, a novembre 2021, gli accumuli seguono l'andamento medio stagionale, rispetto al periodo di riferimento 2009-2021. Tuttavia, nei mesi successivi, l'assenza di precipitazioni è tale per cui non vi sono ulteriori apporti significativi, così a fine febbraio la copertura nivale ammontava solamente a circa il 40% rispetto alla media storica 2009-2021 (Toreti et al., 2022a) (Fig.9), pari ad una superficie di 16.000 km² (SNPA, 2023).

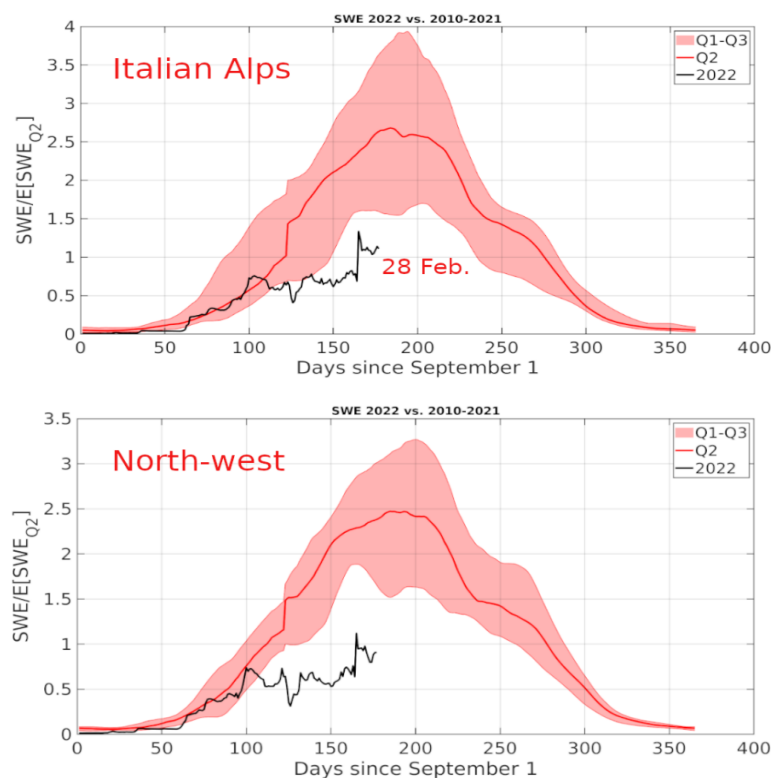


Fig.9. Andamento dell'equivalente idrico nivale normalizzato (SWE) durante l'inverno 2021-22 (linea nera), confrontato con le condizioni climatiche del periodo 2010-2021, rispettivamente per le Alpi orientali (in alto) e le Alpi occidentali (in basso). La linea rossa rappresenta i valori mediani, mentre l'area in rosa comprende la zona tra il primo e l'ultimo quartile

(figura presa da Toreti et al., 2022)

Nei mesi primaverili ed estivi si è protratta l'anomalia negativa intensa per quanto riguarda la piovosità. L'Indice di Precipitazione Standardizzata (SPI, *Standardized Precipitation Index*), uno degli indicatori maggiormente utilizzati per il monitoraggio della siccità a livello internazionale, esprime l'entità del deficit di precipitazione per un periodo di riferimento, variabile da 1 fino anche a 48 mesi (SPI-1, SPI-48), rispetto alla media storica di riferimento. L'SPI-3 di febbraio 2022, mostra sul nord Italia una vasta area con scarsità di precipitazioni molto elevato, in prossimità di tutta la zona corrispondente al Piemonte e buona parte della Lombardia occidentale (Toreti et al., 2022b) (Fig.10).

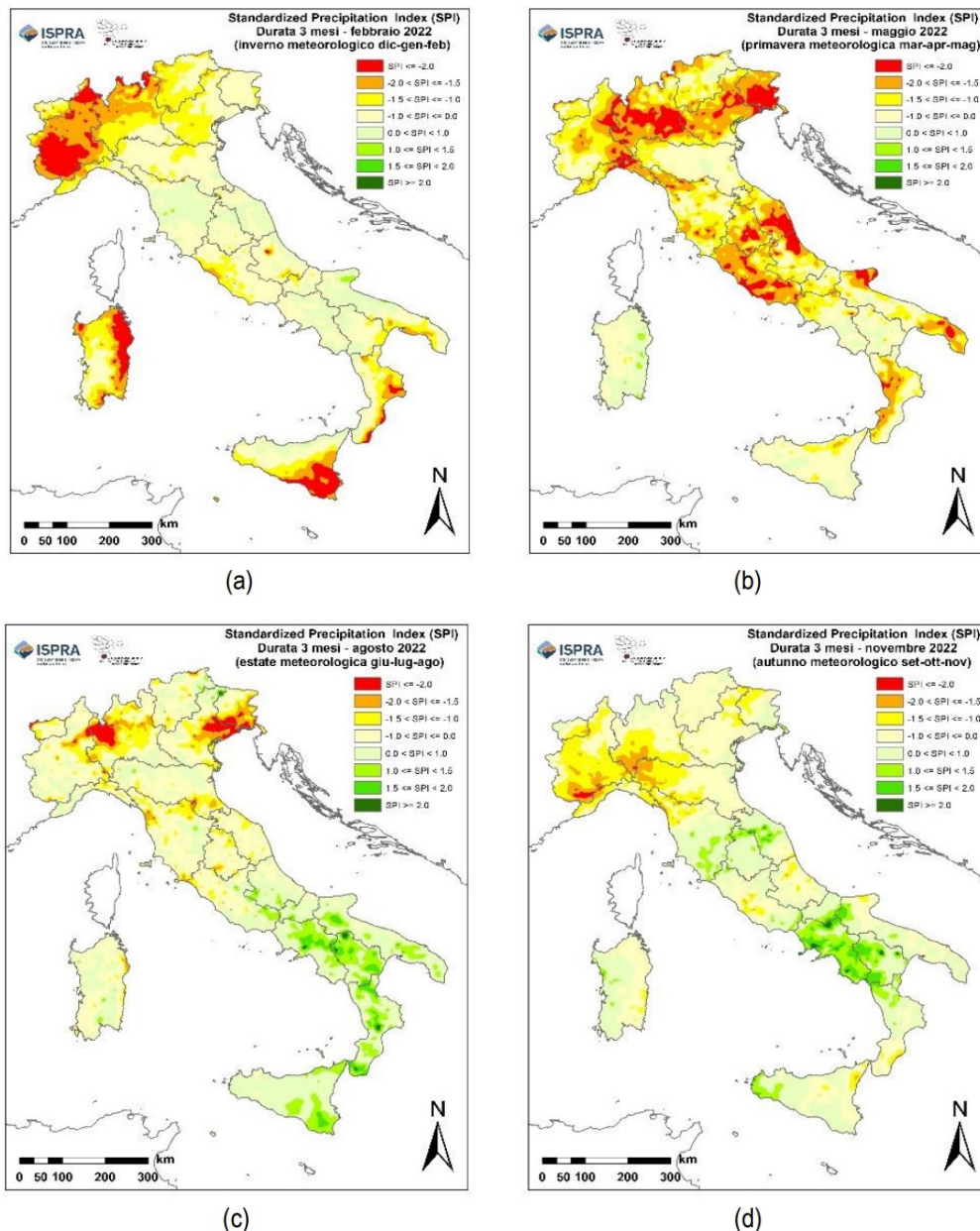


Fig.10. Indici di siccità SPI stagionali, a 3 mesi nel 2022, con baseline 1952-2022: (a) inverno, da dicembre 2021 a febbraio 2022; (b) primavera, da marzo a maggio 2022; (c) estate, da giugno ad agosto 2022; (d) autunno, da settembre a novembre 2022.

(figura presa da SNPA, 2023)

In Lombardia, all'inizio di aprile, il deficit di riserva idrica ha raggiunto il 60% della media del periodo 2006-2020. Mentre a maggio, la già ridotta copertura nevosa si estendeva su una superficie stimata, inferiore a 5.000 km², livello tipico del mese di luglio (SNPA, 2023). Il territorio di Veneto, Trentino-Alto Adige ed Emilia-Romagna è stato interessato più tardi rispetto alla parte occidentale della pianura Padana, come evidenziato dalla mappa dell'SPI-3 di maggio 2022 (Toreti et al., 2022c) (Fig.10).

Ad aggravare l'impatto della siccità, hanno contribuito anche le alte temperature, frutto di frequenti ondate di calore che a più riprese si sono abbattute, oltre a buona parte dell'Europa sud-occidentale, anche l'Italia, con picchi superiori ai 40°C. Il 2022 si conferma così l'anno più caldo rispetto al trentennio 1991-2020, con un'anomalia di +1,23°C, rispetto alla media storica e +0,58°C rispetto al record del 2018 (SNPA, 2023). Tutti questi eventi meteorologici sono da ricondurre alla particolare anomalia climatica che ha caratterizzato l'estate 2022, la quale ha visto la permanenza sul bacino del Mediterraneo di una "lacuna barica", ovvero un'area molto vasta caratterizzata da pressioni relativamente alte, di 1015-1016 hPa. Questo fenomeno ha favorito la risalita verso l'Europa meridionale dell'anticiclone africano, a cui è tipicamente associato il trasporto di aria molto calda, ostacolando invece l'alta pressione delle Azzorre, fonte delle perturbazioni atlantiche, le quali sarebbero invece tipiche delle "estati mediterranee" (Herrera-Lormendez et al., 2023). Nel 2022 si è perciò assistito a frequenti ondate di calore provenienti da ovest, già a partire dal mese di maggio, che in alcuni casi hanno mostrato persistenza anche superiore ad una settimana (Fig.11). Gli eventi più significativi si sono verificati: dopo la metà di maggio, nella prima metà di giugno, a metà e nella seconda metà di luglio (Toreti et al., 2022c).

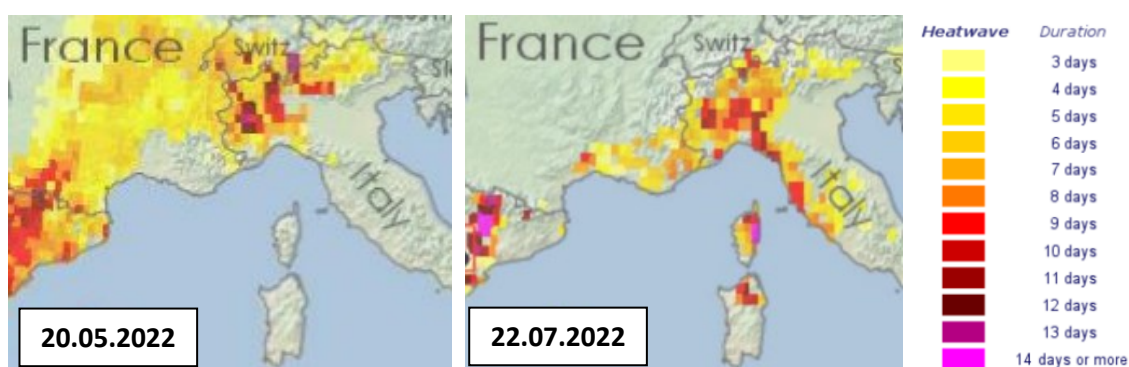


Fig.11. Distribuzione e persistenza delle principali ondate di calore che hanno interessato il nord Italia nell'estate 2022.

(figura presa da Toreti et al., 2022c, Toreti et al., 2022d)

La gravità della siccità del 2022 perciò, non riguarda solamente l'anomalia negativa, seppur molto marcata, nelle precipitazioni, la quale è stata riscontrata in misura simile anche in anni passati. L'unicità e la pericolosità del fenomeno soprattutto per il settore agricolo, sono legate al fatto che alla scarsità

di piogge si sono associate elevate temperature ed una ridottissima copertura nevosa (ARPA Piemonte, 2022). A questo proposito, nella valutazione dell'evoluzione della siccità, dal punto di vista agricolo, è essenziale prendere in considerazione anche i valori di evapotraspirazione (Mukherjee et al., 2018), la quale rappresenta le asportazioni idriche da parte delle colture. Nel 2022 questo fenomeno ha mostrato tassi estremamente elevati, determinati proprio dalle alte temperature estive e dalla scarsità di precipitazioni. Questo ha causato la rapida entrata in stress degli organismi vegetali, in quanto per buona parte dell'anno, i consumi idrici hanno superato gli apporti. Per tenere conto delle perdite evapotraspirative, nell'analisi della siccità, viene valutato lo *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), un indicatore derivato dallo SPI il quale considera come variabile idrologica, la differenza tra la precipitazione e l'evapotraspirazione potenziale. Lo SPEI a 12 mesi relativo all'anno solare 2022, oltre a confermare quanto indicato dallo SPI, mostra rispetto all'andamento storico, un'anomalia negativa molto intensa, diffusa su gran parte del nord Italia, nonché su altre aree del territorio nazionale. Analizzando invece, l'evoluzione del bilancio idroclimatico (BIC), dato dai valori cumulati di differenza tra precipitazione media ed evapotraspirazione di riferimento, quest'ultima stimata con il metodo Hargreaves, si nota una tendenza negativa in tutti i casi. Infatti, il lungo periodo in assenza di precipitazioni primaverile ha fatto sì che il BIC nel 2022 raggiungesse rapidamente la soglia dello 0 già in piena estate (Fig.12) (ARPA Piemonte, 2022). Questa condizione rappresenta il momento in cui le precipitazioni cumulate giornaliere eguagliano l'evapotraspirazione di riferimento, situazione tipica dei climi aridi in cui il BIC è naturalmente spostato in favore delle asportazioni colturali vista la ridotta piovosità. Nelle condizioni climatiche del nord Italia non sempre le perdite evapotraspirative annuali superano gli apporti atmosferici e quando questo accade solitamente si verifica più in ritardo nei primi mesi autunnali (ARPA Piemonte, 2022).

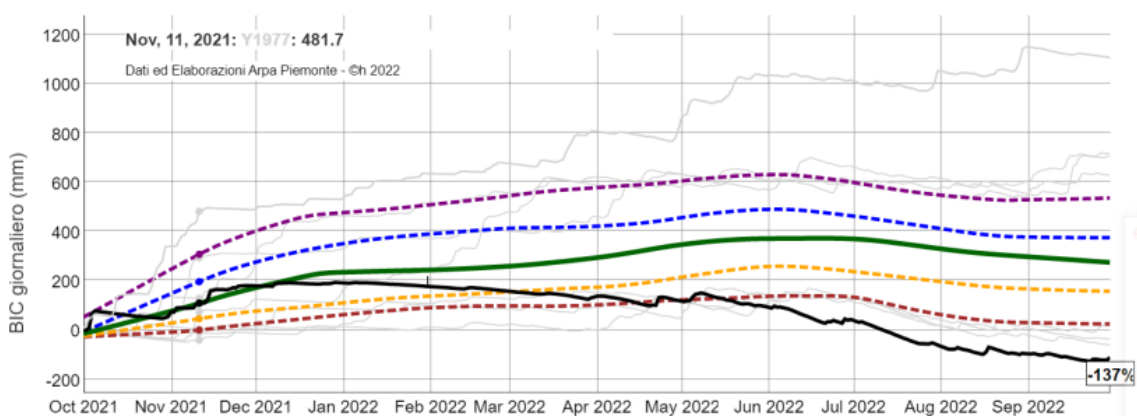


Fig.12. Bilancio idroclimatico giornaliero sul Piemonte calcolato durante l'anno idrologico (01/10/2021 – 01/10/2022) e confrontato con le rispettive statistiche nel periodo 1959-2022

(figura presa da ARPA Piemonte, 2022)

2.3 La situazione idrologica sul basso corso del fiume Brenta

In Veneto il panorama idrologico rispecchia quello del resto della pianura, con una carenza idrica che inizia già nei mesi invernali. A gennaio gli apporti pluviometrici sono inferiori alla media di un -53% rispetto alla situazione storica del periodo 1994-2021, con soli 28,1 mm a fronte di 59,2 mm (Tab.3) (ARPA Veneto, 2022c). Nonostante ciò, in altri anni, come il 2000 e il 2012 erano stati registrati apporti ben inferiori, tuttavia in un contesto generale diverso. La copertura nevosa a fine mese registra un deficit del -28% sulle Dolomiti e del -45% sulle Prealpi (ARPA Veneto, 2022c), situazione che cambierà di molto nei mesi successivi. Ad inizio 2022 anche i grandi serbatoi mostrano volumi inferiori alle medie e nello specifico per quanto riguarda il fiume Brenta il bacino artificiale del Corlo registra un deficit di circa un 50% rispetto all'andamento storico stagionale, con 13,2 Mm³ anziché 26,3 Mm³ (ARPA Veneto, 2022c). Nonostante lo SPI di gennaio, per qualsiasi intervallo calcolato (1, 3, 6, 12 mesi) indichi condizioni di normalità, il deficit dall'inizio dell'anno idrologico (1 ottobre 2021) al 31 gennaio 2022 è già di -119 mm (ARPA Veneto, 2022c). Anche i corpi idrici principali, tra cui falde e fiumi maggiori, manifestano scarsità idrica e livelli idrometrici in diminuzione. Nei mesi primaverili il deficit di precipitazioni a livello regionale è di -81%, con soli 13 mm di pioggia a marzo (Tab.3) (ARPA Veneto, 2022d). Tale situazione non ha fatto altro che accentuare la carenza di acqua in tutti i corpi idrici e a favorire il rapido peggioramento della siccità. Gli indici SPI di marzo mostrano già una situazione da moderata a severa nella parte meridionale della regione, nelle provincie di Padova e Rovigo. L'intensificarsi della scarsità idrica è proseguito fino a fine estate quando nei mesi di agosto e settembre le precipitazioni più abbondanti hanno fermato il trend negativo (ARPA Veneto, 2022b).

precipitazione media in Veneto	gen-2022	feb-2022	mar-2022	apr-2022	mag-2022	giu-2022	lug-2022	ago-2022	set-2022	ott-2022	nov-2022	dic-2022	Cumulata gen-dic 2022
mese (mm)	28	29	13	64	64	51	54	121	103	19	108	109	761
media storica (mm)	59	61	67	94	117	97	90	101	107	111	136	81	1120
scarto (%)	-53%	-52%	-81%	-33%	-46%	-48%	-41%	20%	-3%	-83%	-21%	35%	-32%
scarto (mm)	-31	-32	-54	-31	-53	-46	-37	20	-3	-92	-29	28	-359

Tab.3. *Precipitazione cumulata mensile e annuale relativa al 2022, confrontata con i valori medi storici per il periodo 1994-2021.*

(tabella presa da ARPAV, 2022e)

Osservando la situazione del fiume Brenta e focalizzando l'attenzione sull'area più prossima alla bassa pianura, si registrano nella zona precipitazioni cumulate che si mantengono per tutto l'anno idrologico, al di sotto della media 1994-2021 (Fig.13). Anche la portata del Brenta da gennaio 2022 si dimostra

inferiore alla media, raggiungendo i minimi storici e mantenendosi inferiore per la maggior parte dell'anno a qualsiasi tendenza registrata precedentemente (Fig.14).

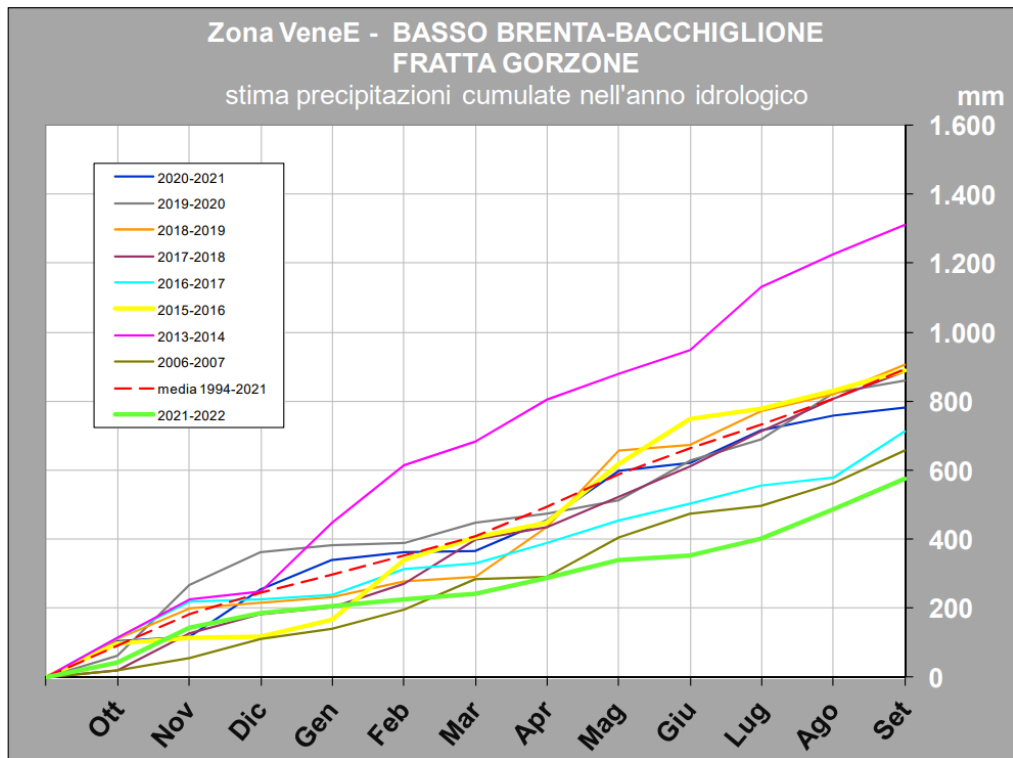


Fig.13. Andamento precipitazioni cumulate per la Zona Allerta VeneE, Basso Brenta-Bacchiglione Fratta Gorzone, relative all'anno idrologico.

(figura presa da ARPA Veneto, 2022a)

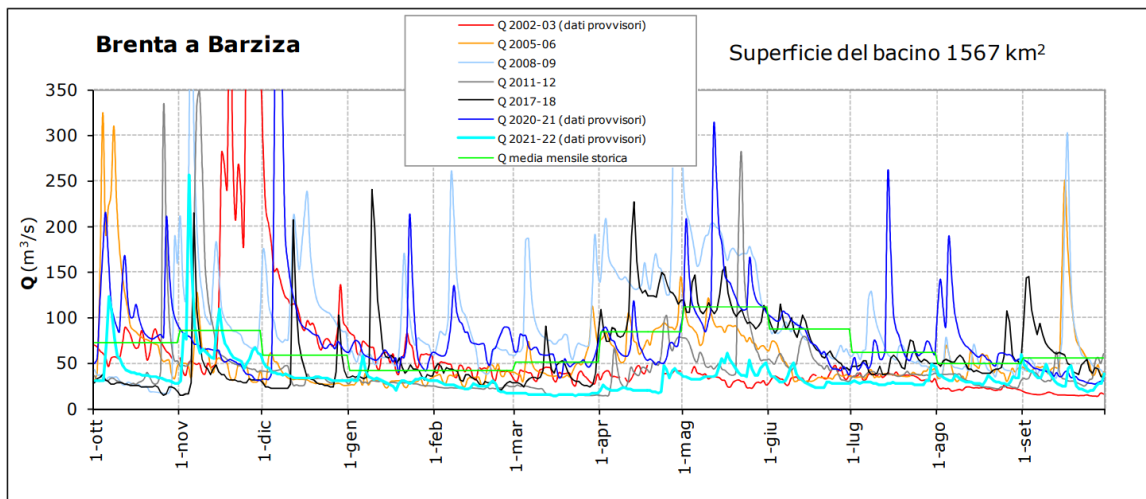


Fig.14. Portata del fiume Brenta a Barziza per l'anno idrologico 2021-2022.

(figura presa da ARPA Veneto, 2022a)

2.4 Le conseguenze sulle produzioni agricole

Nella Pianura Padana si coltivano circa il 40% delle produzioni agricole di tutto il Paese (Levantesi, 2022). Questa caratteristica, in aggiunta al fatto per cui buona parte di questi prodotti dipende dall'acqua sia atmosferica che soprattutto irrigua, rendono quest'area estremamente vulnerabile ai danni da siccità. In un contesto di cambiamento climatico caratterizzato da un aumento delle temperature e una riduzione delle precipitazioni l'area padana è stata identificata come un hot-spot per i fenomeni di carenza idrica (Bonaldo et al., 2023). Ne è un chiaro esempio la calamità del 2022, la quale ha causato gravi danni all'agricoltura italiana, con pesanti ripercussioni non solo dal punto di vista economico ma anche dell'assetto culturale dell'area colpita. Le più grandi associazioni di settore nazionali stimano perdite per le aziende agricole italiane per circa 6 miliardi di euro, pari al 10% della produzione agricola nazionale (Coldiretti, 2023). Cifre più che triplicate rispetto ai più recenti eventi di siccità in Italia, per i quali le stime si attestavano sugli "appena" 2 miliardi nel 2017, mentre tra il 2011 e il 2016, tra gli 0,55 e i 1,75 miliardi di euro (Rossi et al, 2023).

Dal punto di vista dei volumi produttivi le riduzioni più importanti si registrano sui mais e foraggi, con cali anche del 45% delle rese (Il Punto Coldiretti, 2023). Per il mais in particolare, le difficoltà si sono riscontrate già in fase di semina, con una carenza idrica avviatasi ancora nel periodo invernale causa di una insufficiente umidità nei terreni a primavera, che ha richiesto in molti casi irrigazioni di soccorso già nelle prime fasi di crescita. La situazione si è poi protratta per tutto il ciclo colturale con l'intensità massima della siccità in prossimità della massima richiesta idrica della coltura. In alcune aree si è ricorso ad un anticipo anche di un mese nella trinciatura del mais ceroso. Stessa sorte è toccata ai cereali autunno-vernini, anch'essi segnati dalla mancanza d'acqua in primavera, la quale ne ha fortemente limitato lo sviluppo. In questo caso le perdite stimate ammontano ad un 30% per il frumento duro e ad un 20% per frumento tenero (Coldiretti, 2023). Le sofferenze più accentuate si sono verificate su terreni sciolti dove nei mesi primaverili l'essiccazione dello strato più superficiale del terreno ha esposto le radichette superficiali (Barbi et al., 2022). Un discorso a parte merita il riso, coltura che contraddistingue l'Italia, la quale ne è primo produttore a livello europeo con il 57% della produzione in volume, di cui il 98% delle aree coltivate si trova lungo il Po, tra Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia-Romagna. Le elevate esigenze della coltura in termini idrici, sia per quanto riguarda i fabbisogni fisiologici che per una funzione di termoregolazione e controllo delle infestanti, ne determinano una grande vulnerabilità alle carenze d'acqua. Per questo motivo anche per il riso, le perdite nel 2022 variano in funzione delle aree colpite tra il 30 ed il 70%. Oltre a ciò, la siccità non ha fatto altro che accelerare il calo nella superficie dedicata alla coltivazione di questo cereale, legato a ragioni di natura prevalentemente climatica e che ha visto una perdita di 8.500 ha nel 2022 a cui si aggiungono altri

8.000 ha persi nel 2023 (Il Punto Coldiretti, 2023). Il riso è stato duramente colpito anche nell'area del Delta del Po, dove la situazione di siccità agronomica è stata aggravata dall'intrusione salina, la quale ha superato i livelli raggiunti normalmente, aumentando ulteriormente i danni a tutte le produzioni della zona (Fig.15) (Bonaldo et al 2023). Anche le colture industriali registrano situazioni di forte sofferenza in particolar modo per la soia, con danni dal 20 al 70%, e il girasole (Il Punto Coldiretti, 2023). Non sono state da meno anche le produzioni orticole, florovivaistiche e frutticole, le quali tuttavia hanno potuto in molti casi mantenere un apporto irriguo, visto il sistema strutturato di adacquamento di cui necessitano. Sui frutti in particolare la scarsità idrica estiva ha rallentato l'accrescimento ed ha accentuato i danneggiamenti sui frutti a parte di diversi organismi, sia insetti che uccelli, i quali li utilizzano come fonte d'acqua in mancanza d'altro (Barbi et al., 2022).



Fig.15. Immagini satellitari dell'area del Delta del Po a confronto, relative alla stagione estiva rispettivamente del 2020 e 2022. Vengono messi in evidenza i danni della siccità a cui si aggiunge l'intrusione salina.

(figura presa da Rainews, 2023)

3. L'AREA SPERIMENTALE DI FOSSÒ

3.1 Descrizione del sito pilota

3.1.1 Caratteristiche generali dell'opera

Il sito sperimentale per lo studio degli invasi artificiali a scopo irriguo di Fossò (VE), nasce dalla collaborazione tra il Consorzio di Bonifica Bacchiglione e il dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali (TESAF) dell'Università di Padova, con l'obiettivo di analizzare le dinamiche connesse all'implementazione di queste opere nel sistema irriguo dell'agricoltura di pianura.

L'area si colloca nella parte sud-orientale della pianura padano-veneta (nord Italia), nel territorio della città metropolitana di Venezia, al confine con la Provincia di Padova. Essa sorge in prossimità di un'area umida di recente costruzione, lungo il canale di scolo Brentoncino ($45^{\circ}24'15.394''$, $12^{\circ}2'30.332''$), nella parte settentrionale del comune di Fossò (VE) al confine con quello di Strà (VE). L'area si trova ad una quota di 7 m.s.l.m. e si estende su una superficie complessiva di circa 15.000 m², ripartiti ugualmente tra le due strutture. Lo scolo percorre il perimetro della particella su tre lati (Fig.16), ovest, nord ed est, e alimenta l'area umida attraverso una chiavica di carico telecomandata.

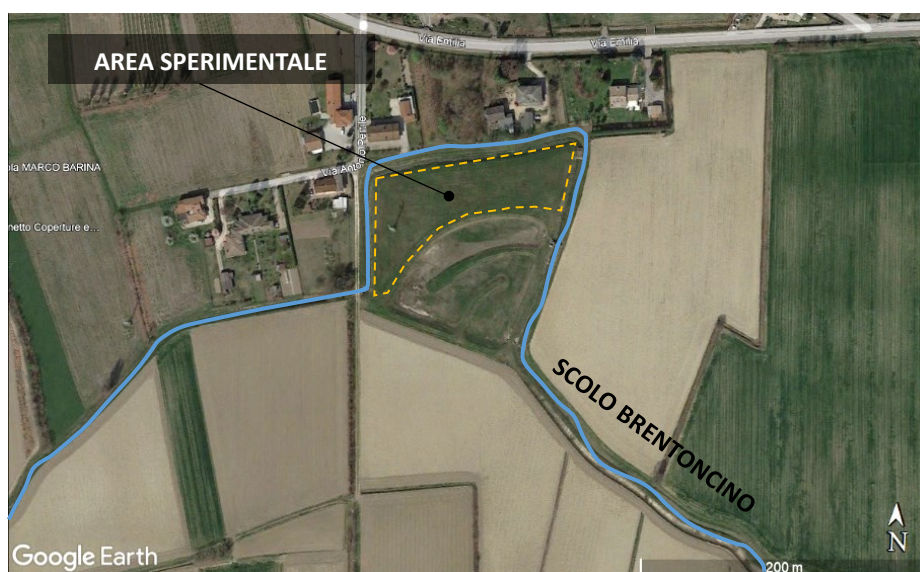


Fig.16. Immagine satellitare dell'area che ospita ora il sito sperimentale

(foto presa da Google Earth, 2023)

L'invaso preesistente, con funzione di fitodepurazione e laminazione, possiede una particolare conformazione a semicerchio in cui l'acqua segue un percorso ad "S". Esso occupa la porzione sud-orientale della superficie per circa 7.000 m², mentre la restante porzione, precedentemente occupata da prato incolto, ora ospita le strutture sperimentali. L'impianto pilota si compone di quattro invasi di forma quadrata ed uguali dimensioni, con una larghezza di 12 m ed una profondità effettiva di 1,8 m, interamente interrati. I bacini sono disposti lungo l'asse E-O ad una distanza di circa 5 m ciascuno. Considerando un'altezza utile di 1,5 m ed una sezione trapezoidale dei bacini, il volume complessivamente invasabile in ciascuna opera è pari a 150 m³. Le modalità di costruzione utilizzate sono le classiche adottate in ambito di invasi agricoli, mediante scavo ed eventuale utilizzo del materiale di sterro per la costruzione del rilevato perimetrale, ove presente. In questo caso quest'ultima operazione non si è resa necessaria in quanto i bacini sono completamente interrati (Fig.17). Le opere non dispongono di un sistema di riempimento per gravità, in quanto non è presente alcun collegamento né tra gli invasi, né con il canale di scolo adiacente. La scelta è data dalla necessità per fini scientifici, di disporre di serbatoi completamente indipendenti tra essi e da fonti esterne. Per questo motivo, al fine di poter invasare l'acqua nel momento di avvio della sperimentazione, sarà necessario ricorrere all'utilizzo di una pompa per il sollevamento della stessa dal canale adiacente.



Fig.17. Uno degli invasi di Fossò in fase di realizzazione (foto di Davide Odorizzi, 21.08.2023)

Per ragioni sperimentali le caratteristiche del rivestimento interno differiscono tra i laghetti. Infatti, al fine di poter quantificare anche le perdite per infiltrazione una delle quattro opere non presenta alcuna impermeabilizzazione del fondo. Per le restanti invece è stata eseguita la posa di una geomembrana di colore nero, con ancoraggio perimetrale realizzato con la tecnica della trincea riempita con terreno di riporto. Questo sistema prevede lo scavo di un solco sul coronamento dell'invaso, nel quale si inseriscono i lembi della membrana di impermeabilizzazione. L'affossamento viene poi nuovamente

riempito con il terreno in modo da fissare il rivestimento permanentemente. Per ragioni di sicurezza le opere sono state recintate con apposite reti metalliche onde evitare l'intrusione accidentale di persone o animali all'interno dei laghetti.

In fase di avvio delle sperimentazioni ciascun bacino verrà attrezzato con diverse forme di copertura al fine di confrontare e valutarne l'efficacia nel mitigare le asportazioni per evaporazione durante lo stoccaggio dell'acqua. La valutazione avverrà secondo differenti punti di vista, economico, ecologico e ovviamente operativo, in termini di riduzione effettiva delle perdite rispetto alla non copertura o ad altri sistemi.

Per fare ciò sarà necessario fornire le opere della strumentazione necessaria al monitoraggio del livello dell'acqua al loro interno. A questo scopo è consigliabile ricorrere a delle aste metriche graduate da posizionare al margine del bacino, al fine di misurarne le variazioni nel livello di riempimento. Potrebbero inoltre essere utili altri sensori nel monitoraggio di altre variabili legate all'evaporazione, come ad esempio la temperatura all'interno dell'invaso o misuratori del grado di torbidità dell'acqua stessa. In prossimità del sito, all'esterno degli invasi, si dovrà posizionare una stazione meteorologica per il rilevamento dei parametri principali, quali temperatura dell'aria al suolo, umidità atmosferica relativa, piovosità, ventosità ed eventualmente la radiazione solare incidente. Per quest'ultimo parametro sarà possibile affidarsi alla vicina stazione di Strà, distante 2,7 km in direzione N-O, e considerando minima la differenza tra i due siti in termini di irraggiamento.

3.1.2 Tipologie di copertura ipotizzate

L'ipotesi sperimentale prevede attualmente la copertura di solo due invasi con fondo impermeabilizzato, in quanto i rimanenti serviranno per valutare esattamente le perdite totali per infiltrazione ed evaporazione superficiale. Le asportazioni misurate sui bacini protetti verranno invece rapportate a quelle relative allo stoccaggio scoperto ma dotato di geomembrana.

Nella scelta delle diverse tipologie di copertura sperimentabili è necessario prendere in considerazione quelle che sono le esigenze richieste a questo particolare supporto. Infatti, la convenienza di un sistema di riduzione dell'evaporazione dipende principalmente dalla sua efficienza nel controllo delle perdite e dalla sua economicità sia in fase di acquisto che durante la gestione e la manutenzione. Quest'ultimo è un fattore determinante se si vuole giungere a delle soluzioni non solo efficaci, ma anche applicabili in un contesto reale. A questo proposito una riduzione degli interventi di manutenzione del sistema consente di evitare interventi frequenti da parte dell'agricoltore che necessiterebbero oltre ad una

spesa aggiuntiva, di entrare nell'invaso, con conseguenti difficoltà e rischi associati.

La superficie da coprire con ciascun materiale è di 144 m² per bacino e i sistemi analizzati riguardano rispettivamente una copertura integrale, ed una modulare. Nel primo caso viene valutato l'utilizzo di un telo ombreggiante nero, con ombreggiatura del 90%. Il costo del materiale per metro quadro ammonta a 1,20-1,50 €, per un totale di 170,00 – 220,00 € su tutto il bacino. Oltre a questo, deve essere tenuto conto del sistema di sostegno della copertura, la quale viene posizionata sospesa, sopra al bacino. A questo scopo sono necessari dei supporti che permettano di mettere in tensione il telo in modo che questo non entri a contatto con l'acqua rendendo di fatto inutile la propria funzione. L'efficacia di questo sistema, oltre alla riduzione della quantità di radiazione solare che arriva al corpo idrico, permette di schermare il pelo libero dell'acqua dalla ventosità prevalente, oltre a ridurre per effetto dell'ombreggiamento, la formazione di alghe (van der Meer et al., 2022).

Come copertura modulare si è optato invece per l'utilizzo di fogli di polistirolo espanso da disporre direttamente sulla superficie del bacino. In questo caso l'utilizzo di materiale dello spessore di 3 cm prevede un costo per metro quadrato compreso tra i 3,00 e i 5,00 €. Considerando che generalmente un sistema modulare di questo tipo non prevede la completa copertura della superficie, se questa interessa il 90% dell'invaso il costo complessivo si attesta sui 380,00 – 650,00 €. Al contrario del telo ombreggiante tale sistema non prevede alcun supporto o sostegno in quanto esso viene posizionato direttamente in acqua. L'effetto principale di riduzione delle perdite evaporative riguarda in questo caso una minore superficie di contatto tra acqua ed aria e perciò una minore superficie evaporante. Esperienze pregresse sottolineano tuttavia che l'effetto di mitigazione delle asportazioni non è proporzionale alla superficie coperta (Aminzadeh et al, 2018), ma risulta inferiore a questo valore. Questa inefficienza sembra essere dovuta a particolari interazioni fisiche che vengono ad instaurarsi nelle rimanenti porzioni esposte della superficie idrica dove l'evaporazione aumenta (Aminzadeh et al, 2018).

3.2 Simulazione delle perdite per evaporazione

3.2.1 Il processo fisico di evaporazione

La stima delle perdite evaporative richiede necessariamente la conoscenza del processo che ne è all'origine e dei fattori che concorrono a determinarne una maggiore o minore entità. Da un punto di vista fisico l'evaporazione è costituita dal passaggio dallo stato liquido a quello aeriforme di una sostanza, che interessa la sola superficie del liquido. Quando le molecole di liquido possiedono energia cinetica sufficiente da vincere le forze di coesione tra di esse, "fuggono" dalla fase condensata a quella aeriforme, evaporando. Il processo inverso è invece la condensazione, con la quale le molecole si riuniscono alla fase liquida. Nell'interazione tra lo stato liquido e quello aeriforme sono entrambi presenti e la loro intensità è inversamente proporzionale, in relazione a temperatura e pressione. Vi saranno perciò casi in cui l'uno prevale sull'altro, oppure una situazione di equilibrio "dinamico", appunto detto, perché non costituito da una situazione statica, bensì da un continuo scambio di molecole senza però una variazione nei volumi delle due fasi. L'evaporazione vera e propria è costituita perciò dalla differenza tra il tasso di vaporizzazione e quello di condensazione in una determinata situazione ambientale, su cui influiscono molteplici variabili. Nel descrivere i fattori che influenzano la velocità di questo fenomeno, è bene perciò distinguere tra di essi quelli di origine meteorologica e climatica, da quelli legati invece alle proprietà del corpo idrico in esame.

L'evaporazione è per sua natura un processo endoergonico, caratteristica fondamentale per il suo ruolo all'interno del ciclo dell'acqua e l'energia è per questo, un elemento fondamentale nella regolazione del passaggio di stato (Finch & Hall, 2001). In condizioni naturali questa energia è fornita dalla radiazione solare ed in particolar modo dalla radiazione netta, ovvero dalla sola frazione che arriva al corpo idrico e che alimenta così il processo. Di tutta l'energia che impatta contro la superficie esterna dell'atmosfera, detta radiazione solare incidente, solamente una parte arriverà alla superficie dello specchio d'acqua. Infatti, una parte vi viene trasmessa direttamente, mentre un'altra vi giunge in forma diffusa in seguito all'interazione con l'atmosfera, la quale ne riduce intensità. Oltre a ciò, deve essere tenuta in considerazione l'azione, seppur ridotta, di riflessione dell'acqua stessa, che allontana circa un 8% della radiazione ad onda corta che arriva al corpo idrico (Finch & Hall, 2001). Il restante 92% è costituito dalla radiazione netta vera e propria, la quale penetra più o meno in profondità in funzione della lunghezza d'onda e va ad aumentare l'energia cinetica delle molecole d'acqua, favorendo il processo di evaporazione. In aggiunta alla radiazione luminosa, va poi considerato lo scambio di radiazione termica, ad onda lunga, con l'atmosfera, indicata dal parametro meteorologico della temperatura. Il processo di riscaldamento avviene in questo caso, non attraverso i raggi solari, ma come

passaggio di calore tra l'atmosfera e la superficie dell'acqua. È bene ricordare che anche in questo caso, il processo non è unidirezionale, ma in alcuni periodi dell'anno vi è una prevalenza di radiazione assorbita dal corpo idrico e in altri, della frazione emessa, quando perciò questo assume un ruolo di mitigazione climatica cedendo calore all'ambiente circostante. Tutta questa energia va ad aumentare l'energia cinetica delle molecole d'acqua finché queste non sono in grado di allontanarsi dalla superficie del liquido, passando allo stato aeriforme.

Una quantificazione dell'energia necessaria al passaggio di stato viene fornita dal valore del calore latente di evaporazione che per l'acqua ammonta a 2272 J/g (per l'acqua a 100°C), mentre il calore specifico, ovvero l'energia necessaria ad aumentare la temperatura di 1°C è pari a 4,18 J/g. Considerando però l'influenza sul processo di evaporazione, di molte altre variabili, non è possibile operare una quantificazione esclusivamente dal punto di vista energetico, ma sarà necessario tenere conto anche di altri parametri meteorologici e strutturali del corpo idrico. Sulla velocità di evaporazione, infatti, influisce anche l'interazione tra le molecole nelle due fasi, liquida e gassosa. Questa tenderà a diminuire, all'aumentare della concentrazione di molecole di vapore in prossimità della superficie del liquido, fino a raggiungere la situazione di equilibrio dinamico precedentemente descritta, quando l'eccesso di acqua allo stato aeriforme fa sì che il processo di condensazione eguagli quello di vaporizzazione. In condizioni di laboratorio questa situazione è facilmente ottenibile, isolando il processo all'interno di un recipiente chiuso. In condizioni naturali invece l'evaporazione è regolata dall'umidità atmosferica relativa e dal rimescolamento delle masse d'aria in prossimità del pelo libero del corpo idrico. Se queste sono ferme, si formerà uno strato umido, tendente alla saturazione e l'evaporazione si ridurrà di conseguenza. Mentre una movimentazione delle stesse, ad opera del vento o di moti convettivi, favorisce l'allontanamento dell'umidità e aumenta notevolmente l'intensità evaporativa.

Ai parametri meteorologici devono necessariamente essere associati quelli legati allo stesso corpo idrico e alle sue caratteristiche strutturali, le quali determinano un diverso comportamento delle condizioni meteorologiche sopra descritte. Questo permette di mettere in relazione le diverse forme di stoccaggio, con una diversa intensità del processo evaporativo. Come accennato precedentemente la dimensione dell'invaso è un primo elemento fondamentale, più precisamente questa deve essere analizzata dal punto di vista della profondità e dell'ampiezza della superficie evaporante. Una maggiore profondità determina un maggiore accumulo di energia a parità di superficie, la quale verrà rilasciata lentamente dando luogo ad un disaccoppiamento temporale del tasso di evaporazione e della radiazione netta intercettata durante l'anno. Per corpi idrici di profondità inferiore ai 0,5 m, questo effetto è trascurabile, mentre oltre i 4,5 m raggiunge il massimo effetto (Finch & Hall, 2001). Oltre a questo, una maggiore profondità dell'invaso determina differenze a livello del profilo termico. Nei bacini poco profondi, infatti, l'acqua raggiunge temperature più elevate, favorendo così l'evaporazione,

mentre nel caso contrario la grande quantità di acqua tende a riequilibrare le temperature lungo il profilo, mantenendo in superficie temperature costanti o quasi. Generalmente gli invasi ad uso irriguo non presentano profondità elevate e perciò, l'evaporazione si manifesta con maggiore intensità rispetto ai grandi laghi.

A parità di volume, una superficie maggiore determina ovviamente una maggiore quantità di acqua evaporata, per questo motivo, considerando il rapporto superficie/profondità, minore sarà questo valore e maggiore è l'efficienza dello stoccaggio in relazione alle perdite per evaporazione. Chiaramente le proporzioni dell'invaso non possono essere definite in funzione della superficie esposta, ma sono dettate da ben altre esigenze, in primo luogo dallo spazio disponibile, nonché dalle condizioni geologiche e pedologiche, piuttosto che da altri aspetti idraulici. Tuttavia, è bene tenere presente che la loro variazione durante la riduzione del livello dell'invaso, si riflette su una differente evaporabilità.

Nel caso di invasi aziendali molti altri fattori possono indurre errori e variazioni nella stima delle perdite per evaporazione, tuttavia, da un punto di vista teorico è estremamente complesso tenerne conto al momento dei calcoli. Una caratteristica molto importante è ad esempio la presenza di geomembrana impermeabilizzante di colore nero sul fondo del bacino. Questo elemento costruttivo, essenziale ormai nelle realtà aziendali, determina una diversa interazione con la radiazione netta, assorbendo maggiormente la radiazione, svilupperà temperature maggiori nell'acqua stoccata. Al contrario, la presenza di vegetazione ai bordi dell'invaso potrebbe creare un effetto ombreggiante o di riparo da venti prevalenti, riducendo così il tasso di evaporazione. Fonte di variabilità sono anche le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua stoccata, come ad esempio la torbidità, fattore che aumentando la riflessione anche fino ad un 20% (Finch & Hall, 2001) a discapito dell'evaporazione. In aree caratterizzate da acque saline anche la maggiore concentrazione di soluti riduce la pressione di vapore, determinando perdite minori, le quali sono tuttavia trascurate proprio a causa dei benefici irrisori.

3.2.2 Modalità di stima dell'evaporazione da superficie libera dell'acqua

La stima da un punto di vista teorico, del volume di acqua evaporabile è un'operazione assai complessa a causa della grande quantità di variabili influenti sul processo fisico. La letteratura mette a disposizione centinaia di formule per il calcolo dell'evaporazione da superficie libera, ciascuna delle quali si concentra su alcuni di questi parametri e su una determinata zona presa in esame. Infatti, la maggior

parte di esse è di tipo empirico, ovvero si basa su una serie di misurazioni eseguite in uno specifico contesto territoriale con determinate caratteristiche. L'applicazione della formula al di fuori del contesto originario porta, perciò, ad errori di stima più o meno importanti in funzione della differenza di tali condizioni di base.

Il metodo universale più corretto per la stima del processo evaporativo prevede il calcolo del bilancio energetico del corpo idrico. Questo sistema si basa sulla misurazione o stima dei diversi flussi energetici in entrata e in uscita dall'invaso, per arrivare a definire la variazione energetica in un determinato periodo (Finch & Hall, 2001). Il calcolo su base energetica, tuttavia, richiede la misurazione di parametri meteorologici e climatici appositi e pertanto la sua applicazione è limitata a studi specifici in merito. A livello italiano i modelli empirici più diffusi sono, in ordine cronologico, quelli di Conti (1924), Visentini (1935) e Dragoni-Valigi (1994).

Secondo Conti (1924) l'evaporazione media mensile E_m (in mm/mese) corrisponde a:

$$E_m = k_c \times tv_m \times \frac{760}{pm}$$

Dove:

k_c = coefficiente di Romita (1959) (Tab.4)

tv_m = tensione di vapore saturo media (mm Hg)

pm = pressione barometrica media (mm Hg)

G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
4,4	4,5	5,3	6	7,5	6,4	6,3	5,9	5,9	5,8	4,7	3,8

Tab.4. Coefficienti k_c di Romita (1959)

(tabella presa da Panziera, 2007)

La tensione di vapore media tv_m , è calcolata come di seguito:

$$tv_m = [2,08 + 0,042(T_m + 10)^{1,75}]$$

Dove:

T_m = temperatura media mensile (°C)

Visentini (1935) fornisce due formule, rispettivamente per la determinazione dell'evaporazione media mensile ed annuale. Nel caso del calcolo mensile (in mm/mese) la formula è la seguente:

$$E_m = 2,25 \times T_m^{1,5}$$

Dove:

T_m = temperatura media mensile (°C)

Per questa formula alcuni autori suggeriscono di utilizzare come coefficiente il valore 2 anziché 2,25 per i grandi laghi.

L'evaporazione media annuale (in mm/anno) vede invece tre differenti formule in funzione della collocazione altimetrica dello specchio d'acqua:

$E_a = 75 \times T_a$ per specchi d'acqua posizionati ad una quota inferiore a 200 m.s.l.m.

$E_a = 90 \times T_a$ per specchi d'acqua posizionati ad una quota tra 200 e 500 m.s.l.m.

$E_a = 90 \times T_a + 300$ per specchi d'acqua posizionati ad una quota superiore a 500 m.s.l.m.

Dove:

T_a = temperatura media annua (°C)

Dragoni e Valigi (1994) propongono invece, quattro formule empiriche sulla base di uno studio condotto sui laghi dell'Italia centrale sul versante tirrenico. Le formule permettono di determinare l'evaporazione media mensile (in mm/mese) relativa ad un evaporimetro di Classe A, classico strumento utilizzato per la misurazione diretta dell'evaporazione. Esso è costituito da una vasca circolare del diametro di 120,7 cm e profondo 25 cm. Questa è posta su un ripiano in legno ben livellato ad un'altezza di circa 15 cm dal suolo e riempita fino all'altezza di 20 cm con acqua. Ogni giorno viene misurato il livello e rabboccato o riportato a 20 cm in caso di piogge superiori all'evaporazione. Tale strumento chiaramente non fornisce una misurazione esatta delle perdite evaporative da parte di un invaso in quanto le ridotte dimensioni e le caratteristiche strutturali sono tali per cui il fenomeno nell'evaporimetro si manifesta con maggiore intensità. Per questo motivo i valori misurati con questo sistema, e così anche i valori determinati con l'approccio Dragoni-Valigi (1994) devono essere corretti attraverso dei coefficienti.

La formula delle quattro, maggiormente utilizzata per la stima dell'evaporazione media mensile da un evaporimetro di classe A, secondo Dragoni-Valigi (1994), è la seguente:

$$E_m = b \times i_m^{a1} \times T_m^{a2}$$

Dove:

i_m = indice di insolazione mensile Thornthwaite (Tab.5)

T_m = temperatura media mensile

$a1 = 3,063$

$a2 = 0,486$

$b = 19,007$

Lat. N (gradi)	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
35	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16	1,03	0,97	0,86	0,85
36	0,87	0,85	1,03	1,1	1,21	1,22	1,24	1,16	1,03	0,97	0,86	0,84
37	0,86	0,84	1,03	1,1	1,22	1,23	1,25	1,17	1,03	0,97	0,85	0,83
38	0,85	0,84	1,03	1,1	1,23	1,24	1,25	1,17	1,04	0,96	0,84	0,83
39	0,85	0,84	1,03	1,11	1,23	1,24	1,26	1,18	1,04	0,96	0,84	0,82
40	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81
41	0,83	0,83	1,03	1,11	1,25	1,26	1,27	1,19	1,04	0,96	0,82	0,8
42	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
43	0,81	0,82	1,02	1,12	1,26	1,28	1,29	1,2	1,04	0,95	0,81	0,77
44	0,81	0,82	1,02	1,13	1,27	1,29	1,3	1,2	1,04	0,95	0,8	0,76
45	0,8	0,81	1,02	1,13	1,28	1,29	1,31	1,21	1,04	0,94	0,79	0,75
46	0,79	0,81	1,02	1,13	1,29	1,31	1,32	1,22	1,04	0,94	0,79	0,74
47	0,77	0,8	1,02	1,14	1,3	1,32	1,33	1,22	1,04	0,93	0,78	0,73

Tab.5. Indici di insolazione Thornthwaite per le latitudini che interessano l'Italia

(tabella presa da Dragoni-Valigi, 2015)

Il valore di E_m ottenuto deve poi essere corretto moltiplicandolo per un coefficiente di correzione (C_w), che tiene conto del fatto che l'evaporazione nell'evaporimetro è maggiore rispetto a quella in un lago.

3.2.3 Stima delle perdite per evaporazione da uno dei quattro invasi sperimentali

Al fine di disporre di un riferimento temporale per le future sperimentazioni nel sito pilota di Fossò, si è scelto di stimare l'evaporazione che potrebbe potenzialmente essere misurata in uno degli invasi dell'opera, in modo da comprendere la durata ipotetica della riserva d'acqua.

Per il calcolo si è scelto di utilizzare i dati meteorologici relativi all'anno 2022, in quanto, dato un trend delle temperature in continua crescita a causa del cambiamento climatico, i valori più recenti

rappresentano la situazione maggiormente rappresentativa degli scenari futuri. La stazione meteorologica individuata è quella di Strà (VE), più vicina all'area sperimentale da cui dista appena 2,7 km e i cui dati sono disponibili pubblicamente sul sito di ARPA Veneto.

L'approccio utilizzato per il calcolo è quello elaborato da Dragoni e Valigi (1994), in quanto ritenuto il più affidabile dei tre sistemi più diffusi in Italia. Non è stato possibile ricorrere ad altre formule di stima, in particolare i sistemi basati sulla quantificazione dell'energia, a causa della mancanza di parte dei valori richiesti. Trovandosi la stazione meteorologica ad una latitudine di 45,4°N, i valori dell'indice Thornthwaite utilizzati sono relativi ad una latitudine di 45°N. Per quanto riguarda l'aggiustamento dei dati ottenuti, teoricamente riferibili ad un evaporimetro e non alle reali condizioni di un bacino, si è scelto di non applicare nessuna correzione. Le ridotte dimensioni del bacino associate ad un basso livello dell'acqua al suo interno e al rivestimento scuro interno, lo rendono molto simile in termini di intensità evaporativa, ad una vasca evaporimetrica. Si suppone infatti, che negli invasi sperimentali il processo sarà più rapido rispetto a condizioni reali. Per questa ragione, potrebbe essere necessario adeguare anche i valori ottenuti con le misurazioni dirette in futuro.

La determinazione mensile del quantitativo di acqua evaporata vede un'evaporazione complessiva annuale di 1129 mm, con luglio che si rivela il mese più critico per il processo, con un massimo di 214 mm evaporati in un solo mese (Tab.6).

Mese	Temperatura media (°C)	Evaporazione (mm)
G	2,5	15
F	5,5	23
M	7,7	54
A	12,0	92
M	20,3	175
G	24,7	197
L	26,7	214
A	24,8	162
S	18,7	89
O	16,2	61
N	9,4	27
D	6,0	19
TOT:		1129

Tab.6. Valori di temperatura media mensile ed evaporazione mensile, determinati con il metodo Dragoni-Valigi (1994), per l'anno 2022.

Per valutare la potenziale durata di uno dei quattro invasi, i valori mensili sono stati scomposti per decade, dividendo ciascuno per tre. In questo modo è stato possibile stimare con più precisione l'ipotetico momento in cui la riserva stoccata viene persa per evaporazione totale. L'invaso esaminato è privo di copertura, con impermeabilizzazione interna, ed è stato riempito in concomitanza con l'inizio della stagione irrigua, al primo di aprile, per una profondità utile di 1,5 m (1500 mm). Non contando gli apporti piovosi, tale riserva non verrebbe completamente prosciugata, ma in linea teorica al termine della terza decade di dicembre essa dovrebbe presentare un livello residuo di risorsa idrica di 463 mm. Nonostante ciò, al termine della seconda decade di luglio, perciò dopo soli tre mesi e mezzo dallo riempimento, l'invaso vede dimezzato il proprio volume a causa degli elevati tassi evaporativi estivi, i quali vanno riducendosi verso la stagione autunnale (Fig.18).

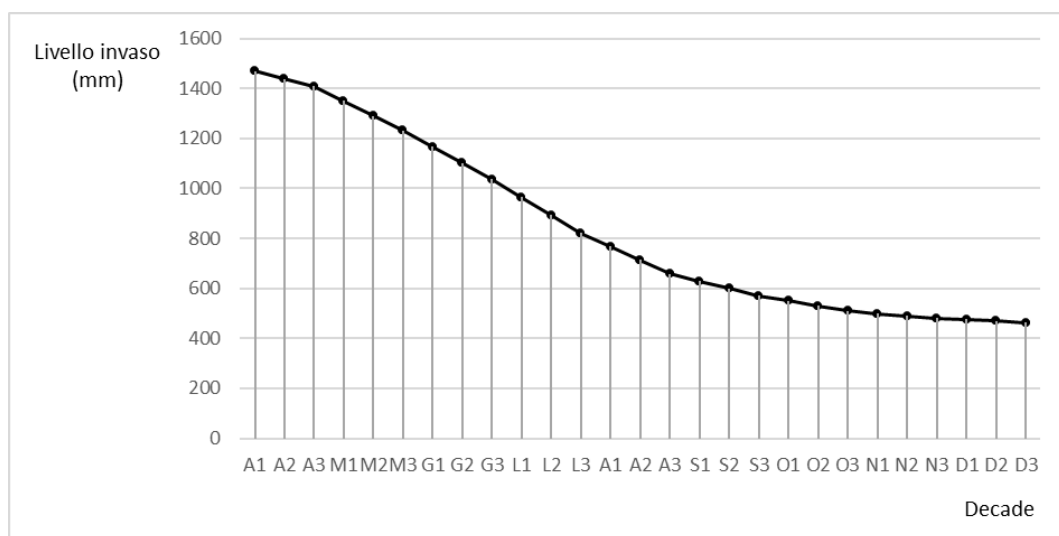


Fig.18. Andamento del livello dell'acqua per decade, ipotizzato per l'invaso sperimentale scoperto in condizioni analoghe a quelle del 2022, a partire dal mese di aprile

4. IPOTESI DI DIMENSIONAMENTO ED UTILIZZO DI UN INVASO IDEALE

4.1 Descrizione dell'area esaminata

4.1.1 Inquadramento idrografico

L'area di riferimento, presa in esame per la determinazione del volume ipotetico di un invaso aziendale, riguarda il territorio circostante il sito sperimentale sullo scolo Brentoncino, di competenza del Consorzio di Bonifica Bacchiglione. Essa da un punto di vista organizzativo e gestionale, corrisponde al sottobacino di sinistra Brenta (Fig.19), il quale si trova nel bacino elementare del Fiumazzo, a sua volta compreso all'interno del più ampio bacino Sesta Presa, una delle sette unità in cui è suddiviso l'intero territorio consortile. L'area di sinistra Brenta si estende su una superficie di circa 4.870 ha ed è delimitata ad ovest dal fiume Brenta, a nord dal Naviglio del Brenta e ad est dalle Strade provinciali SP13 e SP53, le quali segnano anche il confine orientale del Consorzio Bacchiglione con quello del Consorzio Acque Risorgive (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010). Quest'area rientra nei territori di competenza di sette comuni della città metropolitana di Venezia: Stra, Dolo, Vigonovo, Fossò, Camponogara, Campagna Lupia, Campolongo Maggiore e per una minima parte nel territorio del comune di Piove di Sacco, in provincia di Padova.

Il sottobacino sinistra Brenta si estende altimetricamente da una quota di 8-10 m.s.l.m. nella zona nord-occidentale, per arrivare a circa 2 m.s.l.m. nella porzione più meridionale. La rete scolante smaltisce le proprie acque per deflusso a gravità, da nord-ovest a sud-est, convogliandole dapprima nello scolo Cornio di Campagna Lupia. Questo confluisce poi nel canale Fiumazzo, poco più a monte del punto in cui quest'ultimo sottopassa il canale Novissimo mediante la botte a sifone di Lova, per riversarsi nella laguna (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010). In questa zona il deflusso delle acque è fortemente condizionato dal livello delle acque lagunari e pertanto è presente un impianto idrovoro in grado di sollevare le acque provenienti dallo scolo Cornio di Campagna Lupia, della portata complessiva di 16 m³/s. Oltre a questo, un altro impianto di sollevamento è situato in località "Marinelle", in quanto l'area è particolarmente depressa rispetto ai territori circostanti (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010). L'irrigazione nella zona, è di tipo "non strutturato", ovvero non presenta strutture apposite per la

consegna dell'acqua, né è prevista una particolare organizzazione in termini di turni e volumi distribuiti. L'erogazione nelle aree irrigate avviene mediante la stessa rete di bonifica che assume in questo caso una funzione promiscua (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010), sia di allontanamento delle acque meteoriche, che di alimentazione irrigua anche di fossi privati e interaziendali. Le fonti idriche sono pertanto costituite sia dagli apporti meteorici, che da acque prelevate dalla rete idrografica principale, le quali vengono convogliate nei canali in caso di necessità. Il prelievo di quest'ultime avviene mediante tre chiaviche di derivazione dal Naviglio del Brenta nei pressi di Dolo e Stra, le quali immettono l'acqua nella rete di canali che percorrono l'area centro-orientale del sottobacino, mentre il territorio ad ovest di Fossò preleva la fonte idrica da un sifone di derivazione posto sul Brenta, a nord di Vigonovo.

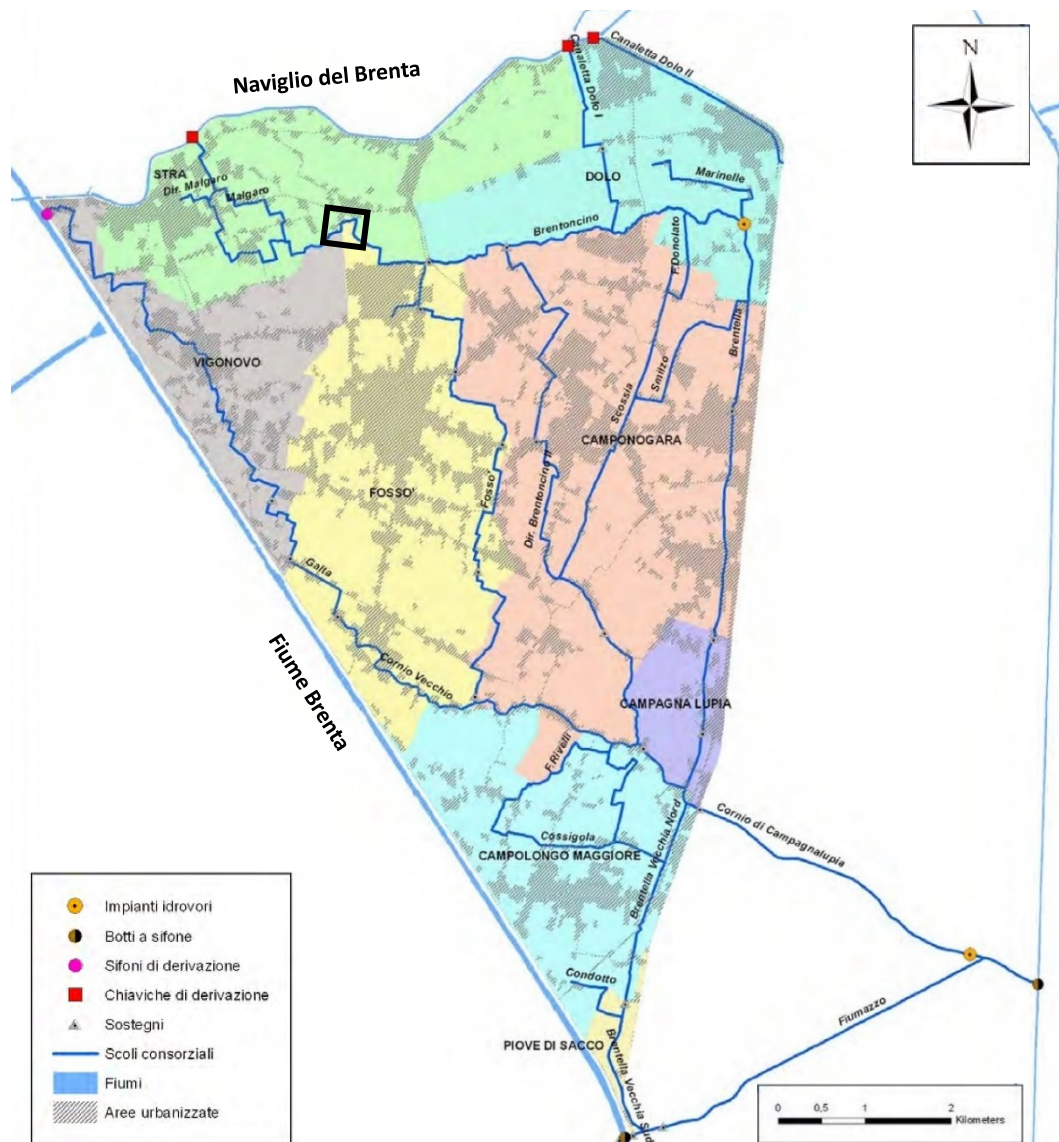


Fig.19. Carta relativa al sottobacino di Sinistra Brenta, riportante i confini comunali, la rete scolante principale e le maggiori opere idrauliche. Il riquadro nero indica il sito sperimentale di Fossò.

(figura presa da Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010)

L'allegato A del DGR 178-2023, sulla base dei dati ricavati dalla banca dati SIGRIAN, fornisce informazioni in merito alla superficie attrezzata ed irrigata, le quali corrispondono rispettivamente alla superficie potenzialmente irrigabile ovvero dotata delle strutture, in questo caso costituite dalla rete di canali, necessarie alla distribuzione idrica e all'area effettivamente irrigata. Nell'area in esame la superficie attrezzata per l'irrigazione ammonta a circa 1.537 ha e di questi praticamente tutti risultano essere irrigati annualmente (Fig.20) (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010). Nel 2020 i volumi d'acqua erogati complessivamente si attestano su 6.925.720 m³ (DGR 178-2023), a cui si aggiunge una percentuale di autoapprovvigionamento, ovvero i prelievi effettuati autonomamente dalle aziende agricole mediante concessioni superficiali o pozzi. Non è possibile stabilire un'esatta localizzazione delle superfici servite da questo sistema di prelievo, tuttavia, nell'area di Sinistra Brenta risulta una pratica scarsamente diffusa. La distribuzione dell'acqua, ad eccezione delle realtà irrigue che esercitano un'irrigazione costante durante tutta la stagione, è del tipo "a richiesta". In questo caso su domanda dell'agricoltore il personale del consorzio provvede ad innalzare il livello nei canali in modo da permetterne il prelievo.

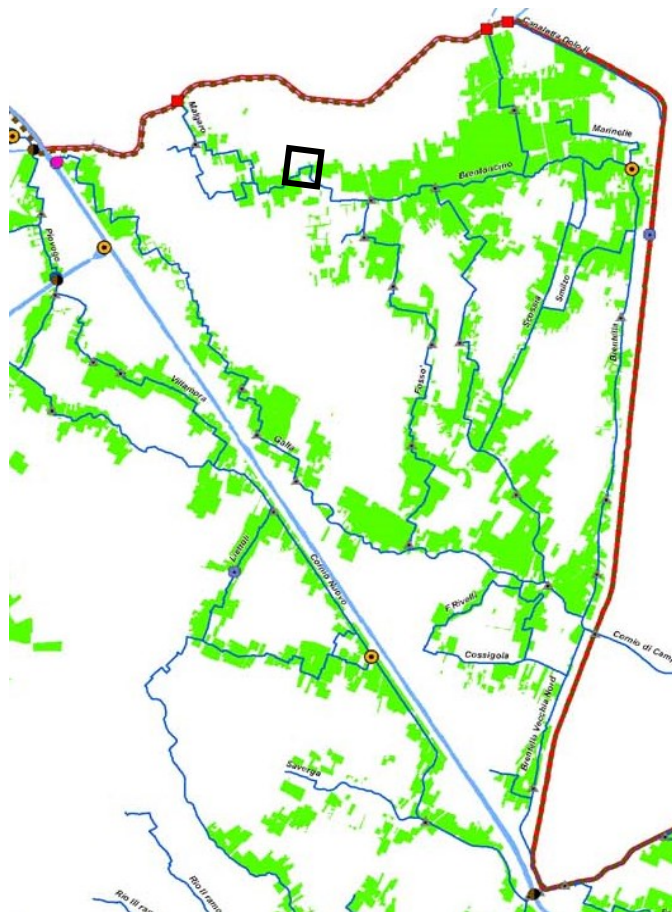


Fig.20. Carta relativa alle aree irrigabili (in verde) nel sottobacino di Sinistra Brenta.
Il riquadro nero indica il sito sperimentale di Fossò.

(figura presa da Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2010)

4.1.2 Analisi climatica

L'area in esame si trova al confine tra due regioni mesoclimatiche, quella continentale tipica della pianura Padano-Veneta e quella litoranea che riguarda invece la fascia costiera adriatica (ARPA Veneto, 2022a). La prima è caratterizzata da estati calde ed inverni relativamente rigidi, con temperature medie annue che si attestano attorno ai 13°C. Secondo la classificazione climatica di Köppen, la quale distingue le diverse forme climatiche in funzione di temperatura e precipitazione, questo mesoclima appartiene alla classe "temperato sub-continentale" (ARPA Veneto, 2022a). Spostandosi verso la costa invece, le temperature aumentano leggermente, fino ad arrivare a medie annuali di 14°C, mitigate dalla vicinanza con il mare. Azione che tuttavia, nel caso del Veneto, resta comunque limitata sia per le caratteristiche del mare Adriatico, interno e poco profondo, sia perché la sua posizione rispetto all'entroterra gli permette di mitigare solo le masse d'aria provenienti da est e sud est. Per questo motivo, le temperature invernali seppur più miti restano comunque basse a causa dell'influsso della bora fredda ed asciutta, che soffia da nordest (ARPA Veneto, 2022a). Da un punto di vista pluviometrico l'area di bassa pianura presenta i livelli più bassi della regione, con i valori minimi nel basso Polesine attorno ai 650 mm, fino ai 950 mm nell'alta Padovana, seguendo l'andamento tipico crescente, andando dalla costa verso le Dolomiti meridionali (ARPA Veneto, 2022a).

Per focalizzare l'attenzione sulle dinamiche climatiche nell'area in esame sono stati analizzati i dati storici per il periodo 1998-2022, relativi alle stazioni meteorologiche situate in un raggio di 15 km dal sito sperimentale. I dati, disponibili pubblicamente online sul sito di ARPA Veneto, riguardano perciò le stazioni di: Mira (7 km), Campagna Lupia (7 km), Legnaro (10 km), Campodarsego (15 km) e Codevigo (15 km). Per quanto concerne la stazione meteorologica di Stra invece, nonostante risulti essere la più vicina all'impianto pilota con soli 2,7 km di distanza, non dispone di dati storici antecedenti al 2020, per questo motivo non è stata utile all'analisi climatica. La piovosità annua nella zona, per l'intervallo temporale analizzato, è in media 867 mm e non presenta variazioni statisticamente significative (Fig.21). Da notare è invece un aumento della variabilità interannuale e stagionale delle precipitazioni, con il manifestarsi di fenomeni più intensi rispettivamente siccitosi o alluvionali (ARPA Veneto, 2022a). Complessivamente l'anno più piovoso è stato il 2014 con 1332 mm piovuti, a fronte del 2022 che con soli 582 mm si conferma essere il più siccitoso degli ultimi 25 anni. Anche il regime pluviometrico annuale è concorde con la tipologia mesoclimatica continentale. Le precipitazioni tendono infatti a concentrarsi nei mesi primaverili ed autunnali, mentre le stagioni estiva e soprattutto invernale presentano una piovosità inferiore. Le temperature si attestano su una media complessiva di 13,7 °C, tuttavia presentano una tendenza positiva e statisticamente significativa, con un aumento di +0,6°C nel decennio 2013-2022 rispetto al 2003-2012 (Fig.22). L'area si presenta come zona di transizione anche

dal punto di vista della ventosità, la quale nell'entroterra si manifesta tipicamente con venti prevalenti da nordest, di intensità media compresa tra 0,7 e 1,3 m/s, in funzione delle stazioni. L'area di misurazione meteorologica di Campagna Lupia invece, la quale si affaccia sulla laguna, differisce dalle altre analizzate e manifesta una ventosità prevalente da sudest nei mesi estivi, con una velocità media maggiore di circa 2,2 m/s.

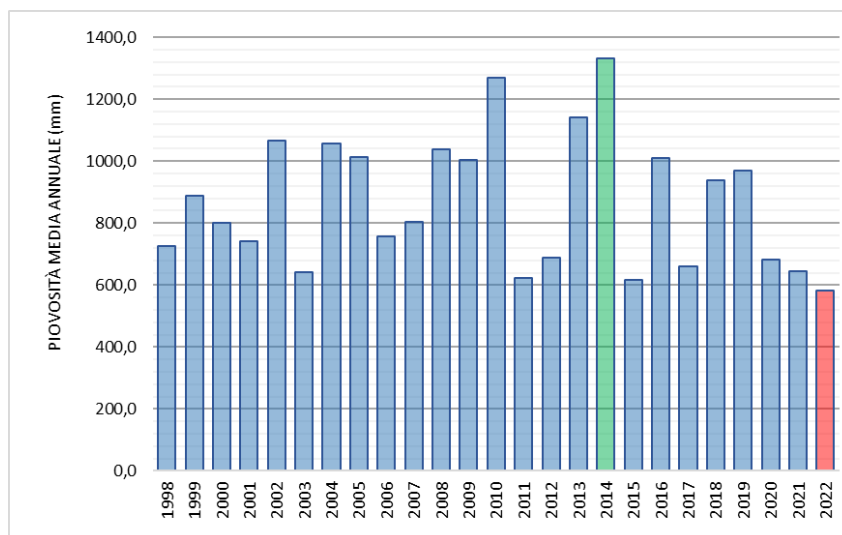


Fig.21. Andamento della piovosità cumulata annua nell'area di sinistra Brenta dal 1998 al 2022. In verde e in rosso sono evidenziati rispettivamente l'anno con piovosità massima e minima. (Dati: ARPA Veneto)

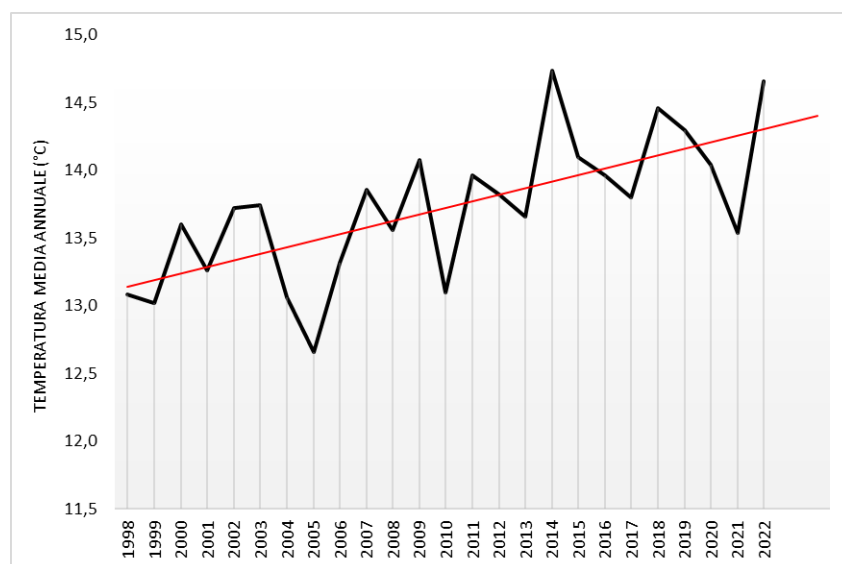


Fig.22. Andamento della temperatura media annua nell'area di sinistra Brenta dal 1998 al 2022. La linea rossa indica la tendenza. (Dati: ARPA Veneto)

Queste differenze sono tipiche della fascia costiera, la quale è normalmente più ventilata soprattutto a causa delle brezze di mare, circolazioni di origine termica, le quali si originano a causa di un più rapido

riscaldamento del suolo di giorno per effetto del soleggiamento, rispetto al mare, ed un raffreddamento per irraggiamento nelle ore notturne. Pertanto, la brezza diurna soffia da sudest in direzione della costa, mentre quella notturna da nordest. Questi fenomeni si manifestano con maggiore intensità nei mesi primaverili ed estivi a causa di un maggiore irraggiamento solare, con cielo sereno e in situazioni anticicloniche, quando la debolezza della circolazione generale consente lo sviluppo di questi fenomeni locali.

Legati ai mesi invernali sono invece le nebbie, tipiche della pianura Padana, maggiormente frequenti appunto durante i semestri freddi. Queste sono dovute a fenomeni di inversione termica per irraggiamento, che si verificano durante situazioni anticicloniche invernali (ARPA Veneto, 2022a). In questi casi, l'umidità presente nei bassi strati dell'atmosfera raggiunge la condizione di saturazione e tende a condensare, ristagnando in prossimità del terreno. Il tutto è correlato alla presenza di fonti di umidità al suolo, quali l'abbondanza di acque superficiali, tipiche della bassa pianura.

4.1.3 Analisi agronomica

Al fine di individuare le colture maggiormente presenti e le tecniche colturali medie, relative all'area in esame si è deciso di svolgere un'indagine agronomica sulla base di dati bibliografici e di informazioni raccolte presso gli agricoltori della zona.

Sul territorio di competenza del Consorzio Bacchiglione la classe colturale prevalente è quella dei seminativi, i quali superano l'86% della superficie agricola utilizzabile (SAU) per un totale di 10.486 ha. Segue poi la vite, la quale occupa il 5,2% della SAU (DGR 178-2023), legata non solo al Prosecco DOC ma anche ad altre denominazioni di origine, di nicchia e di particolare pregio. Un'altra produzione rilevante nel territorio consortile è l'attività vivaistica, la quale occupa circa 300 ha, pari al 2,5% della SAU (DGR 178-2023), concentrati soprattutto nel comune di Saonara e nelle aree limitrofe. Le colture orticole si attestano su una superficie molto ridotta, pari solamente all'1,2% della SAU (DGR 178-2023), tuttavia, anch'esse riguardano produzioni tipiche di grande importanza, come il radicchio e l'asparago, oltre agli ortaggi da tubero.

Focalizzando l'attenzione sul sottobacino di sinistra Brenta, nell'area prevale nettamente la coltivazione di seminativi, a cui si associano sporadicamente, quella della vite nelle aree limitrofe al Naviglio del Brenta, legata alla denominazione tipica della Riviera del Brenta DOC, e quella orticola. I cereali più diffusi sono frumento ed orzo per gli autunno-vernini, ed il mais da granella o da insilato. Tra le colture industriali troviamo principalmente la soia, la quale succede nella maggior parte dei casi a frumento

ed orzo, in secondo raccolto, e la colza, la cui coltivazione sta crescendo negli ultimi anni favorita da buoni prezzi di vendita e dalle ridotte richieste idriche. Nella zona vi è anche una discreta presenza della bieticoltura, nonostante il costante calo della superficie ad essa dedicata, a livello regionale. Dal punto di vista irriguo, le colture che richiedono apporti idrici sono, mais, soia, barbabietola, vite oltre alle specie orticole e frutticole. Negli ultimi anni, contraddistinti da un'intensa siccità primaverile, si segnala la tendenza da parte di alcuni agricoltori a ricorrere all'irrigazione del frumento. Questa scelta, tuttavia, non rappresenta una pratica diffusa, oltre a richiedere un'attenta valutazione di convenienza sul piano economico. Per quanto riguarda il mais l'adacquamento è saltuario, tipicamente di soccorso, in funzione delle richieste della coltura e dell'andamento meteorologico. Tuttavia, a causa della riduzione della piovosità nei mesi estivi in prossimità del massimo sviluppo della coltura, negli ultimi anni questa, mostra sempre crescenti difficoltà nello sviluppo, tali da rendere l'irrigazione una pratica stabile, anziché di soccorso. La distribuzione, praticata con sistemi ad aspersione semoventi ad aspo o "rotoloni", comporta costi non indifferenti stimati tra i 300 e i 450 €/ha, per un volume di adacquamento stagionale di 2500 m³/ha (Taglioli, 2021). In annate particolarmente asciutte i volumi richiesti possono aumentare ulteriormente, per questo motivo le recenti tecniche di coltivazione stanno evolvendo sistemi volti a minimizzare gli apporti idrici con l'irrigazione. Il sistema più diffuso vede un anticipo della semina del mais, già nella prima e nella seconda decade di marzo, in modo da favorire lo sviluppo dell'apparato radicale quando il terreno presenta ancora un buon tasso di umidità. Le piante saranno in questo modo maggiormente resistenti nella stagione secca. Un ciclo colturale più precoce vedrà inoltre una minore permanenza in campo delle piante durante la stagione più asciutta, tipicamente quella estiva, con una conseguente riduzione nella richiesta irrigua. Il rischio principale di questo sistema è rappresentato dalle gelate tardive, le quali tendono a manifestarsi tra i mesi di marzo e aprile, esattamente in concomitanza con l'emergenza del mais seminato in anticipo. L'alternativa all'anticipo della semina è l'utilizzo di ibridi tolleranti la siccità, i quali garantiscono la sopravvivenza della coltura anche in condizioni più secche. Come nel resto della pianura Padana anche in questa zona sono presenti alcune realtà aziendali che preferiscono ricorrere alla microirrigazione mediante manichetta anche su mais. Anche per la soia gli apporti idrici sono prevalentemente di emergenza, tuttavia le richieste elevate da parte della coltura anche in questo caso fanno dell'irrigazione una pratica agronomica essenziale. La coltivazione della barbabietola al contrario non è sempre associata all'adacquamento, nel nord Italia infatti, buona parte di essa è condotta in asciutta. Anche in questo caso apporti idrici di soccorso, nei mesi estivi, consentono un notevole incremento delle produzioni e della resa zuccherina. Nel caso della vite e delle restanti colture irrigue, prevalgono gli apporti con sistemi microirrigui.

4.2 Assetto aziendale ipotizzato

Date le premesse climatiche, idrografiche ed agronomiche relative all'area presa in esame, al fine di stabilire il volume ideale per un vaso, è necessario definire le caratteristiche aziendali prese in considerazione.

A questo scopo si sono analizzati i parametri principali in termini di struttura dell'azienda agricola a livello regionale, per quanto riguarda le grandi colture. Infatti, secondo il Rapporto strutturale dell'agricoltura veneta relativo al periodo 2008-2018, cereali e colture industriali rappresentano l'ossatura principale del sistema agricolo regionale e la loro estensione negli anni è rimasta pressoché invariata, pari al 55% della Superficie agricola utilizzata (SAU) Regionale. Questa frazione è concentrata in gran parte nelle provincie di Rovigo e Venezia e Padova, le quali detengono da sole più del 60% della superficie totale destinata a seminativi. Analizzando in maniera indipendente i due comparti si osservano, tuttavia, grandi cambiamenti nel corso del tempo. Dal punto di vista del comparto cerealicolo si è assistito dal 2008, ad un calo del 27,2% della superficie coltivata, in favore delle colture industriali, le quali invece sono più che raddoppiate. Questo effetto sostituzione si è osservato soprattutto tra mais e soia, dove il primo mostra una diminuzione del 40% della superficie coltivata, mentre per la soia la superficie è addirittura triplicata a livello regionale. In provincia di Venezia ad oggi la coltivazione della soia si attesta su una superficie di circa 50.000 ha, mentre il mais ne occupa solamente la metà, rimanendo sotto i 26.000 ha, una situazione sostanzialmente inversa allo scenario del 2008. Nel periodo 2008-2018 si assiste inoltre ad una variazione nella struttura stessa dell'azienda, la quale sembra muoversi verso un aumento nella superficie coltivata in favore di una specializzazione all'interno di un comparto produttivo. Infatti, se da un lato si assiste ad una riduzione del numero di realtà agricole sul territorio, dall'altro si presenta un aumento della superficie media aziendale in tutti i comparti (Veneto Agricoltura, 2020).

L'analisi che segue è basata perciò su di un'ipotetica azienda, le cui caratteristiche sono ideali e tali per cui venga messo in evidenza il confronto dei consumi tra le colture irrigue praticate, nonché tra due scenari meteorologici diversi.

L'azienda ipotetica esaminata si occupa della coltivazione di seminativi ed è situata nella zona di Fossò (VE). Essa si estende su una superficie agricola utilizzabile di dodici ettari, dove le colture praticate sono ad anni alterni, mais a cui seguono frumento come coltura principale e soia in secondo raccolto. Questa superficie è suddivisa equamente in quattro appezzamenti distanti tra di essi e dalla sede aziendale. Di seguito è stata valutata la richiesta idrica relativa alle colture irrigue praticate, nello specifico mais e soia, in relazione a due diverse annate, con l'obiettivo di confrontare i fabbisogni in condizioni di

piovosità normali, rispetto ad un'annata siccitosa. Il primo scenario, il quale presenta una piovosità ed un'evapotraspirazione medie, coerenti con la tendenza media del periodo 1998-2022, riguarda l'anno 2016. Nel secondo caso invece l'irrigazione è stata analizzata rispetto alle condizioni meteorologiche del 2022, anno più siccitoso dell'intervallo storico preso in considerazione.

La stima del reale volume di stoccaggio necessario prende poi in considerazione il sistema irriguo e la sua efficienza. In questo caso si è ipotizzato un sistema di irrigazione ad aspersione mediante irrigatori semoventi a naspo, in quanto metodo più diffuso nella zona.

4.3 Determinazione del fabbisogno idrico colturale

La determinazione del volume irriguo ipoteticamente prelevato dal bacino aziendale deve tenere conto, in primo luogo, dei fabbisogni strettamente necessari alla coltura, i quali sono solitamente determinati attraverso la formula del bilancio idrico:

$$P + F + I = ET + Perc + R + \Delta Ru$$

L'equazione presenta a sinistra gli apporti idrici mentre a destra le asportazioni. Tra i primi, vi sono la piovosità (P), gli apporti dovuti alla risalita capillare dell'acqua di falda (F) ed appunto il volume fornito con l'irrigazione (I). Quest'ultima è l'unica frazione che dovrà essere fornita artificialmente alla coltura e perciò rappresenta in questo caso l'incognita. Per quanto riguarda le asportazioni, l'evapotraspirazione della coltura (ET) è il fattore principale, il quale costituisce la quantità di acqua necessaria alla pianta per lo svolgimento dei processi metabolici e pertanto l'unica frazione "produttiva" di questa voce. Oltre a questa nell'equazione rientrano i volumi d'acqua persi per percolazione (Perc), per ruscellamento (R) ed infine la variazione della riserva idrica utile del suolo (ΔRu).

Nella situazione esaminata, tuttavia, non è stato possibile quantificare tutti i parametri richiesti da questa forma di calcolo. Per alcuni di essi, infatti, la dipendenza da un elevato numero di variabili, rende difficile una determinazione su base bibliografica esatta. Questo motivo, aggiunto all'impossibilità di eseguire misurazioni dirette sul campo, ha perciò costretto ad una semplificazione dei calcoli al fine di evitare eccessive approssimazioni che avrebbero finito per complicare l'analisi. I valori di risalita capillare (F) e ruscellamento superficiale (R) sono stati perciò omessi dall'equazione. Per quanto riguarda quest'ultima frazione delle asportazioni, la sua rilevanza sarebbe in ogni caso minima sul

totale delle perdite, in quanto su superfici pianeggianti il run-off delle acque meteoriche è di molto inferiore rispetto a situazioni in pendenza. Più importante sarebbe invece l'impatto della risalita capillare. In accordo con l'analisi idrologica ed agronomica dell'area, infatti, l'abbondanza di acque superficiali nella zona è infatti un fattore accertato. Tuttavia, il fenomeno di risalita capillare utile alle colture agrarie ha una distribuzione condizionata a diverse variabili, tra cui dalla profondità dell'acquifero, il livello delle acque di scolo nei canali, le proprietà del suolo, la quota sul livello del mare, le condizioni meteorologiche, ... Per questi motivi, questa forma di apporto idrico presenta una variabilità sia stagionale, che spaziale, molto diversificata, tale per cui il suo impatto è difficilmente quantificabile. La sua omissione nel calcolo determina una leggera sovrastima dei volumi di adacquamento, la quale però non rappresenterà un problema in quanto in eccesso rispetto al valore reale.

La formula applicata nell'analisi che segue è perciò quella del bilancio idrico in forma semplificata, la quale considera la disponibilità idrica, costituita dalla riserva facilmente utilizzabile presente inizialmente nel suolo (RFU_i), dagli apporti atmosferici (P) e da un'eventuale irrigazione fornita (I), mentre i consumi come sola evapotraspirazione da parte di suolo e piante (ET_m). In questo modo il fabbisogno irriguo viene determinato per differenza, nel caso in cui le asportazioni superino gli apporti secondo la formula:

$$P + RFU_i > ET_m$$

In questo caso la frazione di acqua irrigua richiesta sarà quindi pari alla differenza tra apporti ed asportazioni secondo la formula:

$$ET_m - (P + RFU)$$

In caso contrario invece, se l' ET_m risulta inferiore al totale degli apporti, vi sarà acqua in eccesso, la quale andrà ad integrare la riserva idrica del suolo fino a saturazione per poi dare luogo a percolazione. Questo caso, tuttavia, è estremamente raro se non in condizioni di piovosità estremamente elevata. Oltre a ciò, essendo l'obiettivo del presente lavoro, quello di stimare il volume irriguo necessario, questa situazione non è stata considerata.

Una volta individuato, sulla base appunto dei fabbisogni colturali, il volume necessario alla coltura, definito anche "volume utile", questo dovrà essere corretto in funzione del sistema irriguo e del rendimento di tutta la rete, in modo da ottenere il reale volume di adacquamento necessario.

4.3.1 Apporti pluviometrici

I dati relativi agli apporti piovosi giornalieri (P), sono stati forniti da ARPA Veneto. La stazione meteorologica analizzata è quella di Campagna Lupia situata in località Valle Averno (N 45°20'57.988"; E 12°8'29.558"), la quale costituisce la stazione di misurazione più vicina al sito sperimentale a disporre di dati storici, in quanto quella di Strà non presenta misurazioni antecedenti al 2020. L'area di Valle Averno è situata al confine tra le aree agricole ed il territorio lagunare, ad una distanza di circa 3 km dal centro abitato di Campagna Lupia e 9 km dal sito sperimentale di Fossò. La piovosità media annuale relativa al periodo 1998-2022, si attesta sugli 832 mm, in linea con la media delle stazioni limitrofe (Mira, Legnaro, Codevigo, Campodarsego) di 867 mm, così come per il regime pluviometrico (Fig.23). L'individuazione dei due scenari confrontati, si è basata essenzialmente sulla piovosità cumulata annua della serie storica osservata. L'obiettivo generale di confrontare una situazione in linea con le condizioni medie ed una caratterizzata invece da siccità estrema, ha visto la scelta dei dati di precipitazione rispettivamente del 2016 e del 2022. La piovosità media nelle due situazioni è rispettivamente di 908 mm e 560 mm, con il 2016 che riporta così un + 9% rispetto alla media 1998-2022, incremento tuttavia trascurabile per una situazione che può essere considerata nella norma, e il 2022 il quale invece si conferma ampiamente sotto la tendenza storica, con una flessione di quasi un -33%.

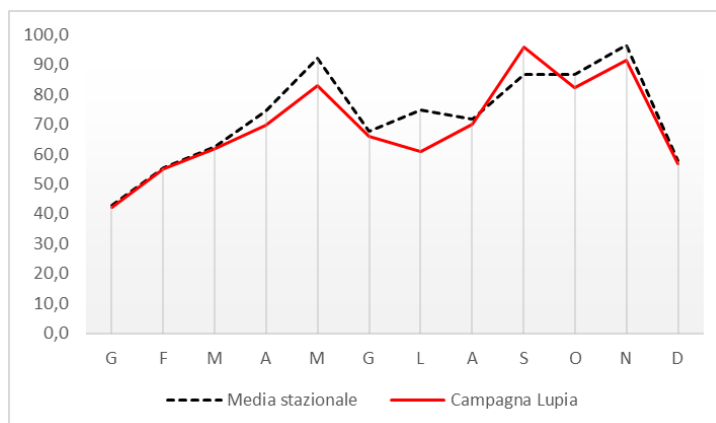


Fig. 23: Confronto tra il regime pluviometrico annuale medio delle stazioni meteorologiche nell'area di sinistra Brenta e quello relativo alla stazione di Campagna Lupia, per il periodo storico 1998-2022. (Dati: ARPA Veneto)

Tra i due scenari si osservano tuttavia, anche differenze dal punto di vista del regime pluviometrico (Fig.24), con un 2016 caratterizzato da per una elevata piovosità primaverile, molto superiore rispetto all'andamento storico, ad eccezione del mese di aprile che si presenta più asciutto. Il periodo estivo si mostra scarso nelle precipitazioni ma non eccessivamente, così come anche la stagione autunnale rientra in quello che è il normale andamento stagionale. Nel 2022 invece il grafico evidenzia apporti

piovosi in gran parte inferiori, rispetto al primo scenario ed anche all'andamento storico, caratterizzato da una scarsa piovosità che dai mesi invernali si protrae fino ad agosto dove gli apporti mostrano una leggera crescita, seguita poi nuovamente da un ottobre praticamente privo di piogge. I mesi invernali sono leggermente più piovosi, tuttavia, incapaci di compensare la siccità precedente e soprattutto ininfluenti dal punto di vista della stagione colturale.

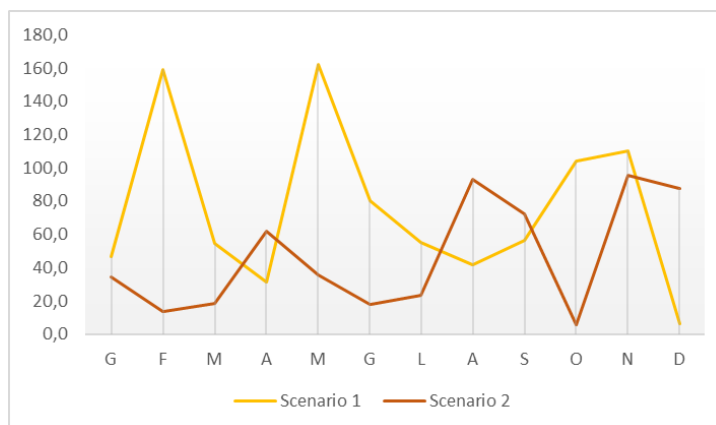


Fig. 24: Confronto tra il regime pluviometrico annuale dell'anno 2016 (Scenario 1) e 2022 (Scenario 2), relativi alla stazione meteorologica di Campagna Lupia. (Dati: ARPA Veneto)

4.3.2 Asportazioni evapotraspirative

Il calcolo delle asportazioni si basa essenzialmente sulla determinazione del valore di evapotraspirazione, specifico per ciascuna coltura in ogni situazione. Questo comprende i consumi legati a due processi distinti quali, la traspirazione da parte della pianta e l'evaporazione dalle superfici, in particolare dal suolo. Il primo è il meccanismo fisiologico attraverso cui tutti gli organismi vegetali richiamano acqua dal terreno, necessaria alla crescita e ai processi metabolici, nonché vettore di elementi nutritivi, e che viene poi rilasciata attraverso gli stomi in forma di vapore acqueo. I fattori che regolano questo meccanismo sono in parte legati all'ambiente circostante ed in parte alla pianta. Dal punto di vista ambientale rivestono particolare importanza la disponibilità idrica nel suolo, la temperatura e l'energia disponibile, ovvero la radiazione solare. Tutti questi fattori influenzano positivamente il processo di traspirazione, tuttavia anche la pianta dispone di sistemi di regolazione fisiologica del meccanismo, i quali vengono generalmente messi in atto per adattarsi alle richieste dei vari metabolismi o a particolari situazioni di stress come la carenza idrica. Nello specifico per aumentare i flussi idrici in ingresso le piante sono in grado di aumentare il potere assorbente radicale, mentre per

ridurre il rilascio di acqua mettono in atto la chiusura degli stomi oppure l'aumento della concentrazione osmotica nei tessuti. L'evaporazione è invece il fenomeno che vede il passaggio dell'acqua presente sulle superfici, in particolare quella presente sulla superficie del suolo, dallo stato liquido ad aeriforme. I fattori che ne determinano l'intensità sono in questo caso tutti di origine meteorologica. Come per la traspirazione sono determinanti temperatura, radiazione solare e ventosità, tutte condizioni che influenzano positivamente il fenomeno. Essendo l'evaporazione legata soprattutto all'acqua presente sulla superficie del suolo, essa sarà maggiore in caso di terreno nudo, mentre si riduce all'aumentare della copertura fogliare, la quale crea un effetto di ombreggiamento. La somma dei due fenomeni sopra descritti, determina l'evapotraspirazione, la cui quantificazione è resa estremamente complessa dalla numerosità delle variabili che concorrono al loro svolgimento. Sia da un punto di vista pratico, della misurazione, che nel caso di una sua stima teorica si incontrano non poche difficoltà, tuttavia, la stima viene sempre preferita alla misurazione diretta nei casi in cui non è necessario un elevato grado di precisione. Anche per il presente studio, si è scelto di ricorrere ad una determinazione delle perdite evapotraspirative da un punto di vista teorico, la quale risulta tuttavia sufficientemente esatta in considerazione anche della grande disponibilità di dati meteorici da parte del servizio meteorologico regionale.

Il processo di calcolo prevede, per arrivare a definire il consumo di una coltura specifica, che venga prima stimata un'evaporazione di riferimento (ET_0). Un valore standardizzato, relativo ad un prato di *Festuca arundinacea*, uniforme, di altezza pari a 12 cm, in ottimo stato nutrizionale e senza limitazioni idriche. Così facendo vengono annullati gli effetti colturale ed ambientale e il valore ottenuto dipenderà solamente dalle condizioni meteorologiche. Successivamente, il valore di ET_0 viene moltiplicato per un valore detto "coefficiente colturale" (K_c), diverso per ogni coltura, per ciascuna fase del ciclo di sviluppo. Si ottiene così il valore di evapotraspirazione massima (ET_m), ovvero quello osservabile quando la pianta si trova nelle condizioni ideali. Ulteriori correzioni del valore di ET_m portano alla definizione del valore di evapotraspirazione reale o effettiva (ET_r), relativo alle condizioni ambientali reali le quali possono aver indotto nella coltura una riduzione del ritmo traspirativo. Però, nonostante quest'ultimo valore sia a livello teorico il più preciso, generalmente si preferisce fermarsi alla definizione dell' ET_m in quanto ulteriori correzioni richiederebbero innanzitutto una perfetta conoscenza non solo degli aspetti meteorologici ma anche fisiologici dell'organismo vegetale e pedologici. Inoltre, trattandosi di approssimazioni successive talvolta è preferibile sovrastimare leggermente il fenomeno per evitare di incappare in errori di stima. Per questo si suppone che la coltura si trovi sempre in condizioni ottimali, ignorando ad esempio che lunghi periodi senza precipitazioni piovose inducono nella coltura meccanismi di riduzione della traspirazione per massimizzare la conservazione dell'acqua disponibile.

Come per la piovosità, anche i valori di evapotraspirazione potenziale (ET_0) giornaliera per la stazione meteorologica di Campagna Lupia, sono stati forniti da ARPA Veneto. La loro determinazione è avvenuta secondo il metodo FAO basato sull'equazione di Penman-Monteith. Questo modello analitico, sviluppato da Penman (1948) considera sia le equazioni del bilancio energetico, sia del trasporto turbolento. Inoltre, le modifiche introdotte da Monteith (1965) tengono conto anche dell'insieme dei processi di diffusione del vapore acqueo, dal mesofillo all'atmosfera, attraverso gli stomi. Nel 1998 l'equazione, riconosciuta come il sistema più preciso per il calcolo dell'evapotraspirazione, è stata adottata come modello di riferimento dalla FAO ed inserita nel quaderno 56.

L'equazione Penman-Monteith FAO-56 è la seguente:

$$ET_0 = \frac{0,408(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u)}$$

dove:

ET_0 = evapotraspirazione di riferimento (mm d^{-1})

R_n = radiazione netta ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = flusso di calore nel suolo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

T = temperatura media dell'aria ($^{\circ}\text{C}$)

u = velocità media del vento a 2 m dal suolo (m s^{-1})

$e_s - e_a$ = deficit di saturazione (kPa)

Δ = pendenza della curva di pressione ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

γ = costante pirometrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

0,408 = costante di conversione, della radiazione all'evaporazione in mm

Una prima indicazione sull'andamento della disponibilità idrica stagionale può derivare dall'analisi del bilancio idroclimatico (BIC). Confrontando infatti l'andamento dell'evapotraspirazione di riferimento, con il regime pluviometrico annuale verranno subito evidenziati i mesi in cui la piovosità supera le asportazioni colturali potenziali, in cui ipoteticamente l'acqua atmosferica sarà sufficiente a coprire i fabbisogni, e quelli dove invece le asportazioni sono superiori agli apporti naturali e dove è probabile che si debba intervenire con l'irrigazione. Analizzando l'andamento di precipitazioni ed ET_0 , relativi ai due scenari esaminati (Fig.25), si notano due condizioni importanti, le quali stanno alla base della siccità del 2022, la ridotta piovosità e gli alti tassi di evapotraspirazione. Come visto precedentemente nel secondo scenario, gli apporti atmosferici di molto inferiori alla media fanno sì che anche nei mesi primaverili, questi non siano in grado di coprire gli ancora ridotti fabbisogni degli organismi vegetali. Oltre a questo, le alte temperature e la ridotta umidità atmosferica del 2022 hanno indotto un anomalo

innalzamento dei tassi di evapotraspirazione, i quali si dimostrano superiori per ben nove dei dodici mesi, rispetto alla situazione del 2016.

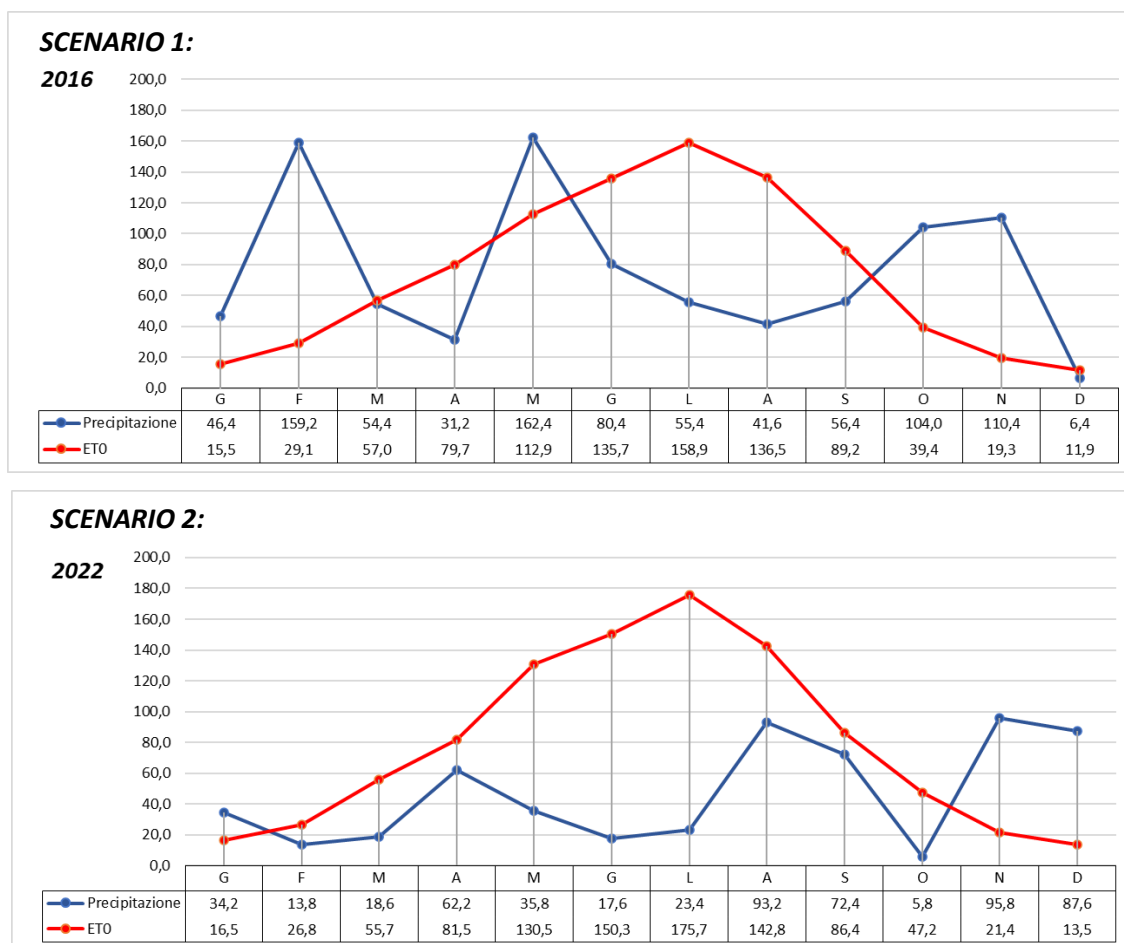


Fig. 25. Andamento dei valori cumulati mensili di precipitazione ed evapotraspirazione di riferimento, per gli anni 2016 (Scenario 1) e 2022 (Scenario 2), relativi alla stazione meteorologica di Campagna Lupia. (Dati: ARPA Veneto)

L'ETO dello scenario 2 si dimostra superiore complessivamente del 6,8% rispetto allo scenario 1, con anomalie mensili che arrivano anche a +19,8% nel mese di ottobre 2022 e di +15,6% nel mese di maggio dello stesso anno. Il valore cumulato massimo mensile si manifesta in entrambi i casi nel mese di luglio, con 159 mm nel 2016, a fronte dei quasi 176 mm nel 2022.

Al fine di determinare i valori di evapotraspirazione massima per ognuna delle due colture prese in esame si è poi provveduto ad individuare in bibliografia i coefficienti colturali più diffusi. La scelta è stata quella di suddividere il ciclo colturale in quattro fasi, rispettivamente, l'emergenza, la copertura, il pieno sviluppo e la maturità. Ad ognuna di queste è stata attribuita una durata ipotetica in giorni, ed un valore del coefficiente colturale (Tab.7; Tab.8). Per il mais da granella, considerata una grande diffusione nella zona degli ibridi di classe 500 (classe di maturazione FAO), si è assunta una durata

complessiva del ciclo di 120 giorni. Nel caso della soia invece, trattandosi di una coltura in fase di secondo raccolto, considera un ciclo di 95 giorni, relativo ad un gruppo di maturazione 0+.

Stadio del ciclo colturale	Coefficiente colturale (kc)	Durata (giorni)
Emergenza	0,3	16
Copertura	0,8	40
Pieno sviluppo	1,15	30
Maturazione	0,7	34
TOT:		120

Tab.7. Valori dei coefficienti colturali (kc) e della durata delle relative fasi del ciclo di sviluppo, per mais come coltura principale

Stadio del ciclo colturale	Coefficiente colturale (kc)	Durata (giorni)
Emergenza	0,3	15
Copertura	0,8	25
Pieno sviluppo	1,1	30
Maturazione	0,5	25
TOT:		95

Tab.8. Valori dei coefficienti colturali (kc) e della durata delle relative fasi del ciclo di sviluppo, per soia in secondo raccolto

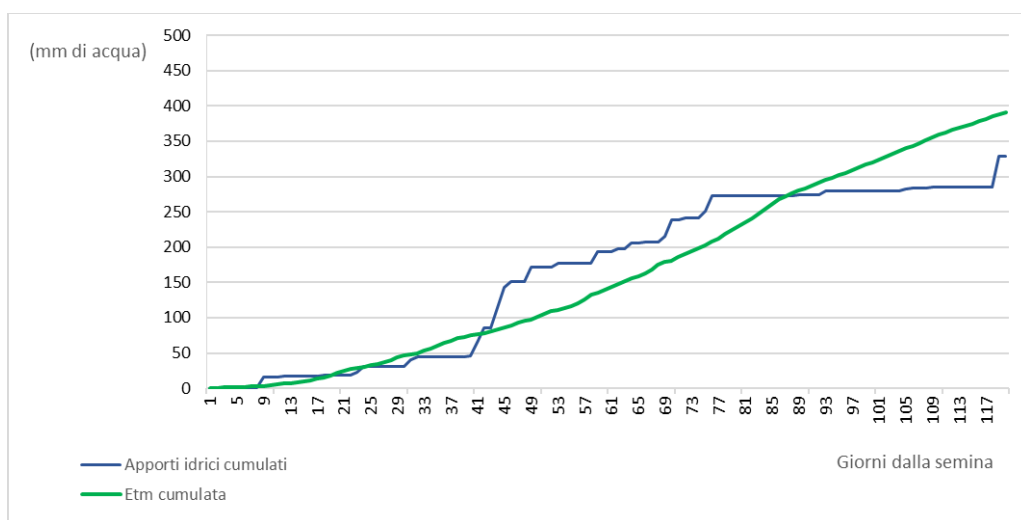
In seguito, associando i dati giornalieri di evapotraspirazione potenziale, al ciclo ipotetico individuato per ciascuna coltura con i coefficienti relativi, si sono ottenuti i valori di evapotraspirazione massima. Questi valori corrispondono al fabbisogno nelle condizioni in cui il processo fisiologico è massimo e saranno utilizzati ai fini del calcolo quali reali asportazioni delle colture. Tale approssimazione essendo positiva, non determinerà alcuna sottostima delle asportazioni.

4.3.3 Applicazione del bilancio idrico in forma semplificata

Prima di procedere con l'applicazione del bilancio idrico quale differenza tra asportazioni ed apporti idrici, è opportuno porre l'attenzione ancora una volta sul bilancio idroclimatico, il quale a questo punto restituisce un quadro più chiaro in merito a ciascuna delle colture esaminate. Per entrambe le specie

si conferma una domanda evapotraspirativa totale maggiore nel secondo scenario, di +9% per mais e +5% per la soia in secondo raccolto. Per quanto riguarda la piovosità nel caso del granturco è particolarmente evidente il deficit idrico confrontando le asportazioni con la piovosità cumulata (Fig.26). Nel caso invece della soia in secondo raccolto, il deficit nei due scenari tende a risultare equivalente in quanto le piogge autunnali del 2022 coincidono con il ciclo colturale, camuffando così l'effetto della siccità.

SCENARIO 1



SCENARIO 2

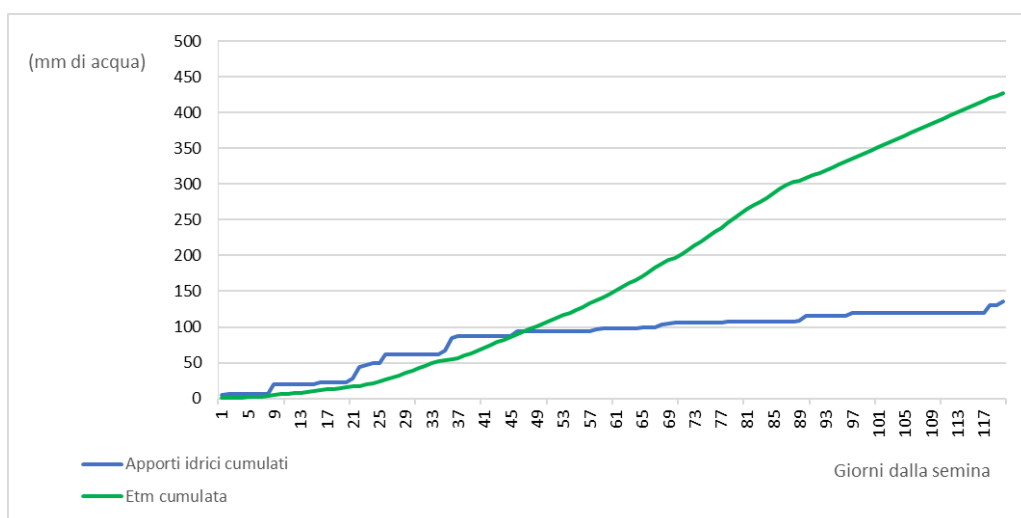


Fig.26. Andamento dei valori cumulati mensili di precipitazione ed evapotraspirazione massima, per gli anni 2016 (Scenario 1) e 2022 (Scenario 2), relativi alla coltura mais di classe 500.

L'applicazione del bilancio idrico in forma semplificata costituisce sostanzialmente un'analisi, riguardo la variazione della riserva idrica nella porzione di suolo utilizzato dalla coltura. A questo proposito è bene considerare che lo stoccaggio idrico nel terreno ha un limite dato dalla capacità che questo ha nel trattenere l'acqua all'interno della microporosità. Il quantitativo di acqua in eccesso occupa le cavità di maggiori dimensioni, i macropori, nei quali tuttavia, le forze di coesione non sono in grado di trattenerla

e viene persa per percolazione profonda. La soglia che delimita questa fase è lo stato del suolo di capacità di campo e il volume massimo di acqua stoccabile a questo punto è detta riserva utilizzabile massima (RUM). Questo rappresenta la quantità massima trattenuta stabilmente nel terreno e la formula che determina questo volume è la seguente:

$$RUM = p \times \Delta u \times 10 \times \emptyset$$

dove:

RUM = riserva utilizzabile massima (mm)

Δu = variazione percentuale dell'umidità del suolo tra stato di capacità di campo (CC) (Tab.9) e coefficiente di avvizzimento (CA) (%) (Tab.9)

\emptyset = densità apparente del terreno (t/m³) (Tab.9)

Terreno	CC (%)	CA (%)	\emptyset (t/m ³)
Sabbioso	10	4	1,6
Medio impasto	26	10	1,4
Argilloso	35	15	1,3

Tab.9. Valori relativi all'umidità (%) contenuta nei diversi stadi idrologici del suolo e della densità apparente, per ciascun tipo di terreno

Considerando quindi un suolo di medio impasto, per una profondità utile alla coltura di 50 cm e calcolando l'equazione con i valori più diffusi in bibliografia, la RUM ammonta a 112 mm. Nella fase iniziale del ciclo colturale si è tenuto conto anche di una riserva iniziale, la quale in condizioni reali rappresenta l'umidità minima necessaria alla germinazione delle sementi. Questa frazione è stata calcolata con la stessa formula della RUM, considerando però una profondità di 10 cm, unica frazione di terreno utile nel momento immediatamente successivo alla semina. Si è inoltre considerata di una riduzione di questo volume, tenendo conto che difficilmente il terreno in questa fase si presenta alla capacità di campo, e si considera perciò presente solo un 60% della RUM. Questo valore per un suolo di medio impasto ammonta a 13 mm e rappresenterà nel bilancio idrico, la disponibilità di partenza.

Date queste premesse, si è provveduto alla determinazione, mediante il bilancio idrico in forma semplificata, della variazione giornaliera della riserva utile del suolo. Partendo dal volume inizialmente presente nel terreno (RUi) si è provveduto a sommare la differenza tra apporti ed asportazioni per ogni giorno nel ciclo colturale. Quando la piovosità supera l'evapotraspirazione, si avrà un apporto idrico al suolo, mentre al contrario ci sarà un'asportazione. Al momento della raccolta il valore della riserva utilizzabile del suolo corrisponde alla differenza tra apporti ed asportazioni totali riferite a tutto il ciclo produttivo. In tutti i casi analizzati si arriva in fase finale con un deficit idrico nel suolo più o meno importante, maggiore per il 2022 (Scenario 2) su entrambe le colture (Tab.10).

Coltura	Scenario 1	Scenario 2
Mais (coltura principale)	- 49 mm	- 277 mm
Soia (secondo raccolto)	- 146 mm	- 154 mm

Tab.10. Deficit nel fabbisogno idrico colturale (mm) relativo alle colture di mais in primo raccolto, e soia in secondo raccolto, per i due scenari analizzati

4.4 Dimensionamento dell'invaso ideale

4.4.1 Caratteristiche del sistema irriguo

La determinazione del volume di adacquamento necessario e perciò del volume di stoccaggio richiesto all'invaso, al netto di ulteriori perdite, deve necessariamente tenere conto del sistema di irrigazione. Questo determina una precisa efficienza, sia a livello di trasporto della risorsa idrica dalla fonte al sistema di distribuzione, che nella distribuzione stessa. Al quantitativo strettamente necessario alla coltura devono perciò essere aggiunte tutte le perdite che si verificano durante il processo irriguo. In accordo con l'analisi agronomica si è rilevato che nella zona esaminata il sistema più diffuso è l'irrigazione mediante irrigatori semoventi a naspo. Questi sistemi sono costituiti da una tubazione in polietilene, con lunghezza variabile tra 100 e 750 m in funzione delle dimensioni dei modelli, montata su un aspo trasportabile dotato di ruote. Ad un'estremità del tubo è presente un carrello su cui è montato un irrigatore ad alta pressione (4-6 bar), con gittate comprese generalmente tra i 35 e gli 85 m. Prima di essere avviato, l'irrigatore viene svolto manualmente assieme alla tubazione lungo l'appezzamento e una volta azionato il sistema, questo riavvolgendolo permetterà l'irrigazione di una striscia di terra. Al rotolone deve necessariamente essere associato un gruppo motopompa, indipendente o accoppiato alla macchina, il quale permette di attingere l'acqua da una fonte generalmente costituita dai canali irrigui e di metterla in pressione. Sistemi di questo tipo richiedono un grande consumo energetico, tuttavia consentono a fronte di un costo di acquisto non proibitivo, un'irrigazione tempestiva ed efficiente, richieste essenziali per l'adacquamento di soccorso praticato in zona. L'efficienza irrigua ottenuta con l'uso di rotoloni varia tra il 70% e l'80% (Bortoloni, 2021), con una tendenza ad uno spostamento verso il limite superiore di questo intervallo, da parte delle nuove macchine. È possibile ottenere efficienze ben maggiori, paragonabili a quelle ottenibili con sistemi di microirrigazione, montando al posto dell'irrigatore, una barra dotata di ugelli. Questo sistema consente

di arrivare a rendimenti anche del 95-98% (Mannini, 2005). Il valore utilizzato per i calcoli seguenti, considerando l'utilizzo di macchinari con caratteristiche medie ed irrigatori convenzionali, è del 75%. Nell'analisi successiva sono stati ipotizzati degli interventi irrigui, collocati in funzione della variazione della riserva utilizzabile del suolo. Il volume utile alla coltura, distribuito con ciascuna adacquata, è stato ipotizzato convenzionalmente di 25 mm, in quanto generalmente i quantitativi distribuiti si attestano attorno ai 20-40 mm ad intervento.

Oltre a ciò, calcolando un teorico volume di adacquamento si è notato come, abbondanti piogge nella fase finale del ciclo colturale possano falsare quelle che sono le reali richieste evapotraspirative andando a compensare in parte, un volume che dovrebbe in realtà essere fornito con l'irrigazione. Ne è l'esempio il confronto, su mais nel 2016, tra il deficit della riserva utile in assenza di interventi irrigui pari a poco meno di 50 mm, e gli apporti irrigui ipotizzati, i quali, seppur simulati, prevedono l'apporto di 75 mm. Per questo motivo, di seguito si farà riferimento al valore di deficit idrologico minimo e non al deficit al momento della raccolta, in quanto in un caso reale questa carenza dovrebbe comunque essere compensata con l'irrigazione per evitare situazioni di stress idrico. Questo valore coinciderà con la data di fine ciclo, nel caso di un andamento decrescente continuo della riserva utile, mentre invece in caso di un andamento meno regolare della piovosità può verificarsi anche in altri momenti del ciclo colturale.

4.4.2 Scenario 1

Il primo scenario simula l'andamento del ciclo colturale in relazione alle condizioni meteorologiche dell'anno 2016. I valori di piovosità ed evapotraspirazione cumulati annui, indicano una situazione che rientra in quella che è la tendenza storica (1998-2022). La precipitazione annua ammonta a 908 mm, mentre i consumi in termini di evapotraspirazione potenziale sono di 885 mm. La precedente analisi del regime pluviometrico dimostra come nel 2016, questo abbia favorito maggiormente le colture primaverili ed estive rispetto al periodo tardo estivo – autunnale.

L'analisi della variazione della riserva utilizzabile del suolo, durante il ciclo colturale del mais da granella come coltura principale (Fig.27), mostra dopo 120 giorni dalla semina, un deficit idrico a livello del suolo, di soli -49 mm. Una quantità minima se osservata in relazione alla totale richiesta evapotraspirativa stagionale la quale ammonta a 391 mm. Dopo un breve periodo di stress idrico durante la prima decade di maggio, infatti, gli abbondanti eventi piovosi di maggio e giugno hanno mantenuto la coltura in buone condizioni dal punto di vista idrico, fino alla prima decade di luglio, dopo la quale la situazione di deficit è permanente in assenza di apporti artificiali. In funzione della variazione

della riserva utilizzabile del suolo si sono ipotizzati tre interventi irrigui (25 mm/intervento), collocati rispettivamente al 29 aprile (29° giorno dalla semina), all'8 e al 15 luglio (99° e 106° giorno dalla semina). Così facendo il volume di adacquamento stagionale ipotetico è di 75 mm e le condizioni di stress idrico si hanno solamente nell'ultima settimana prima della raccolta, durante la quale una carenza d'acqua non avrà alcun effetto negativo sulla produzione, se non il vantaggio di favorire il disseccamento della pianta.

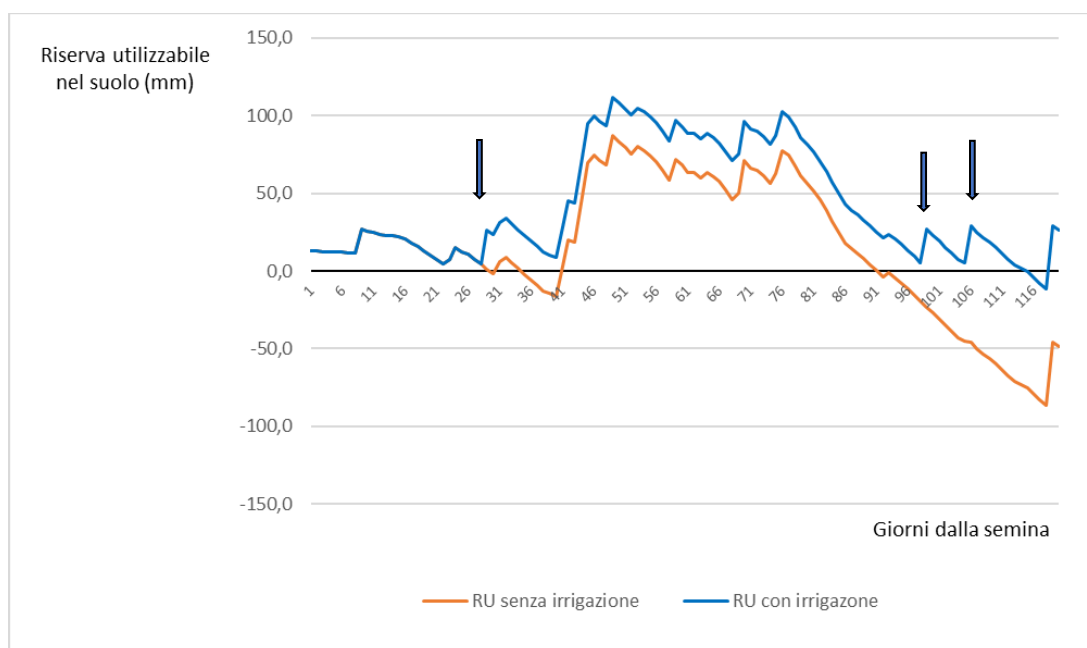


Fig.27. Andamento della riserva utilizzabile del suolo per mais da granella, relativo al periodo 01/04/2016 – 29/07/2016, rispettivamente in assenza di irrigazione e con tre interventi irrigui, con volume di adacquamento pari a 25 mm/intervento, il 29°, 99° e 106° giorno dalla semina. Le frecce indicano l'effetto delle diverse irrigazioni.

Per ciò che riguarda invece la soia (Fig.28), la scarsità di precipitazioni rilevanti nella tarda estate, associata alle elevate richieste idriche della coltura in secondo raccolto, determina un'entrata in stress idrico già al nono giorno dalla semina, il quale andrebbe a compromettere l'emergenza stessa della pianta. Questa situazione di deficit in assenza di irrigazione si protrae fino alla raccolta, dove si arriva con un fabbisogno idrico di ben -146 mm, pari a poco meno del 50% rispetto alla totale richiesta evapotraspirativa di 314 mm. In funzione della variazione della riserva utilizzabile del suolo si sono ipotizzati sette interventi irrigui, collocati rispettivamente al 29 giugno (9° giorno dalla semina), al 10, al 16 e al 23 di luglio (20°, 26° e 33° giorno dalla semina) e al 10, al 15 e al 26 di agosto (51°, 56° e 67° giorno dalla semina). Il volume di adacquamento stagionale ipotizzato è di 175 mm. Questa gestione determina condizioni di stress idrico nella prima decade di settembre, le quali vengono poi mitigate da due eventi piovosi significativi attorno alla metà del mese.

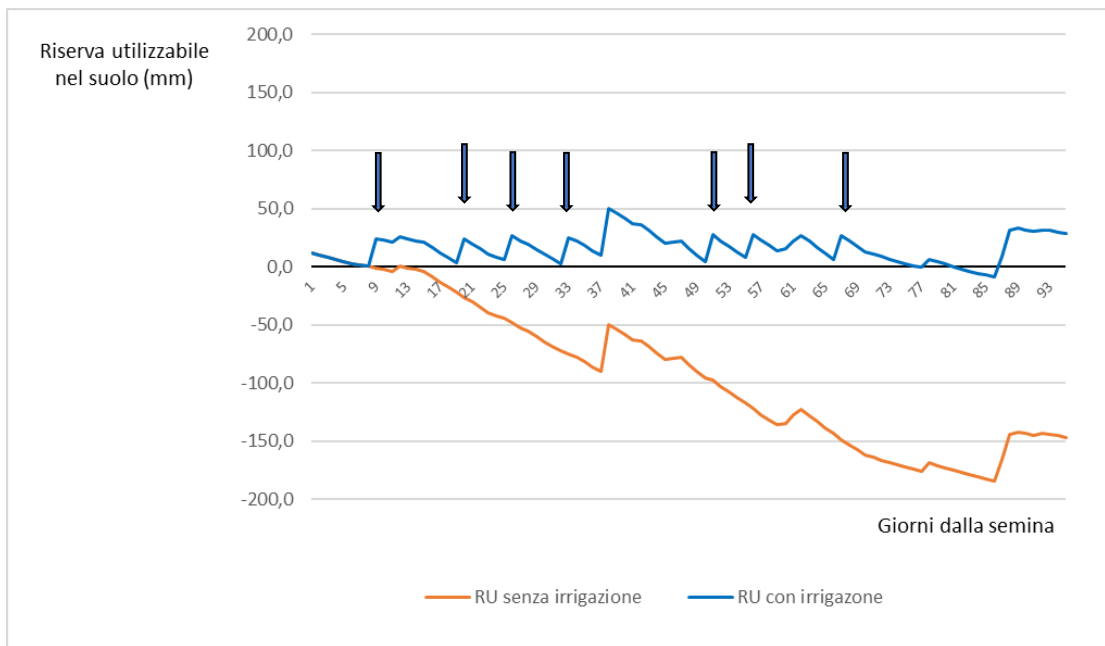


Fig.28. Andamento della riserva utilizzabile del suolo per soia, relativo al periodo 21/06/2016 – 23/09/2016, rispettivamente in assenza di irrigazione e con sette interventi irrigui, con volume di adacquamento pari a 25 mm/intervento, il 9°, 20°, 26°, 33°, 51°, 56° e 67° giorno dalla semina. Le frecce indicano l'effetto delle diverse irrigazioni.

Valutate le esigenze colturali, per le quali si considera il valore minimo raggiunto dalla riserva utile del terreno, e moltiplicate per l'efficienza dell'intero sistema irriguo, si conclude che l'irrigazione del mais nel 2016, con irrigatore semovente ad aspo, avrebbe richiesto complessivamente 1081 m³/ha di acqua per ettaro coltivato. La stessa operazione con identici mezzi, nel caso della soia necessita invece di 2298 m³/ha di acqua per ettaro coltivato. L'anno 2016 si rivela così, in termini di piovosità, favorevole al mais richiedendo un adacquamento inferiore alla media, mentre sfavorevole alla soia in secondo raccolto, per la quale buona parte del deficit deve essere compensato artificialmente.

4.4.3 Scenario 2

Il secondo scenario fa riferimento alle condizioni meteorologiche del 2022, pertanto rappresenta un'annata estremamente siccitosa. Questa situazione vuole essere il riferimento minimo raggiunto in termini di deficit idrico e quindi la situazione più grave, su cui si basa il dimensionamento dell'opera di stoccaggio. La precipitazione cumulata annua ammonta a soli 560 mm, mentre le richieste in termini di evapotraspirazione potenziale sono di ben 948 mm, per un deficit annuale di pioggia di 388 mm.

Ipotizzando una situazione analoga a quella del 2016 eccetto per i parametri meteorologici, su mais da granella come coltura principale (Fig.29), dopo 120 giorni dalla semina si ha un deficit idrico a livello del suolo di -278 mm. L'evapotraspirativa stagionale cumulata per questa coltura ammonta a 427 mm, contro i soli 149 mm di precipitazioni durante il ciclo colturale. Lo stress idrico in questo caso si manifesta il 21 giugno e si protrae fino alla data di raccolta. In funzione della variazione della riserva utilizzabile del suolo si sono ipotizzati ben 11 interventi irrigui. Occorre specificare che quest'ultima ipotesi è ben poco realistica in quanto una numerosità così elevata di irrigazioni finirebbe per rendere non conveniente la coltivazione stessa. Tuttavia, considerato lo scopo dello studio quello di stimare i volumi totali di adacquamento e non di pianificarne gli interventi, si è deciso di mantenere costante la pioggia utile nei diversi interventi irrigui, pari a 25 mm, in modo da poter confrontare le diverse situazioni analizzate. Tali interventi sono stati collocati rispettivamente al 20 e al 26 di maggio (50° e 56° giorno dalla semina), al 2, 8, 13, 18, 22 e al 26 giugno (63°, 69°, 74°, 79°, 83° e 87° giorno dalla semina) e al 5, 12 e 18 luglio (96°, 103° e 108° giorno dalla semina). Il volume totale distribuito ammonterebbe così a 275 mm, con condizioni di stress idrico solamente nei cinque giorni che precedono la raccolta, perciò ininfluenza sulle rese.

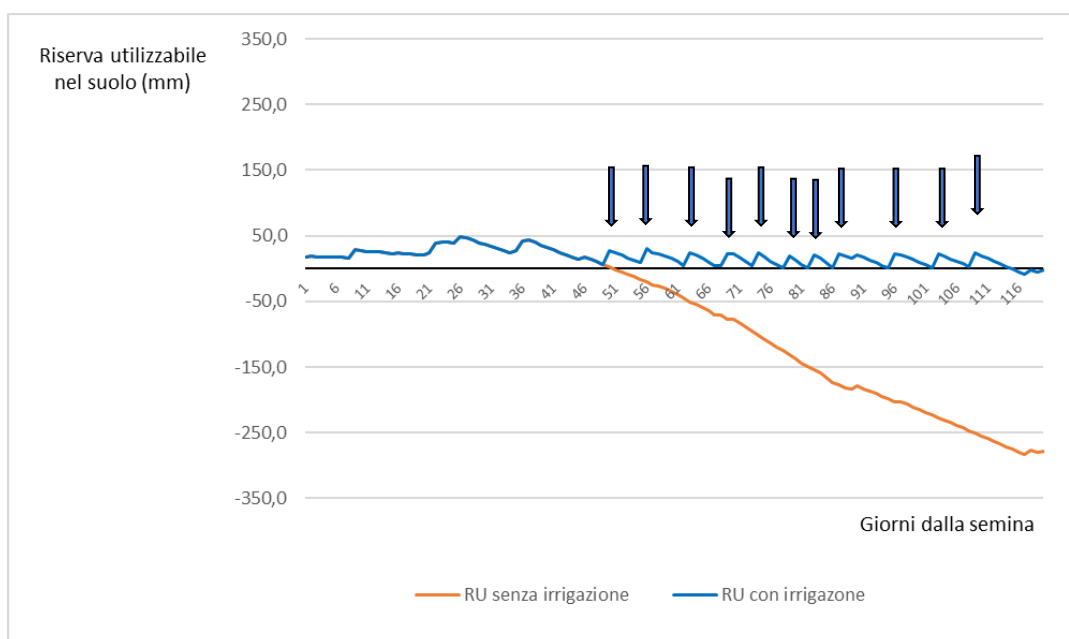


Fig.29. Andamento della riserva utilizzabile del suolo per mais da granella, relativo al periodo 01/04/2022 – 29/07/2022, rispettivamente in assenza di irrigazione e con undici interventi irrigui, con volume di adacquamento pari a 25 mm/intervento, il 50°, 56°, 63°, 69°, 74°, 79°, 83°, 87°, 96°, 103° e 108° giorno dalla semina. Le frecce indicano l'effetto delle diverse irrigazioni.

La coltivazione della soia in secondo raccolto invece (Fig.30), mostra un andamento del tutto analogo alle condizioni climatiche del 2016, almeno da un punto di vista teorico. Il deficit della riserva utilizzabile

inizia il tredicesimo giorno dalla semina (3 luglio) e si protrae fino alla raccolta, dove si avrà un valore di -154 mm. Si sono ipotizzati sette interventi irrigui, collocati rispettivamente al 3, 10, 16, 21 e 31 luglio (13°, 20°, 26°, 31° e 41° giorno dalla semina) e al 5 e al 9 di agosto (46° e 50° giorno dalla semina). Il volume distribuito ammonterebbe in questo caso a 175 mm con condizioni di lieve deficit che permangono a metà settembre per pochi giorni.

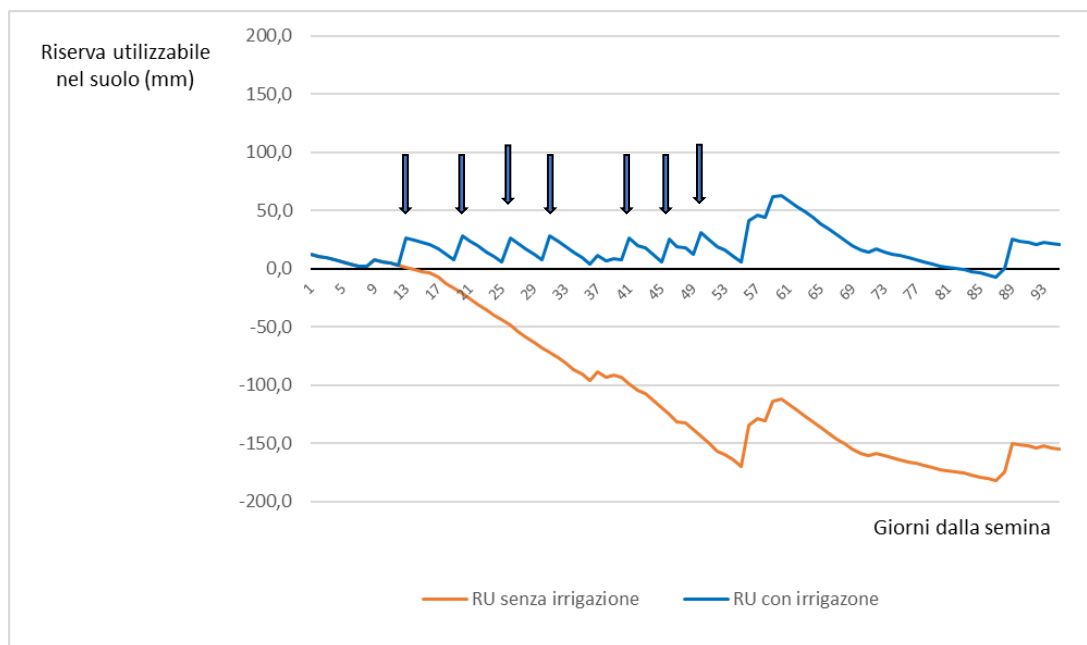


Fig.30. Andamento della riserva utilizzabile del suolo per soia, relativo al periodo 21/06/2022 – 23/09/2022, rispettivamente in assenza di irrigazione e con sette interventi irrigui, con volume di adattamento pari a 25 mm/intervento, il 13°, 20°, 26°, 31°, 41°, 46° e 50° giorno dalla semina. Le frecce indicano l'effetto delle diverse irrigazioni.

Valutate le esigenze colturali, per le quali si considera il valore minimo raggiunto dalla riserva utile del terreno, e moltiplicate per l'efficienza dell'intero sistema irriguo, si conclude che l'irrigazione del mais nel 2022, con irrigatore semovente ad aspo, avrebbe richiesto complessivamente 3549 m³/ha di acqua per ettaro coltivato. La stessa operazione con identici mezzi, nel caso della soia necessita di 2275 m³/ha di acqua per ettaro coltivato. Come evidenziato dalla precedente analisi climatica, la similitudine tra le condizioni meteorologiche autunnali in entrambi i casi mediamente siccitose, fanno sì che la soia presenti una richiesta del tutto analoga al 2016 (2298 m³/ha), mentre mais mostra un fabbisogno più che triplicato.

4.4.4 Determinazione del volume da invasare

Facendo ora riferimento alle reali dimensioni aziendali ipotizzate, sulla base dei volumi richiesti per ettaro dalle due colture, nei due scenari analizzati (Tab.11), si è provveduto quindi al dimensionamento degli stoccaggi. Supponendo quattro appezzamenti distinti, della superficie di 3,5 ha ciascuno e distanti tra loro, si suppone la costruzione di quattro invasi. A questo scopo si vuole ipotizzare una superficie indicativa, la quale dovrà essere destinata ad ospitare i bacini. Si considera perciò la realizzazione di invasi a sezione rettangolare, con forma quadrata e profondità utile (invasabile) pari a 3 m. La superficie di ciascun invaso sarà perciò pari al volume fratto la profondità.

	Volume irriguo stimato (m ³ /ha)	
	Mais	Soia
2016 (Scenario 1)	1081	2298
2022 (Scenario 2)	3549	2275

Tab.11. Volumi irrigui per ettaro, stimati nei due scenari, per le due colture, mais e soia in secondo raccolto

Dati i valori ottenuti (Tab.11) relativi ai volumi per ettaro si suppone di voler disporre di sufficiente risorsa idrica per poter coprire tutti i fabbisogni colturali anche nella peggiore delle situazioni dal punto di vista pluviometrico. Per questo motivo, ipotizzando una rotazione delle colture tra gli appezzamenti, ciascuno di essi deve disporre di un invaso dimensionato in funzione delle richieste idriche del mais in condizioni di siccità, analoghe al 2022. Si considera perciò un fabbisogno complessivo (colturale ed irriguo) di circa 3500 m³/ha. In questo modo, per servire una superficie di 3,5 ha ciascun invaso dovrà contenere 12.250 m³ di risorsa idrica. Questa, in funzione della profondità definita precedentemente ogni stoccaggio occupa una superficie minima di 4.083 m², con una dimensione di 64 m x 64 m.

5. CRITICITÀ E VANTAGGI DELLO STOCCAGGIO IDRICO TRAMITE INVASI AZIENDALI

5.1 Convenienza economica

Da un punto di vista pratico, ciò che determina l'introduzione di una qualsiasi innovazione in un determinato settore, la quale richieda un investimento iniziale, è la convenienza economica. Così anche per gli invasi artificiali, una loro utilità da un punto di vista economico intesa come riduzione delle perdite piuttosto che dei costi produttivi dell'azienda, deve necessariamente essere superiore alle spese associate alla loro realizzazione e gestione. Questo aspetto è però un fattore variabile in funzione del contesto in cui sorge l'opera, dove a seconda delle necessità essa avrà un'utilità più o meno elevata in termini monetari e dove l'investimento ad essa associato può essere influenzato dalla stessa disponibilità economica della società piuttosto che da misure politiche di sostegno. Per questo motivo i pochi studi che valutano in maniera esaustiva la convenienza economica legata alla diffusione dei bacini artificiali ad uso irriguo, hanno scarsa utilità se estrapolati dal contesto originario. Perciò, il vantaggio di tali strumenti di stoccaggio idrico in un determinato scenario può non essere sufficiente per giustificare l'applicazione in un'altra situazione.

Valutare l'utilità economica degli invasi artificiali ad uso agricolo non è l'obiettivo primario del presente lavoro, in quanto tale aspetto richiederebbe uno studio indipendente e multidisciplinare in grado di considerare tutti gli ambiti di influenza dell'impatto dell'opera e di quantificarli economicamente. Di seguito ci si limiterà solamente ad un'analisi dei costi e dei benefici principali di un bacino, per poi analizzare le potenziali misure di riduzione dell'onere economico piuttosto che di ottimizzarne l'utilità.

La realizzazione di un invaso di competenza aziendale, non è un investimento da poco, tuttavia le analisi in questi termini, per il nord Italia, sono poche. Il modello di calcolo della spesa iniziale, utilizzato di seguito fa riferimento al "Quadro conoscitivo sui bacini in cui invasare la risorsa idrica, ad uso irriguo ed ecosistemico" (DGR n.178-2023), un documento tecnico redatto dalla Regione Veneto il quale ha come finalità, quella di porre le basi ad una diffusione degli invasi sul territorio regionale. Per ogni forma di bacino, l'analisi determina i costi d'investimento, esclusi quelli di acquisizione delle aree o le perdite produttive associate ad esse. Di seguito si sono perciò utilizzati gli stessi costi unitari per le singole operazioni, riferiti ai prezziari regionali del Veneto, ed applicati alle dimensioni stimate per l'azienda presa in esame precedentemente. A livello generale il costo di un'opera di questo genere è

proporzionale, in primo luogo, alle dimensioni della stessa. Infatti, maggiore è il volume dell'invaso e minore è il suo costo, in quanto alcune voci andranno ad incidere in maniera minore sul totale. Il secondo fattore fondamentale nella valutazione dell'investimento di realizzazione è la modalità costruttiva del bacino. Un vaso completamente interrato avrà un costo superiore ad una struttura parzialmente interrata, che a sua volta sarà maggiore rispetto ad una totalmente fuori terra. Questo è dovuto alla grande incidenza sul totale della spesa, dei costi di sbancamento, maggiori rispetto a quelli richiesti per la realizzazione di arginature. Da un punto di vista strutturale, inoltre, contribuiscono ad aumentare l'importo richiesto anche le componenti "aggiuntive", spesso necessarie, come l'impermeabilizzazione, le opere di alimentazione e scarico, sistemi di sollevamento e pompaggio, ... Per gli invasi agricoli compresi tra i 30.000 e i 50.000 m³, l'analisi tecnica del DGR n.178-2023, indica un prezzo compreso tra i 24 e i 14 €/m³ variabile in funzione dei parametri sopra descritti. Considerando ora il volume stimato in fase di dimensionamento nel capitolo precedente per un'azienda ipotetica, pari a 12.250 m³ e ipotizzando la realizzazione di invasi impermeabilizzati e parzialmente interrati, il costo di investimento per ognuno dei quattro bacini necessari, ammonta a 207.900 €/invaso (Tab.12). Una spesa che, se riferita alla superficie servita, è pari a 59.400 €/ha, mentre rispetto ai volumi stoccati è di 16,97 €/m³, in linea con le stime regionali. A questo costo deve essere aggiunto in caso di acquisto dell'area su cui l'invaso è edificato, il valore della stessa.

Categoria	Costo unitario	Unità	Importo (€)	Incidenza su costo
Bacino d'invaso	10 €/m ³	9.300 m ³	93.000	44,75%
Arginature	15 €/m ³	1.900 m ³	28.500	13,70%
Impermeabilizzazione sponde	25 €/m ²	2.300 m ²	57.500	27,65%
Opere di alimentazione e scarico	500 €/l/s	20 l/s	10.000	4,81%
Spese tecniche	10 %	189.000	18.900	9,09%
COSTO D'INVESTIMENTO			207.900	100%

Tab.12. Stima del costo d'investimento per la realizzazione di un vaso aziendale parzialmente interrato, con fondo impermeabilizzato, del volume massimo invasabile di 12.250 m³ (Dati: DGR n.178-2023)

Considerando che i valori utilizzati, sia in fase di stima dei fabbisogni colturali, sia durante il calcolo del volume di stoccaggio, sono relativi a situazioni estreme e che perciò il volume richiesto in una situazione reale per l'irrigazione sia una quantità inferiore a quella determinata, anche il costo individuato con questa analisi, può essere inteso come una soglia massima sotto cui rientrano tutte le opere in qualche misura inferiori a quella ipotizzata.

Un'ulteriore voce di spesa, la quale è tuttavia di difficile valutazione, riguarda la richiesta in termini di

gestione e manutenzione. Strutture di questa semplicità, necessitano di tempi relativamente ridotti per queste operazioni, le quali interessano principalmente il riempimento e svuotamento dell'invaso e la pulizia, operazione necessaria periodicamente e che può coincidere con la fase di scarico. Quest'ultima è necessaria in quanto la presenza di acqua stagnante per un lungo periodo dell'anno, associata alla radiazione luminosa favorisce inevitabilmente la proliferazione di alghe. Oltre a ciò, l'accumulo di depositi solidi sul fondale riduce, con il passare del tempo, il volume utile per lo stoccaggio oltre creare problemi di ostruzione nei sistemi di distribuzione dell'acqua.

Contrapposti ai principali costi associati ai bacini irrigui, vi sono una serie di benefici spesso differenti in funzione delle aree geografiche analizzate, in quanto dipendenti da fattori climatici, sociali ed economici. Talvolta i vantaggi forniti dalle opere di stoccaggio sono difficilmente quantificabili da un punto di vista economico e per questo si può correre il rischio di sottostimarne l'utilità. Da un punto di vista agronomico i principali benefici forniti da un invaso artificiale sono associati ad una maggiore disponibilità idrica, nel caso in cui gli apporti da altre fonti siano scarsi a causa della siccità, che si traduce in un minore stress idrico e inferiori perdite di resa. Tuttavia anche in annate in cui l'acqua non è un fattore limitante, un invaso fornisce notevoli vantaggi anche da un punto di vista operativo, rappresentando una fonte immediata di risorsa idrica, indipendentemente dalle tempistiche e dai vincoli imposti dalla rete consortile di adduzione. A questo si aggiunge un notevole risparmio idrico dovuto ad una riduzione delle perdite tipicamente associate alla rete di adduzione con canali, la quale con la realizzazione di un invaso verrebbe sostituita da tubazioni interrato. Questo aspetto nel caso della pianura padana non rappresenta, tuttavia, un fattore di risparmio in termini monetari. Il prezzo associato all'acqua irrigua, infatti, è costituito da un contributo di irrigazione riferito alla superficie asservita, per questo indipendente dai volumi erogati. Anche supponendo un totale svincolo dal sistema consortile il risparmio sarebbe minimo considerando che il valore di questo onere, nella maggior parte dei casi va dai 25 ai 35 €/ha (Consorzio di Bonifica Bacchiglione, 2023).

La costruzione di invasi ad uso plurimo è certamente un fattore determinante nel massimizzare l'efficienza di queste strutture e quindi ripartire i costi su più campi di applicazione. Per quanto riguarda i bacini agricoli in particolare, una loro potenziale utilità potrebbe riguardare la laminazione delle piene in caso di forti ondate di maltempo. In questo caso il riempimento degli invasi in un'ampia zona permetterebbe di ridurre notevolmente il carico sui grandi corsi d'acqua ed evitare esondazioni specie nelle zone maggiormente a rischio. Da un punto di vista produttivo, la superficie degli invasi rappresenta un'opportunità anche per la produzione energetica attraverso il posizionamento di pannelli solari galleggianti. In questo caso, nonostante un maggiore investimento iniziale, sarà possibile disporre di un ricavo annuale derivante dalla superficie destinata alla costruzione del bacino, il quale permetterà un più rapido ammortizzamento dei costi di investimento iniziali.

Analizzando l'aspetto economico, non dal punto di vista della singola opera di stoccaggio, ma su scala

consortile o comiziale, e considerando una già presente e consolidata gestione comune dell'acqua irrigua, lo sfruttamento di economie di scala potrebbe in molti casi portare ad una riduzione dei costi. Il processo può essere inteso sia come la costruzione di opere di dimensioni maggiori e perciò ad uso pubblico, oppure come la creazione di una rete interconnessa di bacini minori. In entrambi i casi questo consente una distribuzione equa dei costi iniziali, nonché una maggiore possibilità di investimento da parte di enti specializzati, rispetto alla singola azienda agricola.

5.2 Applicabilità su larga scala

Il crescente interesse nei confronti dello stoccaggio idrico come misura di mitigazione nei periodi siccitosi mette in evidenza la necessità di una pianificazione ben più complessa rispetto al solo punto di vista aziendale. Regioni come il Veneto hanno già predisposto strumenti normativi tecnici ed economici volti a finanziare la realizzazione di opere di invaso della risorsa idrica. Questo sottolinea l'importanza di una gestione a livello consortile o regionale oltre che aziendale, di tali strumenti in quanto il loro utilizzo deve essere messo in relazione all'intero sistema idrografico territoriale. In questo modo ciascun intervento potrà essere calibrato in funzione delle esigenze dell'area servita. È possibile affermare perciò, che una diffusione su ampia scala degli invasi, diventerebbe non solo un'opportunità, ma anche una necessità, per un'ottimizzazione delle loro funzionalità. A questo scopo basti pensare al ruolo che i bacini potrebbero avere nella laminazione delle piene. In questo caso l'entrata in campo degli invasi deve necessariamente sottostare ad una decisione comune a livello territoriale, nonché al coordinamento degli organi di protezione civile e delle autorità di bonifica, i quali individueranno i tempi e le modalità di utilizzo. In seguito alla presenza diffusa di invasi sul territorio anche le operazioni di riempimento degli stessi devono sottostare ad una direzione generale in modo che questa operazione gravi il meno possibile sugli stessi corpi idrici, nonché sulle strutture consortili. Considerando che un invaso agricolo debba contenere una quantità di acqua pari alle richieste idriche delle colture per tutto il ciclo produttivo, o a buona parte di esso, l'operazione di invasamento della stessa diventa perciò una fase critica se non gestita correttamente. Prendendo ad esempio le strutture ipotetiche dimensionate precedentemente, il riempimento di uno degli invasi, contando un'alimentazione a gravità con portata di 20 l/s, impiega circa 170 ore, pari a 7 giorni.

Una pianificazione su scala territoriale più ampia permette inoltre vantaggi economici, tra cui l'accesso a fondi pubblici. Infatti, la visione di un'utilità pubblica connessa allo stoccaggio idrico quale ad esempio

la protezione civile piuttosto che funzioni ecologiche può ampliare il ventaglio di opportunità di finanziamento in più campi di spesa.

Il “Quadro conoscitivo sui bacini in cui invasare la risorsa idrica, ad uso irriguo ed ecosistemico” della Regione Veneto (DGR n.178-2023), quantifica i volumi e di conseguenza le risorse, necessari alla realizzazione di invasi di vario genere, per ciascun distretto irriguo. Tutto ciò in funzione di un’analisi dei fabbisogni stimati rispettivamente, per un’annata ordinaria, per un’annata siccitosa dal punto di vista del deficit pluviometrico, ma con buona disponibilità idrica da parte delle fonti di approvvigionamento e infine per un’annata caratterizzata sia da siccità agronomica che idrologica, ipotizzando una riduzione del 40% degli apporti dalle fonti convenzionali (fiumi). Le opere analizzate riguardano in primo luogo una serie di proposte progettuali, di cui una parte già approvate, relative alla realizzazione di 90 bacini di competenza consortile su tutto il territorio regionale, per un volume stagionale potenzialmente invasabile pari a 842 milioni di metri cubi. Per ciascuno scenario il documento tecnico individua il grado di soddisfacimento del deficit idrico operato dalla costruzione di questi invasi, in ciascun distretto irriguo, mettendo così in evidenza le aree più vulnerabili (Fig.31).

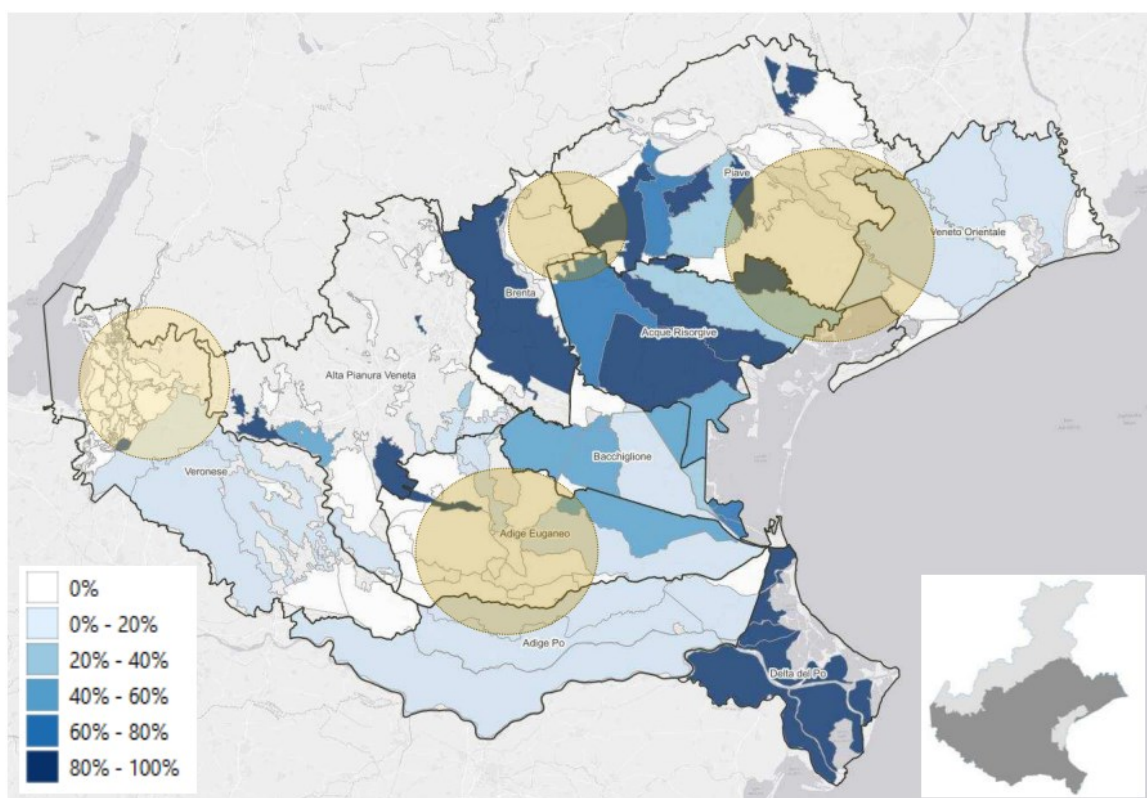


Fig.31. Grado di soddisfacimento del deficit idrico nei diversi distretti irrigui della pianura veneta, garantito dagli invasi proposti. Le aree cerchiato evidenziano i principali territori che non risulterebbero avvantaggiati dalla realizzazione dei progetti, nel peggiore degli scenari.

(figura presa da DGR n.178-2023)

Sulla base di questa analisi sono stati poi stimati dei volumi di invaso necessari per soddisfare in maniera integrale il deficit idrico residuo, attraverso la realizzazione ipotetica di bacini comiziali, interaziendali e aziendali. Nel peggiore dei casi analizzati si renderebbero necessari 6.557 invasi, per un volume stagionale potenzialmente invasabile di 1.974 milioni di metri cubi. Il costo di investimento stimato ammonta a circa 12.252 milioni di euro, mentre la superficie investita per la loro realizzazione sarebbe pari a circa 30.000 ha (DGR n.178-2023).

5.3 Impatto ambientale

Analizzando da un punto di vista ambientale, un diffuso ricorso agli invasi agricoli per lo stoccaggio dell'acqua irrigua, le opinioni della comunità scientifica sono discordanti in merito. Infatti, se da un lato questi strumenti sembrano fornire dei benefici anche in questi termini, per altri aspetti si dimostrano una criticità. Il processo di raccolta e accumulo dell'acqua in grande quantità, diffuso su un'ampia area territoriale, indubbiamente comporta cambiamenti a livello ambientale ed ecosistemico; tuttavia, non è detto che questi siano sempre nocivi agli equilibri preesistenti. Esistono diverse forme di impatto ambientale che la costruzione di una rete di bacini può manifestare, e diversi livelli che questo può assumere. È bene pertanto scomporre il problema nelle sue componenti elementari per un'analisi più corretta ed oggettiva.

Da un punto di vista idrologico il ricorso agli invasi per l'irrigazione consente di ridurre la pressione esercitata dalla domanda di acqua agricola sui corpi idrici sia superficiali, che soprattutto sotterranei quali le falde. A questo proposito, in funzione dell'assetto strutturale scelto per la loro costruzione, quali la posizione e la mancanza di impermeabilizzazione delle sponde, è possibile che questi rivestano anche un ruolo di ricarica di questi importanti serbatoi presenti nel sottosuolo. In ogni caso un utilizzo diffuso dei bacini determina una maggiore richiesta idrica in determinati momenti dell'anno, nei quali sarà necessario riempire gli stoccaggi. Per contro questo, come detto, permetterà poi di ridurre notevolmente i prelievi dai fiumi in un momento in cui la loro portata sarebbe già scarsa in assenza di alcuna asportazione. Quindi, nonostante la previsione di un incremento stagionale dei prelievi, si può ipotizzare che con un'attenta pianificazione degli interventi di invaso, questo non rappresenti un problema per i livelli idrometrici. Il ricorso allo stoccaggio idrico determina anche un maggiore trattenimento dell'acqua atmosferica, che consentirà di aumentare la percentuale nazionale dell'11%, stimata da Coldiretti. Questo, tuttavia, si traduce anche in un rallentamento del deflusso verso il mare, il quale favorisce inevitabilmente le perdite per evaporazione.

Considerando invece l'impatto ecologico degli invasi, è necessario sottolineare come questi non rappresentino strutture appositamente realizzate per assolvere a funzioni di conservazione ecosistemica specifiche, come invece nel caso delle aree umide. Gli invasi agricoli nella maggior parte dei casi sono opere con un elevato grado di semplicità dal punto di vista biologico. Il rivestimento interno infatti impedisce qualsiasi interazione col suolo, compresa la crescita di organismi vegetali ad eccezione delle alghe, così come gli argini, i quali per una questione strutturale, vengono mantenuti spogli da eventuali forme di vegetazione. Queste caratteristiche, dettate da inevitabili necessità operative legate alla funzione per la quale sono stati realizzati, riducono indubbiamente il loro ruolo di nicchie ecologiche che potrebbero rivestire altrimenti. Nonostante ciò, la presenza costante di acqua sul territorio rimane comunque un fattore positivo soprattutto per le diverse specie di avifauna che nelle stagioni più secche faticano a trovare fonti idriche. Oltre a questo la garanzia di un'irrigazione continua anche nei momenti di elevata siccità, permette di preservare i delicati equilibri del suolo agrario legati alla presenza di pedo fauna e alla trasformazione della sostanza organica. Dal punto di vista dei corsi d'acqua, la presenza degli invasi permetterà una maggiore disponibilità idrica e di conseguenza anche l'impatto della siccità sugli ecosistemi fluviali sarà inferiore. Si deve infatti sottolineare che l'effetto di un grave evento siccitoso sulle zone ripariali, sulla stabilità delle rive e sulla fauna ittica sarebbe in ogni caso molto più dannoso rispetto a quello che potrebbe creare una rete di stoccaggi irrigui.

CONCLUSIONI

L'analisi proposta nel presente lavoro vuole essere una dimostrazione di quanto gli invasi artificiali ed in particolar modo i bacini aziendali possano rappresentare un efficace strumento di contrasto alla siccità agronomica. La situazione meteorologica del 2022 ha evidenziato le diverse debolezze del settore agricolo del nord Italia. Questo ha messo in luce un sistema estremamente vulnerabile ai cambiamenti, in quanto abituato ad una situazione climatica costante e molto favorevole alle colture agrarie. L'improvvisa assenza di queste certezze, rappresentata in particolare dalla mancanza dell'acqua, quale risorsa essenziale per le produzioni vegetali, richiede la messa in campo di strumenti e conoscenze volti a massimizzarne l'efficacia e quando possibile ad aumentarne la disponibilità. Analizzando le cause che hanno portato ad una carenza idrica di tale intensità e dannosità in particolare per il settore agricolo, si è dimostrata l'importanza dello stoccaggio dell'acqua al fine di non gravare sulle fonti di approvvigionamento già fortemente compromesse in questi casi, e soprattutto, per disporre di una riserva sicura in caso di bisogno. Si è eseguito il dimensionamento di un invaso aziendale ideale, eseguito sulla base dei fabbisogni colturali stimati per due diverse annate a confronto, da un lato con condizioni meteorologiche nella norma e dall'altro con una situazione di estrema siccità. Questo ha permesso di avere un'indicazione, seppur teorica degli elevati volumi richiesti i quali in annate analoghe al 2022 tendono a crescere ulteriormente, a causa di richieste evapotraspirative maggiori dovute proprio all'anomala situazione climatica. Per queste ragioni, analogamente a quanto sta accadendo nel resto del mondo, il ricorso ad invasi aziendali dell'approvvigionamento irriguo, diverrà anche in nord Italia una realtà sempre più diffusa. A questo proposito si rivelerà fondamentale l'attività del sito sperimentale di Fossò, il quale entrerà in funzione nella primavera del 2024 e potrà approfondire le diverse problematiche legate alla gestione degli invasi. La stima eseguita in relazione ai bacini pilota di quest'area, ha evidenziato come sia di fondamentale importanza tenere in considerazione anche il fenomeno dell'evaporazione superficiale, fonte di perdite non indifferenti. In questo caso la ricerca scientifica ed il progresso tecnologico mettono a disposizione svariati strumenti in grado di minimizzare queste asportazioni, la cui scelta dovrà essere valutata in funzione di considerazioni economiche, tecniche ed ecologiche.

L'incessante effetto della mutevole situazione climatica sta imponendo alla nostra società dei grandi cambiamenti. Quello agricolo si rivela essere, in questo contesto, uno dei settori principalmente interessati da tali conseguenze. Per questo motivo la sopravvivenza delle diverse produzioni, spesso legate proprio a particolari condizioni climatiche di carattere locale, dipenderà esclusivamente dalla capacità adattamento degli stessi operatori e della comunità scientifica.

BIBLIOGRAFIA

- 2023. Deliberazione della Giunta Regionale 24/02/2023 n.178. Allegato A. Quadro conoscitivo sui bacini in cui invasare la risorsa idrica, ad uso irriguo ed ecosistemico. Bollettino Ufficiale della Regione Veneto n.28, 28 febbraio
- Afreen M. 2023. Agricultural Production and Food Security in Climate Change Process of Europe. Eurasian Journal of Agricultural Research (7): 44-50
- Alam S. & AlShaikh A.A. 2013. Use of palm fronds as shaded cover for evaporation reduction to improve water storage efficiency, Journal of King Saud University – Engineering Sciences (25): 55-58
- Aminzadeh M., Lehmann P. e Or D. 2018. Evaporation suppression and energy balance of water reservoirs covered with self-assembling floating elements. Hydrology and Earth System Sciences (22): 4015-4032
- ARPA Piemonte. 2022. Rapporto siccità in Piemonte 2022
- ARPA Veneto. 2022a. Clima e cambiamenti climatici in Veneto
- ARPA Veneto. 2022b. Rapporto sulla risorsa idrica in Veneto al 30 settembre 2022
- ARPA Veneto. 2022c. Rapporto sulla risorsa idrica in Veneto al 31 gennaio 2022
- ARPA Veneto. 2022d. Rapporto sulla risorsa idrica in Veneto al 31 marzo 2022
- ARPA Veneto. 2022e. Rapporto sulla risorsa idrica in Veneto al 31 luglio 2022
- ARPA Veneto. 2022f. Rapporto sulla risorsa idrica in Veneto al 31 dicembre 2022
- Assouline S., Russo D., Silber A. e Or D. 2015. Balancing water scarcity and quality for sustainable irrigated agriculture. Water Resources Research 51: 3419-3436
- AWTT, 2023, <https://www.awtti.com/>
- Barbi A., Checchetto F., Delillo I. e Padoan M. 2022. Andamento Agrometeorologico annata 2022 (da dicembre 2021 a novembre 2022), ARPA Veneto, Dipartimento Regionale per la Sicurezza del Territorio, Servizio Centro Meteorologico
- Bonaldo D., Bellafiore D, Ferrarin C., Ferretti R., Ricchi A., Sangelantoni L. e Vitelletti M.L. 2023. The summer 2022 drought in the Po valley (Italy): a glimpse of the future climate?, EGU General assembly
- Bortolini L. 2021. Tecniche e impianti per l'irrigazione. Coop Libreria Editrice Università di Padova
- Cammalleri C., Naumann G., Mentaschi L., Formetta G., Forzieri G., Gosling S., Bisselink B., De Roo A. e Feyen L. 2020. Global warming and drought impacts in the EU, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Caretta M.A., Mukherji A., Arfanuzzaman M., Betts R.A., Gelfan A., Hirabayashi Y., Lissner T.K., Liu J., Lopez Gunn E., Morgan R., Mwanga S., e Supratid S., 2022. Water. In: Climate Change 2022: Impacts,

Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ed Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A. e Rama B. 551–712. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

- Carvajal F., Agüera F. e Sánchez-Hermosilla J. 2014. Water balance in artificial on-farm agricultural water reservoirs for the irrigation of intensive greenhouse crops, *Agricultural Water Management* (131): 146-155
- Chaudhari N. e Chaudhari N.D. 2015. Use of thermocol sheet as floating cover to reduce evaporation loss in farm pond. *Hydro 2015 International: 20th International Conference on Hydraulics Water Resources and River Engineering*.
https://www.researchgate.net/publication/288003519_Use_of_thermocool_sheet_as_floating_cover_to_reduce_evaporation_loss_in_farm_pond
- Coldiretti. 2023. <https://www.coldiretti.it/>
- Consorzio di Bonifica Bacchiglione. 2010. Piano di classifica degli immobili ricadenti nel territorio consortile
- Dragoni W e Valigi D., 2015. Foglio di calcolo Excel per la stima dell'evaporazione da evaporimetro e da Lago con equazione Dragoni & Valigi (1994), *Research Gate*
- Dragoni W. E Valigi D. 1994. Contributo alla stima dell'evaporazione dalle superfici liquide nell'Italia Centrale, *Geologica Romana*, 30: 151-158
- EDORA, 2023, <https://edo.jrc.ec.europa.eu/edora/php/newsletter.php?id=1>
- El Idrissi I.S., Kettani R., Ferrahi M., Nabloussi A., Ziri R. e Brhadda N. 2023. Water stress effect on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) advanced lines at flowering stage under controlled conditions. *Journal of Agriculture and Food Research* (14)
- European Drought Observatory (EDO). 2023.
<https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000>
- East Gippsland Water, 2023, <https://www.egwater.vic.gov.au/>
- Finch J.W. e Hall R.L. 2001. Estimation of Open Water Evaporation. Bristol (UK). Environment Agency.
- Fleming-Muñoz D.A., Whitten S. e Bonnett G.D. 2023. The economics of drought: A review of impacts and costs. *Agricultural and Resource Economics* (00): 1-23
- Global Drought Observatory (GDO). 2023.
<https://edo.jrc.ec.europa.eu/gdo/php/index.php?id=2000>
- Gozávez J.J.F., Gisbert P.S.F., Gisbert C.M.F., Santafè M.R., Romero F.J.S.F., Soler J.B.T. e Puig E.P. 2012. Covering reservoirs with a system of floating solar panels: technical and financial analysis. 16th International Congress on Project Engineering
- Haghghi E., Madani K. e Hoekstra A.Y. 2018. The water footprint of water conservation with shadeballs in California. *Natura Sustainability* 1 (7): 358-360

- Herrera-Lormendez P., Douville H. e Matchullat J. 2023. European Summer Synoptic Circulations and Their Observed 2022 and Projected Influence on Hot Extremes and Dry Spells, Geophysical Research Letters (50)
- Il Punto Coldiretti. 2023. <https://www.ilpuncocoldiretti.it/>
- Kose M. e Kongas K. 2023. Impact of climate change on water resources in South Sudan. Eurasian Journal of Agricultural Research (7): 29-36
- Kumar S.P. 2018. Can thermocol prevent water evaporation?
<https://spraveenkumar.wixsite.com/spraveenkumar/post/can-thermocool-prevent-water-evaporation>
<https://spraveenkumar.wixsite.com/spraveenkumar/post/can-thermocool-prevent-water-evaporation>
- Kuwayama Y., Thompson A., Bernkopf R., Zaitchik B. e Vail P. 2018. Estimating the Impact of Drought on Agriculture Using the U.S. Drought Monitor. American Journal of Agricultural Economics 101 (1): 193-210
- Levantesi S. 2022. L'Italia deve prepararsi a un futuro di siccità cronica, nature italy, <https://www.nature.com/articles/d43978-022-00090-5>
- Mannini P. 2005. Qual è l'efficienza irrigua dei moderni "rotoloni"?, Agricoltura (maggio 2005): 102-103
- Magdadgar S., AghaKouchak A., Farahmand A. e Davis S.J. 2017. Probabilistic estimates of drought impacts on agricultural production. Geophysical Research Letters 44: 7799-7807
- Mahalle Y.R. & Adhau G.W. 2014. Study of evaporation and seepage losses from farm pond in saline area, International Journal of Agricultural Engineering (7): 402-409
- Massariolo A., 2023, La crisi dell'acqua: quanti sono gli invasi in Italia, Il Bo Live
- Mukherjee S., Mishra A. e Trenberth K.E. 2018. Climate Change and Drought: a Perspective on Drought Indices. Current Climate Change Reports (4): 145-163
- Nazioni Unite. 2021. Rapporto mondiale delle Nazioni Unite sullo sviluppo delle risorse idriche 2021: Il valore dell'acqua, UNESCO, Parigi
- Osservatorio Siccità. 2023. <https://droughtcentral.it/siccita/>
- Oweis T. e Hachum A. 2009. Water Harvesting for Improved Rainfed Agriculture in the Dry Environments, ed S.P. Wani, 164-181, CAB International
- Panziera A. 2007. Progetto Di Ristrutturazione E Potenziamento Del Sistema Irriguo Del Consorzio Fiume Lombricese. Relatori Ing.ri Milano V. e Venutelli M., Facoltà di Ingegneria , Università di Pisa, Pisa
- Pradhan R.& Sahoo J. 2019. Smart Rainwater Management: New Tecnologies and Innovation
- Rainews. 2023. <https://www.rainews.it/speciali/risonorditaliasiccita>

- Rete Rurale Nazionale, 2023, <https://www.reterurale.it/flex/cm/pages/ServeBLOB.php/L/IT/IDPagina/23559>
- Rossi L., Naumann G., Gabellani S. e Cammalleri C. 2023. A combined index to characterize agricultural drought in Italy at municipality scale, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 47 (2023). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581823000915?via%3Dihub>
- Sapakhova Z., Raissova N., Daurov D., Zhapar K., Daurova A., Zhigailov A., Zhambakin K. e Shamekova M. 2023. Sweet Potato as a Key Crop for Food Security under the Conditions of Global Climate Change: A Review. *Plants* (12) 2516. <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/13/2516>
- SNPA. 2023. Il clima in Italia nel 2022, Report 36/2023
- Straffelini E. e Tarolli P. 2023. Climate change-induced aridity is affecting agriculture in Northeast Italy, *Agricultural Systems* 208, 103647. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X23000525>
- Taglioli G. 2021. Rotoloni: come variano i costi in base alle regolazioni, *L'informatore agrario*, <https://www.informatoreagrario.it/meccanica/rotoloni-come-variano-i-costi-in-base-alle-regolazioni/>
- Toreti A., Bavera D., Acosta Navarro J., Cammalleri C., de Jager A., Di Ciollo C., Hrast Essenfelder A., Maetens W., Magni D., Masante D., Mazzeschi M., Niemeyer S. e Spinoni J. 2022. Drought in Europe August 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Toreti A., Bavera D., Avanzi F., Cammalleri C., De Felice M., de Jager A., Di Ciollo C., Gabellani S., Maetens, W., Magni D., Manfron G., Masante D., Mazzeschi M., McCormick N., Naumann G., Niemeyer S., Rossi L., Seguini L., Spinoni J. e van den Berg M. 2022. Drought in northern Italy March 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Toreti A., Bavera D., Avanzi F., Cammalleri C., De Felice M., de Jager A., Di Ciollo C., Gabellani S., Gardella M., Leoni P., Maetens, W., Magni D., Manfron G., Masante D., Mazzeschi M., McCormick N., Naumann G., Niemeyer S., Rossi L., Seguini L., Spinoni J. e van den Berg M. 2022. Drought in Europe April 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Toreti A., Masante D., Acosta Navarro J., Bavera D., Cammalleri C., De Felice M., de Jager A., Di Ciollo C., Hrast Essenfelder A., Maetens W., Magni D., Mazzeschi M. e Spinoni J. 2022. Drought in Europe July 2022, Publications Office of the European Union, Luxembourg
- van der Meer M., van Woesik F., Dhiman N., Jain S., Nirmalkar K.L., Sharma L. e Kushwaha S. 2022. Ponds as an asset for agriculture: how to keep them full, *TheWaterChannel*. <https://thewaterchannel.tv/thewaterblog/water-ponds-as-an-asset-for-agriculture-how-to-keep-them-full/>
- Velasco-Muñoz J.F., Aznar-Sánchez J.A., Batlles-delaFuente A. e Fidelibus M.D. 2019. Rainwater Harvesting for Agricultural Irrigation: An Analysis of Global Research. *Water* (11). <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1320>
- Veneto Agricoltura. 2020. Rapporto strutturale 2008-2018 dell'agricoltura veneta

- Wang Q., Wu J., Lei T., He B., Wu Z., Liu M., Mo X., Geng G., Li X., Zhou H. e Liu D. 2014. Temporal-spatial characteristics of severe drought events and their impact on agriculture on a global scale. *Quaternary International* (349): 10-21.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1040618214003875?via%3Dihub>
- Wang W., Straffelini E. e Tarolli P., 2023, Steep-slope viticulture: The effectiveness of micro-water storage in improving the resilience to weather extremes, *Agricultural Water management* 286. 108398. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377423002639?via%3Dihub>
- Weiss S. 2022. *Wired* (<https://www.wired.it/article/bacini-idrici-costruzione-ostacoli/>)
- Wilhite D.A. 2000. *Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions*. 3-18. London: Routledge