

Stima delle perdite idriche della rete irrigua del Consorzio per l'Incremento dell'Irrigazione nel territorio Cremonese

Indice

Introduzione.....	4
Capitolo 1 Descrizione geomorfologica e idrografica del territorio cremonese	7
1.1 Condizioni idrografiche	7
1.2 Contesto geomorfologico.....	8
Capitolo 2 Formazione e evoluzione della rete irrigua cremonese	11
2.1 Nascita ed evoluzione del sistema irriguo nel Cremonese, tra Adda ed Oglio	11
2.2 Le maggiori reti irrigue antiche, tra iniziative private e pubbliche: Il Condominio 'Pallavicino' ed il Naviglio della Città di Cremona.....	12
2.3 Lo sviluppo dell'agricoltura e la conseguente crescente richiesta di acqua per l'irrigazione.....	14
2.4 Nascita del Consorzio Irrigazioni Cremonesi: cenni storici e motivi che hanno portato alla creazione dell'istituto.....	16
Capitolo 3 La dispensa irrigua	19
3.1 Portate derivate e scambiate.....	19
3.2 Bocche continue e bocche ad orario.....	20
Capitolo 4 Bilancio idrico	24
4.1 Aspetti generali e relative problematiche.....	24

4.2 Metodologia utilizzata.....	26
4.2.1 Misure di portata tramite mulinello.....	26
4.2.2 Altri metodi di misurazione della portata.....	34
4.2.3 Caratteristiche della strumentazione utilizzata per la misure di portata sulla rete del CIC.....	43
Capitolo 5 Bilancio idrico della rete irrigua cremonese	46
5.1 Finalità e problemi operativi e tecnici.....	46
5.2 Bilancio di un canale.....	49
5.3 Sezioni esaminate.....	54
5.4 Stima delle perdite su tratti della rete.....	70
5.5 Descrizione pedologica dei canali della rete.....	94
Capitolo 6 Analisi e interpretazione dati	99
6.1 Situazione della rete irrigua del CIC.....	99
6.2 Il caso del canale Calciana.....	105
Capitolo 7	108
Conclusioni.....	108
Note e complementi.....	111
Bibliografia.....	112

Allegati

- A** Schema della rete del CIC con evidenziati i tratti di canale analizzati
- B** Schema della rete del CIC con riportate le perdite espresse in $l/(s \text{ Km})$
- C** Schema della rete del CIC con riportate le perdite espresse in $l/(s \text{ Km m})$
- D** Andamento perdite lungo la rete del CIC espresse in $l/(s \text{ Km m})$
- E** Andamento delle perdite su tratti della rete del CIC riferito alla litologia media del substrato

Introduzione

Nel 1977, la conferenza dell' ONU, stabilì che "Tutti hanno il diritto di accedere all' acqua potabile in quantità e qualità corrispondenti ai propri bisogni fondamentali"; al termine della conferenza di Rio de Janeiro, 1992, 150 paesi attraverso l'adozione di Agenda 21, adottarono un protocollo che individua le diverse azioni da avviare nella direzione dello "sviluppo sostenibile" nelle varie attività umane.

La risorsa idrica diventa quindi "bene di qualità limitata, di alto valore economico", e da tutelare; il raggiungimento di tale obiettivo richiede sforzi congiunti di tipo economico, politico e sociale, e necessita di una razionale e programmata gestione.

Una razionale pianificazione e gestione delle risorse idriche è, oggigiorno, ancora più indispensabile per gli effetti del cambiamento climatico del ciclo idrologico (Lelievre 2002) e per l'intenso ed indiscriminato sfruttamento della risorsa acqua.

Studi recenti (Moonen et al., 2002; Ventura et al., 2002; Lelievre et al., 2002) dimostrano come tali effetti climatici interessino in parte anche il centro nord dell'Italia, dove si evidenzia come nell'area bolognese si sia verificato un chiaro aumento della temperatura, una diminuzione dei giorni piovosi negli ultimi 40 anni ed una diminuzione del livello idrico della falda di circa 40 cm negli ultimi 15 anni. Si mostra inoltre che l'inquinamento atmosferico che sta interessando l'Europa (in particolare quella settentrionale) dal dopoguerra sta determinando una modifica del ciclo idrologico nell'area mediterranea tramite una diminuzione dell'energia solare incidente ed una conseguente diminuzione delle precipitazioni.

L'intenso sfruttamento delle risorse fisiche in essa presenti e, soprattutto, dell'acqua, ha portato oggi a situazioni di grande complessità, con fenomeni che evolvono anche in tempi brevi, chiaramente provocati dalle scelte e dagli indirizzi della società piuttosto che da dinamiche assolutamente naturali. A livello mondiale buona parte della risorsa idrica utilizzata è sfruttata per uso irriguo (circa 70%).

L'efficienza dei sistemi d'irrigazione è però modesta (37%) a causa di problemi operativi e di gestione (ammodernamenti).

Uno dei più importanti obiettivi per combattere la scarsità d'acqua in agricoltura, e di conseguenza, concorrere in modo sostanziale alla diminuzione dello spreco d'acqua è la modernizzazione e il risanamento dei sistemi d'irrigazione (D'Urso, 2001).

Come noto le perdite irrigue costituiscono una tra le maggiori cause d'inefficienza dei sistemi d'irrigazione che si riflettono, non solo a scala di comprensorio irriguo, ma anche di bacino idrografico per l'influenza sul minimo deflusso vitale dei corsi d'acqua. Il conseguimento di un elevato livello di efficienza irrigua in Italia costituisce certamente un obiettivo prioritario nel risanamento della gestione dell'acqua.

Alla luce di queste considerazioni nasce l'importanza di una corretta stima delle perdite idriche su una rete irrigua estesa come quella cremonese. La pianura cremonese è tra quelle con maggiore densità agricola in Lombardia. Nel V Censimento Generale dell'Agricoltura del 2000, la Provincia di Cremona presenta una superficie agricola utilizzata rispetto a quella totale mai inferiore al 60% e mai maggiore dell'80% in buona parte del territorio. Sono presenti in larga misura i cereali autunno-vernini, il granturco, la soia, e i prati avvicendati (erba medica in particolare), mentre altre colture trovano dimora in altre aree più specifiche quale Cremasco e Casalasco.

La stima delle perdite idriche in una rete di canali aperti è ancora oggi molto incerta, in quanto esistono poche misurazioni di dettaglio. Le sole disponibili per il territorio cremonese sono quelle di una modesta campagna di misure effettuata nel 1992. In particolare, nel caso della rete irrigua cremonese, la presenza della falda freatica a modesta profondità rende tali stime ancora più incerte per le interazioni tra suolo insaturo, falda freatica e rete irrigua.

Durante il lavoro di tesi si sono quindi realizzate delle misure sperimentali delle perdite idriche durante l'intero periodo irriguo (Aprile-Settembre) della rete di canali d'irrigazione del CIC (Consorzio Irrigazioni Cremonesi).

L'obiettivo del lavoro svolto è quello di fornire una prima valutazione dell'efficienza complessiva dell'intera rete irrigua su tutto il periodo d'irrigazione al fine di proporre soluzioni compatibili all'attuale sistema quali:

- Opere di cementificazione di alveo e sponde
- Riorganizzazione dei tempi e delle modalità di gestione delle dispensazioni

Il procedimento seguito si può riassumere nei seguenti punti:

- Individuazione dei tratti di canale lungo i quali effettuare misure di portata;
Organizzazione di una campagna di misure estesa all'intera stagione irrigua (25 aprile – 25 settembre);
- Misure di portata e rilevamento dati;
- Elaborazione dei dati raccolti: valutazione dell'andamento delle perdite nel tempo;
- Interpretazione dei risultati ottenuti.

Lo studio svolto è stato applicato alla pianura cremonese, un comprensorio molto esteso, con una vocazione prettamente agricola, caratterizzato da problemi di gestione della risorsa idrica che sono legati alla presenza di una fitta rete di distribuzione irrigua, di grande pregio paesistico – ambientale ma di difficile gestione ed ammodernamento.

L'elaborato è così strutturato:

Nel *Capitolo 1* è descritta l'area di studio. Particolare attenzione è stata riservata alle caratteristiche geofisiche determinanti per i risultati ottenuti. Vi è quindi una generale descrizione della situazione idrografica e del contesto geomorfologico che caratterizzano il territorio considerato.

Nel *Capitolo 2* attraverso riferimenti storici viene descritta la formazione della rete irrigua cremonese in seguito alla crescente richiesta di acqua ampliata di pari passo con lo sviluppo dell'agricoltura.

Nel *Capitolo 3* viene illustrato il funzionamento del complesso sistema d'irrigazione caratterizzato da distribuzioni attraverso bocche continue e ad orario; vengono poi elencate le principali portate derivate e scambiate all'interno del sistema.

Nel *Capitolo 4* sono introdotti gli aspetti generali di un bilancio idrico. Sono descritti i principali metodi di misurazione della portata, in particolare quelli utilizzati durante il nostro studio. Inoltre sono illustrate le caratteristiche della strumentazione usata.

Nel *Capitolo 5* sono presentati i risultati ottenuti dopo la campagna di misure.

Vengono descritti in dettaglio tutte le sezioni e i tratti esaminati (caratteristiche litologiche e idrauliche). Viene applicato il modello di bilancio di un canale campione a tutti i tratti considerati al fine di stimarne le perdite.

Nel *Capitolo 6* si sono interpretati i dati raccolti (confronto tra gli andamenti temporali delle perdite) e si sono formulate a riguardo delle ipotesi.

Nel *Capitolo 7*, infine, sono descritte le conclusioni, rispetto agli obiettivi fissati, per il presente studio.

Capitolo 1 Descrizione geomorfologia e idrografica del territorio cremonese

1.1 Condizioni idrografiche

Gli elementi principali del reticolato idrografico del territorio cremonese sono tre grandi fiumi -Adda, Oglio e Po- che delimitano la provincia sui tre lati e un quarto importante corso fluviale proveniente dal bergamasco, il Serio, che attraversa la fascia settentrionale da Nord a Sud lambendo Crema per poi sfociare nell'Adda.

Gli elementi secondari dell'idrografia superficiale sono molto più numerosi e costituiscono un denso reticolo di canalizzazioni naturali e artificiali che assicurano le funzioni di colo oltre a quella fondamentale di capillare distribuzione delle acque irrigue. Si possono distinguere canali irrigui, canali colatori e rogge con funzione mista di adduzione e colo.

All'esame del regime idrologico si rileva, per ciascuno dei corsi d'acqua principali, che le variazioni delle relative portate nel tempo non dipendono dalla diversità dei fattori permanenti, caratteristici dei rispettivi bacini imbriferi (quali ampiezza, lunghezza, precipitazioni...); intervengono infatti fattori introdotti dall'uomo con la progressiva crescita delle derivazioni in risposta alle esigenze irrigue, e ulteriori cause naturali come la presenza o meno dell'alimentazione glaciale e di bacini lacustri. Elemento sostanziale è quindi la regolazione a serbatoio dei grandi laghi prealpini (lago d'Iseo per l'Oglio, lago di Como per l'Adda).

Le grandi dimensioni del bacino del Po definiscono per il corso d'acqua principale della pianura padana un regime assai composito in relazione alla sovrapposizione o allo sfasamento dei contributi delle singole unità tributarie.

Un elemento non trascurabile da rilevare nel quadro idrologico è la presenza nel settore settentrionale confinante col bergamasco di acque di risorgiva. Queste si estendono lungo un'ampia fascia territoriale localizzata nella zona di passaggio dall'alta alla bassa pianura.

L'alta pianura, sede di accumulo detritico, è costituita da ghiaie ad elevata permeabilità che consentono l'infiltrazione nel sottosuolo delle acque superficiali dando origine ad estese falde. Scendendo verso la bassa pianura, con la progressiva diminuzione della granulometria e della permeabilità, le acque di falda tendono ad innalzarsi spontaneamente fino ad emergere in superficie nei punti di quota più depressa.

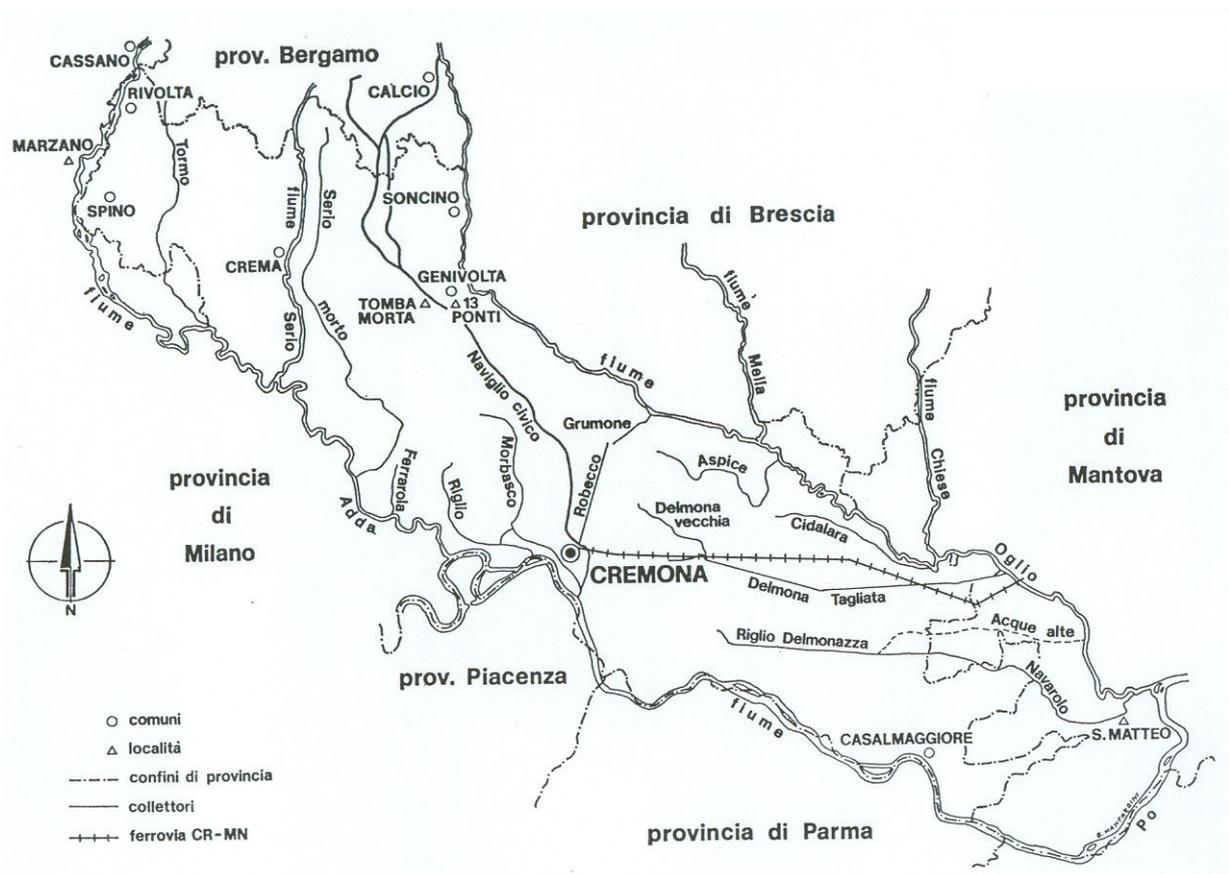


Figura 1.1.1 Principali collettori del territorio cremonese

Le acque emergenti costituiscono una serie di sorgenti di pianura chiamate risorgive; vengono invece nominati fontanili le aree depresse dove il fenomeno si verifica. Questo è molto vistoso ed occupa una striscia di terreno larga una decina di chilometri compresa tra le quote di 110m e 80m. I fontanili sono considerati sorgenti di emergenza le cui acque affiorano spontaneamente o artificialmente attraverso scavi di limitata profondità.

1.2 Contesto geomorfologico

Dal punto di vista altimetrico il territorio della provincia di Cremona non presenta variazioni di livello significative, piuttosto è caratterizzato da una graduale pendenza del terreno da Nord-NordOvest verso Sud-Est con quote massime di 107m s.l.m. lungo il confine settentrionale della provincia a quote minime di 20m s.l.m. nell'area orientale confinante con il Mantovano.

Approssimativamente lungo una fascia di circa 100Km vi è quindi un abbassamento di circa 90m con una pendenza media in direzione Sud-SudEst del 0.005% effettivamente bassa tanto da potere considerare la provincia interamente pianeggiante. Si vedrà comunque come questa

conformazione superficiale sia stata fondamentale per lo sviluppo dell'irrigazione con metodo detto per scorrimento a gravità.

Dal punto di vista pedopaesaggistico (pedologico, studio dell'origine e della composizione del suolo; paesaggistico, studio di ambiti ambientali) il territorio presenta due principali sistemi: il livello fondamentale della pianura (LFP) e le valli alluvionali.

Il primo è l'entità paesaggistica più estesa della provincia, evolutasi su materiali di origine fluvioglaciali e fluviali sedimentati durante l'ultima glaciazione.

Le valli alluvionali di pianura invece corrispondono ai piani di divagazione dei corsi d'acqua attuali o estinti. Queste comprendono le superfici interessate da dinamiche fluviali recenti o attuali prevalentemente deposizionali. L'età dei suoli quindi è legata alla frequenza delle alluvioni, che era elevata fino a quando non furono costruite opere di difesa idraulica, risultanti però tuttora superabili almeno fino all'argine maestro.

A causa delle differenti caratteristiche idrogeologiche è possibile individuare da Nord a Sud lungo il territorio provinciale tre diverse aree: il Cremasco, il Cremonese, il Casalasco.

Il primo, situato a Nord della statale Brescia-Cremona e a sinistra del Serio, è caratterizzato da suoli moderatamente profondi limitati dalla falda oscillante, che hanno tessitura media e moderatamente fine in abbondanza sabbiosi con drenaggio da mediocre (aree piane e leggermente convesse) a lento (aree depresse). E' una superficie debolmente ondulata, caratterizzata da una ricchezza di forme di origine fluviale (dossi, valleciole) generati dai corsi d'acqua alimentati anche dalle risorgive. Le acque di questa zona infatti derivano essenzialmente da alcune vallette, che si comportano come piccoli bacini colanti, e dai fontanili situati più a Nord. L'idrografia di superficie ha orientamento Nord-Sud.

La pianura del Cremonese presenta suoli con migliori caratteristiche: prevalgono sedimenti sabbiosi scarsamente calcarei e il drenaggio è buono.

L'idrografia superficiale ha orientamento Nord-SudEst.

Le acque della zona a destra del Serio fino al Naviglio Civico finiscono la loro corsa nell'Adda e nel Po, sia direttamente che indirettamente attraverso lo stesso Naviglio ed i colatori Serio Morto, Ferrarola... L'area fino all'Oglio comprende due bacini: il primo che cola a gravità nell'Oglio è servito da colatori secondari; l'altro sfrutta il Naviglio Civico, i dugali di Robecco e di Grumone e i canali del Pallavicino.

Nel Casalasco il terreno è per lo più costituito da depositi limosi e argillosi (anche calcarei) che rallentano e spesso ostacolano il drenaggio.

Caratteristica di questa zona è la presenza di molti colatori: di origine naturale quelli con evidente andamento tortuoso, artificiali e principali quelli più rettilinei.

L'area è delimitata a Nord-Ovest dalla "trincea" formata dai dugali di Robecco e di Grumose, che divide e protegge quella che viene chiamata la provincia inferiore da quella superiore.

Più ci si sposta ad Est più il drenaggio delle acque è influenzato dallo stato dei fiumi confinanti (Oglio e Po) che, in piena, rigurgitano i collettori riuscendo addirittura a sovrastare le coltivazioni.

L'idrografia superficiale ha andamento NordOvest-SudEst.

Riassumendo, il quadro idrogeologico complessivo è il seguente:

La fascia settentrionale della provincia è caratterizzata da ricchezza d'acqua proveniente prevalentemente dai fontanili e dal fiume Adda; grazie alla natura dei terreni per lo più permeabili è qui poco sentito il problema dello smaltimento delle esuberanze di acque irrigue e delle piogge. Esiste invece un problema di regimazione a scopo irriguo a causa proprio delle vaste aree costituite da terreni con scarsa capacità di ritenuta idrica.

Nella fascia centrale si trae approvvigionamento soprattutto dall'Oglio e la distribuzione è fatta per mezzo di reti di canali e di rogge.

L'area più meridionale formata da terreni con prevalenza di elementi fini (limi e argille) presenta la parziale soggiacenza rispetto alle quote di piena del Po e dell'Oglio e ha come problema la difesa dalle acque e la preoccupazione del loro allontanamento. Questo è risolto con progetti di sistemazione idraulica e di sollevamento meccanico degli eccessi idrici nei corsi fluviali, e di costruzione di arginatura lungo i fiumi.

Capitolo 2 Formazione ed evoluzione della rete irrigua cremonese

2.1 Nascita ed evoluzione del sistema irriguo cremonese, tra Adda e Oglio

La morfologia del territorio cremonese lo rende tra i più adatti alla attivazione delle colture irrigue. Questo terreno, totalmente in piano, opportunamente concimato, lavorato e irrigato, assicura un'ottima produttività da sempre valorizzata da una popolazione agricola paziente e laboriosissima.

Si comprende quindi come le comunità cremonesi ed i singoli -fossero principi o agricoltori- cercassero in ogni tempo di procurarsi e di utilizzare tanta più acqua possibile.

L'acqua, tuttavia, era servita da secoli anche per altri scopi e le reti idrauliche esistenti nella seconda metà del XIX secolo ne rispecchiavano le diverse origini.

Questo vale in maniera particolare per il territorio cremonese posto ad oriente del fiume Serio e, grosso modo, a nord della ferrovia Cremona-Mantova: l'ambiente cioè in cui si svolgerà l'azione del CIC¹.

Appare quindi opportuno effettuare un esame panoramico delle maggiori canalizzazioni riscontrabili intorno al 1880 esteso all'intera provincia.

Le fonti di alimentazione del sistema irrigatorio provinciale sono: i fiumi Adda, Oglio, Po e Serio; i fontanili², che si formano, oltre che lungo il confine bergamasco, nella zona mediana del confine superiore; le colature (indifferentemente detti coli nel Cremonese) che si ritrovano nei fossi raccoglitori a causa sia delle percolazioni sia delle perdite d'acqua tipiche del metodo irriguo a scorrimento. Di scarso valore il prelievo dalla falda a mezzo di pozzi.

Le reti degli adduttori³ e dei dispensatori³ sono frutto del lavoro di secoli al fine di soddisfare esigenze igieniche, militari, di produzione di energia, di navigazione e di irrigazione, lavori commissionati in genere da comunità civiche e religiose o da famiglie patrizie, per dotare di acqua irrigua vasti possedimenti o per azionare mulini.

E' quindi probabile che alcuni corsi d'acqua naturali siano stati adattati prima per la produzione di forza motrice e più tardi per l'utilizzo agricolo.

Per poter meglio comprendere il formarsi delle reti irrigue è perciò necessario conoscere le vicende storiche che hanno interessato il territorio: i liberi comuni, le lotte con gli imperatori, le investiture imperiali, le lotte fra i Comuni, i principati, il governo della Repubblica veneta, le dominazioni straniere.

Tutti questi avvenimenti hanno lasciato un segno indelebile nell'idrografia e nei diritti e nelle tradizioni inerenti le acque.

In tali situazioni le reti irrigue si svilupparono con carattere fortemente individualistico determinando due fenomeni: l'utilizzazione a fini irrigui di colatori naturali -perché in tal modo si esercitavano corsi d'acqua esistenti- e l'irrazionale moltiplicarsi dei canali dispensatori i

quali, spesso, iniziando nella stessa zona e alimentati dalle stesse fonti, erano destinati, con percorsi a volte paralleli o contigui, ad irrigare territori vicini tra loro, in modo tale che ognuno aveva un suo canale per condurre le sue acque sui suoi fondi senza che nessun altro potesse vantare diritti su quel canale né immettervi altre acque.

2.2 Le maggiori reti irrigue antiche, tra iniziative private e pubbliche: il Condominio 'Pallavicino' ed il Naviglio della Città di Cremona

Fra le più antiche organizzazioni cremonesi di reti irrigue principali si annoverano quella generalmente indicata come *Naviglio Civico di Cremona* e quella nota come *Condominio Pallavicino*, alimentate ambedue prevalentemente dal fiume Oglio.

La rete del Naviglio civico è formata da canali principali le cui origini sono antichissime. Probabilmente già intorno all'anno mille le acque di fontanili e - colature raccolte, nel basso Bergamasco e nel Soncinese, dai canali Fosso bergamasco, Naviletto di Barbata, Naviglio di Melotta - sono utilizzate come antiche possessioni dalla città di Cremona. Ben presto però i cremonesi aspirano a derivare acque vive dal fiume Oglio, sul quale la loro comunità vantava un privilegio rilasciato nel 951 da Ottone I e più volte confermato dai successivi imperatori. Ma l'avvio dei lavori per la costruzione delle opere di derivazione - nel basso Bergamasco - e del seguente canale è determinato dall'ampia concessione fatta da Ludovico IV il Bavaro .

Dopo il 1786 la gestione del Naviglio Civico (che prima faceva capo ad un Ufficio della Magnifica Comunità) è assunta dalla Congregazione municipale e nel 1880 il Consiglio comunale concorda con gli utenti la costituzione di una nuova organizzazione amministrativa caratterizzata da due organi: l'Amministrazione del Naviglio della città di Cremona e il Consiglio dei Delegati alla vigilanza per il buon governo delle acque del Civico Naviglio.

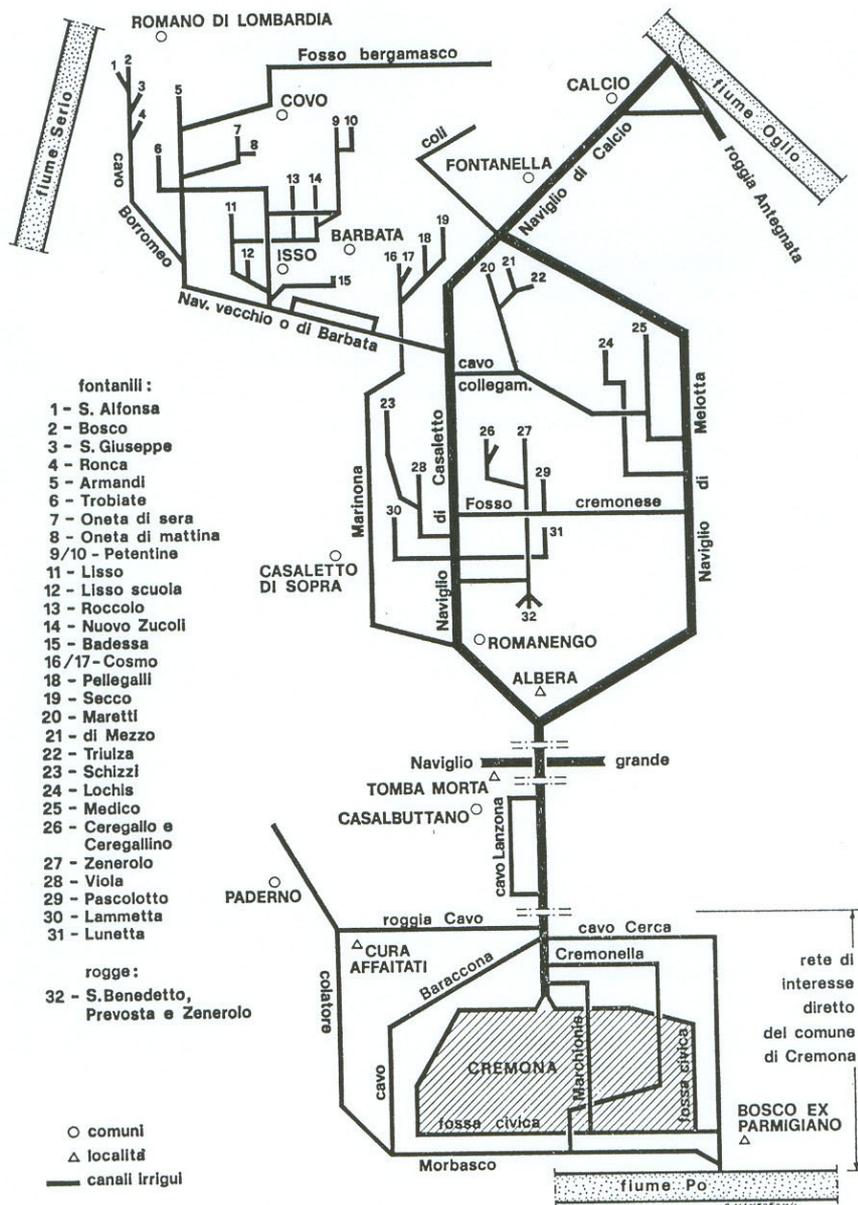


Figura 2.2.1 Rappresentazione schematica della rete del Naviglio Civico di Cremona (con le fosse civiche del capoluogo e l'elenco dei fontanili)

La rete del Condominio Pallavicino è un insieme di canali principali e secondari aventi origini diverse, riuniti in una unica proprietà da Galeazzo I Pallavicino; a questi vanno aggiunte nuove costruzioni ed acquisizioni, poi continuate dai successori sino al chiudersi del XVIII secolo. Alla rete alimentata prevalentemente da derivazioni dall'Oglio, i Pallavicino aggiunsero l'apporto di fontanili ,aperti, in genere, a cavallo della linea oggi confine fra Bergamasco e Cremonese.

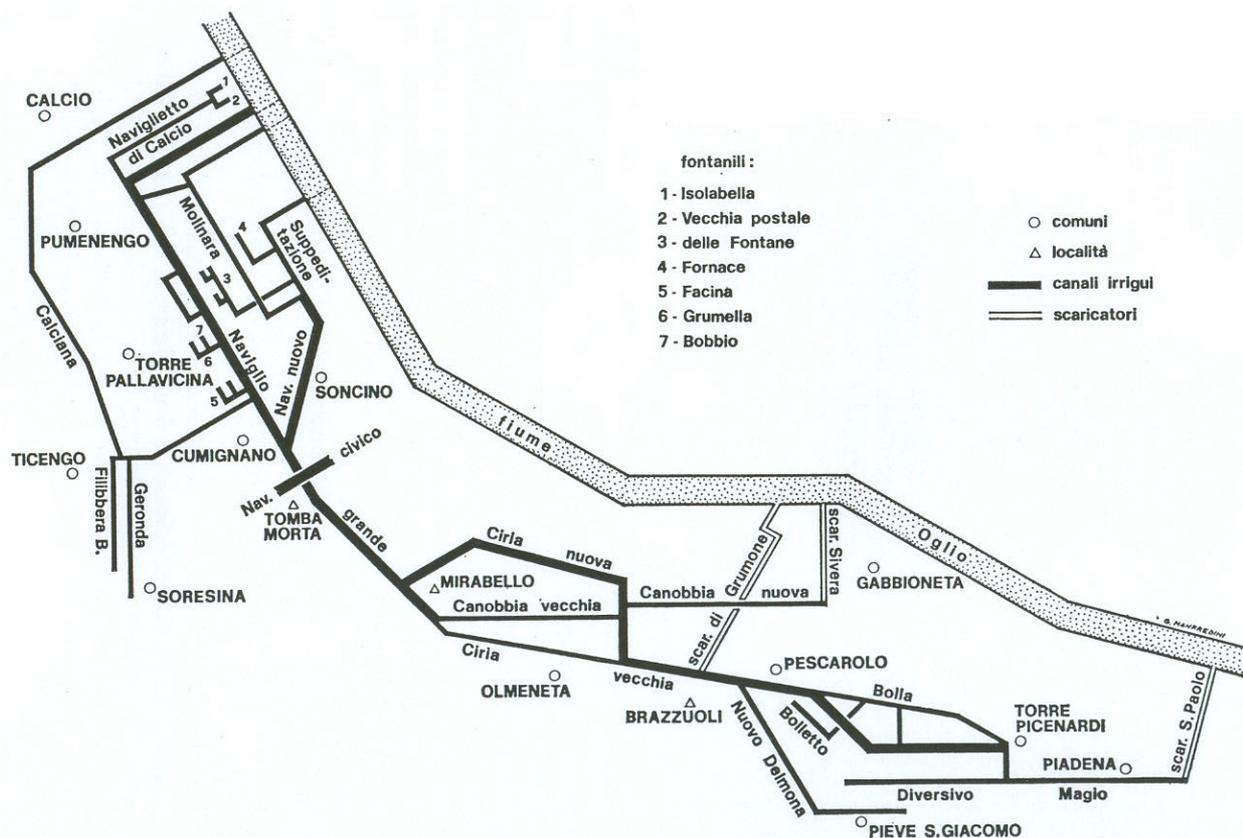


Figura 2.2.2 Rappresentazione schematica rete del Condominio Pallavicino (con l'elenco dei fontanili)

2.3 Lo sviluppo dell'agricoltura e la conseguente crescente richiesta di acqua per l'irrigazione

Nel territorio cremonese, dove da secoli vengono utilizzate in maniera intensiva le pratiche agricole, esistono canali e rogge fin dal XV secolo, appartenenti al Condominio Pallavicino.

In questo contesto i marchesi Pallavicino hanno sempre mantenuto funzionante la rete irrigua nei quattro secoli in cui ne erano proprietari cercando di ampliarla e renderla più efficiente.

Fino alla seconda metà del XIX secolo le principali risorse idriche sfruttate erano il fiume Oglio, i fontanili e gli antichi canali del Condominio Pallavicino che però non erano assolutamente sufficienti a garantire il fabbisogno degli utenti.

L'Oglio per esempio non era ancora regolato dalla diga di Sarnico, e presentava quindi un regime idrologico naturale tipico dei corsi d'acqua vallivi, con la classica magra nella stagione estiva, periodo in cui le esigenze delle colture irrigue sono maggiori.

La dotazione specifica media era intorno a $0,8 \text{ l/s ha}^1$, inferiore al valore medio ritenuto in letteratura sufficiente per garantire un buon livello di producibilità delle culture irrigue, pari a 1 l/s ha .

Del resto nei secoli scorsi l'irrigazione non poteva che essere effettuata col metodo detto per *scorrimento a gravità*: l'acqua veniva portata lungo le testate dei campi, a quota dominante, e fatta poi scorrere per gravità sui campi perfettamente spianati e lievemente declivi.

Questo metodo prevedeva un ingente consumo di risorse idriche per coprire l'appezzamento da irrigare di una lama d'acqua; occorre poi sottolineare che non esistevano strumenti meccanici come le pompe per sollevare e trasportare tali acque.

Nasceva quindi il problema dell'acqua come bene primario alla base della produzione agricola.

L'esigenza di ottenere una maggiore dotazione idrica convinse un gruppo di 59 Comuni cremonesi a consorziarsi per appoggiare un progetto grandioso di un insigne cittadino cremonese, **Pietro**



Figura 2.3.2
Ritratto di
Pietro Vacchelli

Vacchelli: quello cioè di costruire un canale che derivasse le portate del fiume Adda in località Merlino, nel Lodigiano, per convogliarle attraverso tutto il Cremasco fino al nodo di Genivolta, dove convergevano gli antichi canali derivatori dall'Oglio e da cui si dipartiva la rete irrigua già esistente.

Dopo un'alternante serie di vicissitudini il canale Vacchelli, già canale Marzano, nel 1890 viene terminato e il Consorzio ottenne la possibilità di prelevare dall'Adda ben $25 \text{ m}^3/\text{s}$, integrando le portate dall'Oglio e raddoppiando così l'acqua disponibile per tutto il Cremonese.

La dotazione irrigua specifica ha raggiunto così il valore medio di $1,28 \text{ l/(s ha)}$, valore che mantiene tuttora.

Con una tale disponibilità idrica, gli utenti della rete sono cresciuti e i canali esistenti sono stati potenziati.

Nel 1948 si è ottenuta la concessione dallo Stato a derivare dall'Adda altri $12 \text{ m}^3/\text{s}$.

Inoltre la regolazione dei laghi di Como e Iseo, negli anni '20-'30, ha regolarizzato il corso dei fiumi e permesso al Consorzio di ottenere un aumento di portata derivabile sia sull'Adda ($+1,5 \text{ m}^3/\text{s}$) sia sull'Oglio ($+1,5 \text{ m}^3/\text{s}$), arrivando così a possedere la disponibilità idrica attuale.

Col passare del tempo agli antichi canali se ne sono aggiunti altri, tendenzialmente paralleli, in modo che l'acqua dal punto di prelievo avesse un percorso indipendente per ogni utente, assicurando un approvvigionamento autonomo.

La rete irrigua cremonese si presenta oggi come un meccanismo efficiente e preciso per la distribuzione della risorsa idrica, sia per la buona tenuta dei canali e sia per la presenza attenta dei *campari*, permettendo così agli utenti di fruire di un servizio di qualità.

2.4 Nascita del Consorzio Irrigazioni Cremonesi: cenni storici e motivi che hanno portato alla creazione dell'istituto

Il Consorzio per l'incremento dell'irrigazione nel territorio cremonese, detto anche Consorzio Irrigazioni Cremonesi, fu fondato il 26 marzo 1883 con lo scopo di costruire il canale Pietro Vacchelli, realizzato con l'antico nome di 'Marzano' tra il 1887 ed il 1893.

Il CIC nasce come consorzio di 59 comuni cremonesi, che sottoscrissero quote di partecipazione economiche dette 'carature'.

La costruzione del canale Vacchelli fu indispensabile perché l'acqua per l'irrigazione della campagna cremonese, compresa tra il Serio il Po e l'Oglio, era assolutamente insufficiente, tanto che nelle estati particolarmente siccitose i raccolti risultavano seriamente compromessi, con conseguenze dirette sia sulle scorte alimentari che sull'intera economia della zona.

L'unica soluzione apparve subito quella di portare acqua dal fiume Adda fino ad alimentare i canali che discendevano dal fiume Oglio.

Si decise così di costruire un nuovo canale che prelevasse 25 m³/s dal fiume Adda in località Marzano (da qui il suo primo nome) nel Comune di Merlino (LO), e la conducesse, attraversando tutto il Cremasco e, scavalcando il fiume Serio, fino a Genivolta in località 'Tomba Morta'.

Qui convergono i canali derivatori dall'Oglio (Naviglio Civico e Naviglio Grande Pallavicino) e da qui partono numerosi acquedotti che si diramano nella pianura cremonese.

I due navigli predetti derivavano dall'Oglio circa 25 m³/s; l'apporto del canale di Marzano avrebbe raddoppiato l'acqua disponibile per tutto il Cremonese.

Il 25 agosto 1880 si costituisce l'"associazione promotrice" e viene eletto il Comitato esecutivo con presidente Pietro Vacchelli¹.

Dal punto di vista organizzativo il CIC è un ente morale di diritto privato, che svolge senza scopi di lucro l'attività di derivazione e distribuzione di acqua per l'irrigazione in agricoltura.

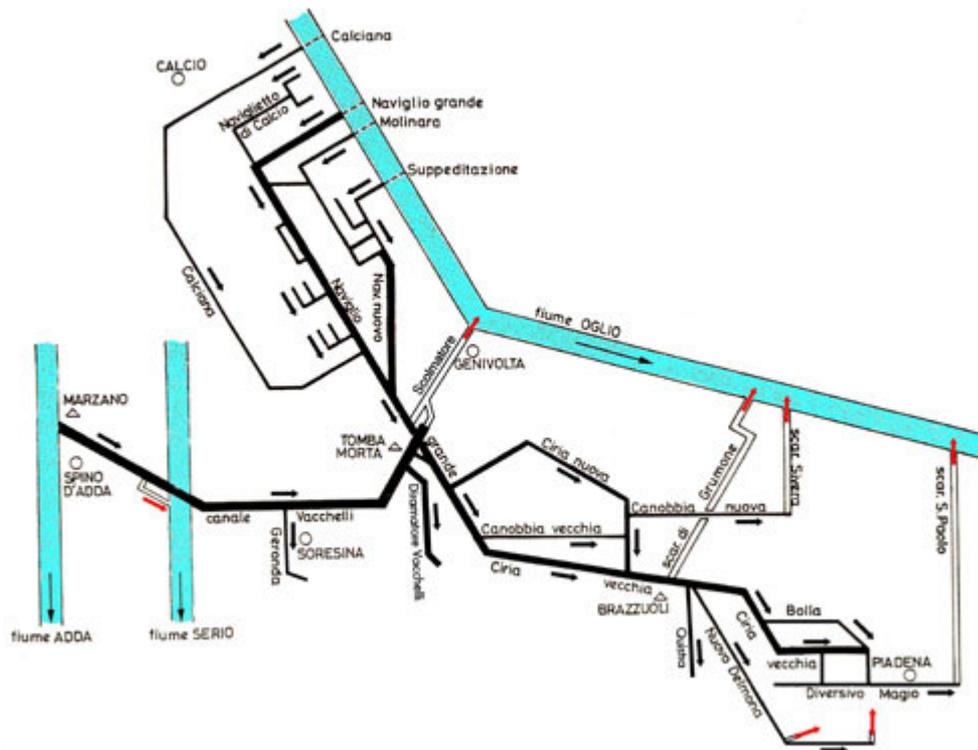


Figura 2.4.1 Attuale struttura della rete irrigua di pertinenza del CIC



Figura 2.4.2 Logo del consorzio Irrigazioni Cremonesi

La sua rete distributiva estesa per 261 km, è costituita dai seguenti canali principali (alimentati dai fiumi Adda e Oglio e dai fontanili):

- Canale Pietro Vacchelli (già Canale 'Marzano'), alimentato dal fiume Adda;
- Cavo Calciana, alimentato dal fiume Oglio;
- Naviglietto di Calcio, alimentato da fontanili;
- Naviglio Grande Pallavicino, alimentato dal fiume Oglio e da fontanili;
- Cavo Molinara, alimentata dal fiume Oglio e da fontanili;
- Cavo 'Di suppeditazione', alimentato dal fiume Oglio e da un fontanile;
- Naviglio Nuovo Pallavicino, formato dalla confluenza, in territorio del Comune di Torre Pallavicina (BG), della Molinara e del Suppeditazione e dal fontanile denominato Cavo delle fontane.

Questi canali, a loro volta, alimentano altri canali del Consorzio:

- Cavo Geronda;
- Cavo Ciria Vecchia;
- Cavo Ciria Nuova;
- Cavo Canobbia Nuova;
- Cavo Canobbia Vecchia;
- Cavo Nuovo Delmona;
- Cavo Bolla;
- Cavo Diversivo Magio.

La portata totale in concessione al consorzio è di **57,779 m³/s**, ed è disponibile² durante l'intera stagione irrigua, che va dal 25 aprile al 25 settembre.



Figura 2.4.3 mappa del comprensorio irriguo

Il comprensorio irriguo si estende per 64510 ettari, (che aumenta a circa 82500 ettari tenendo conto di altri apporti sovrapposti e delle colature) distribuiti in massima parte nella provincia di Cremona.

Il Consorzio infatti irriga anche una piccola parte della bassa pianura bergamasca.

Capitolo 3 La dispensa irrigua

3.1 Portate derivate e scambiate

La rete per il Consorzio Irrigazioni Cremonesi deriva una portata di 38,5 m³/s dal fiume Adda e di 16,4 m³/s dal fiume Oglio.

Si è stimato inoltre che le acque provenienti dai fontanili e dai recuperi ammontino a 2,9 m³/s.

Entrando nel dettaglio della rete del consorzio si evince che dal canale Vacchelli vengono prelevati 37 m³/s per concessione e 1,5 m³/s per acque nuove, mentre dall'Oglio si derivano per riconoscimento 1,656 m³/s tramite il cavo Calciana e 8,587 m³/s con il Naviglio Grande, 1,536 m³/s da entrambi per acque nuove e 4,6 m³/s da Molinara e Suppeditazione per concessione.

Le acque derivate da Molinara e cavo di Suppeditazione, impinguate dai fontanili Cavo delle Fontane e Fornace, confluiscono nello stesso punto in cui ha inizio il Naviglio Nuovo, che impingua il Naviglio Grande al km 18,270, dopo che questi ha ricevuto le acque del cavo Calciana e di alcuni fontanili più a monte (Naviglietto di Calcio con circa 600 l/s; Bobbio, Grumella, Facina: in totale 300 l/s).



Figura 3.1.1 Località Tomba Morta - Genivolta

diramatore Vacchelli il quale, appena dopo il nodo, restituisce al Naviglio Grande parte dell'acqua ricevuta e non utilizzata dalle sue bocche.

In questa località il Naviglio Grande passa al di sotto del Vacchelli e riceve da esso tramite paratoie laterali una

portata che, assieme alle acque provenienti dal torna-canale, si attesta intorno agli 8 m³/s; il Vacchelli prosegue poi per altri 300-400 m, nei quali si concentrano altre dispense irrigue per

terminare con uno scaricatore, denominato Carione, che conduce nello scolmatore di Genivolta l'acqua in esubero.

Una volta oltrepassato il nodo idraulico di Tomba Morta, il Naviglio Grande subisce - al km 29,670 - ,tramite paratoia di alimentazione, un prelievo di circa 11,6 m³/s diretti ad alimentare la Ciria Nuova la quale, alla progressiva 10,840 km incontra una paratoia di ferma utilizzata per alzare il livello del pelo libero di monte, onde potere alimentare la Canobbia Nuova, avente un'altimetria inferiore.

Quest'ultima, assieme alla Ciria Vecchia, ha origine dalla fine del Naviglio Grande attraverso una biforcazione ottenuta tramite un partitore di portata tarato in modo da fare entrare nella Ciria Vecchia circa 1,5 m³/s, ed i restanti nella Canobbia Vecchia.

Seguendo il corso della Ciria Vecchia si arriva al km 4,250 dove la Ciria Nuova confluisce nella Vecchia, mentre più avanti, al km 17,360, nasce il cavo nuovo Delmona, che deriva dalla Ciria circa 3 m³/s.

Proseguendo oltre, al km 21,741, una paratoia d'alimentazione da origine al cavo Bolla, il quale al km 12,360 riceve le acque della sezione terminale della Ciria Vecchia, dalla quale aveva preso inizio.

Il cavo Nuovo Delmona si estingue nei pressi di Pieve S. Giacomo, non prima però di aver fatto nascere al km 7,180, - con una paratoia d'alimentazione che deriva 0,350m³/s - il Diversivo Magio il quale riceve al km 12,515 le acque provenienti dall'asta terminante nel Bolla e arriva poi allo scaricatore S. Paolo, che fa defluire in Oglio le eventuali portate eccedenti.

3.2 Bocche continue e bocche ad orario

Lungo tutti i canali principali della rete del Consorzio si aprono bocche di presa che permettono di distribuire l'acqua alle rogge usate come dispensatori secondari con lo scopo di servire i singoli appezzamenti di terreno.

In generale il sistema idraulico comprendente le bocche è così formato: sulla sponda del canale c'è una luce di forma rettangolare regolata da una paratoia e collegata al dispensatore secondario attraverso un piccolo canale di calcestruzzo con sezione rettangolare terminante con un risalto o uno stramazzo; vi è poi un pozzetto laterale nel quale è posto un idrometro. Questo sistema permette la regolazione della paratoia in modo da avere nel canaletto un livello costante di acqua anche in presenza di variazioni del pelo libero nel canale principale. In teoria è possibile assicurare quindi una portata costante con un' incertezza di misura pari al 5%.

Si ricorda che le manovre di regolazione delle bocche sono svolte dai "campari" che quotidianamente controllano il livello dell'idrometro modificando se necessario la corsa della paratoia. Tale lavoro determina una certa variabilità nelle portate ritirate considerabile dello stesso ordine di grandezza dell'incertezza di misura.

Esistono due tipologie di bocche: continue e ad orario.

Le prime vengono aperte all'inizio della stagione irrigua (ad esempio a Maggio) chiuse alla fine (Settembre) e forniscono in questi mesi una portata in teoria costante e continua.

Le bocche ad orario sono così chiamate perché caratterizzate da manovre di apertura e chiusura che si ripetono periodicamente e ad intervalli regolari durante tutta la stagione.

Per ogni bocca ad orario si deve conoscere il giorno, l'ora di prima apertura e di prima chiusura e il turno irriguo che le compete.

Il turno irriguo T è un intervallo di tempo costante compreso tra l'apertura n e l'apertura $n+1$ (si veda figura 3.2.1) o, in modo equivalente, fra due chiusure successive.

Si nota quindi che durante la stagione irrigua esistono intervalli di tempo in cui la bocca rimane aperta e altri in cui è chiusa; questi si ripetono esattamente con cadenza pari al turno T .

E' ovvio che il periodo di apertura e quello di chiusura sono entrambi inferiori a T .

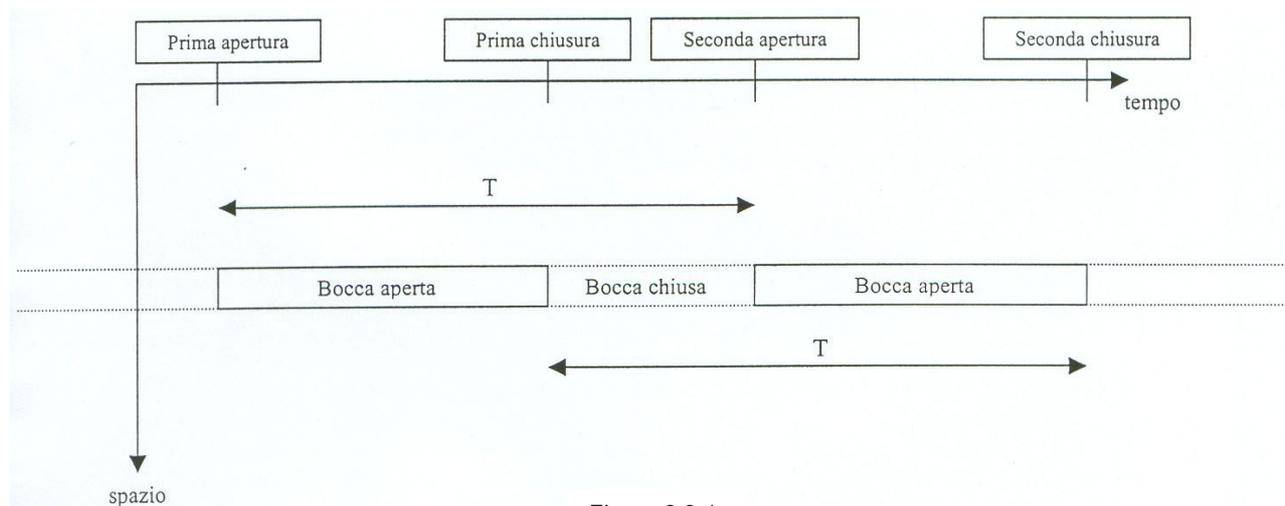


Figura 3.2.1

I turni irrigui T dei canali vanno da un minimo di 7 giorni ad un massimo di 18. Nella rete cremonese ci sono 11 diversi tipi di turni distribuiti variamente lungo i canali.

Riportiamo di seguito un esempio del numero e delle tipologie delle bocche della rete in funzione nella stagione irrigua 2002 per i canali più importanti:

Nome Canale	n. bocche continue	n. bocche ad orario	Turno (n.bocche)
Naviglio Grande	26	20	7(13); 14(4); 15(3)
Vacchelli	21	11	8(4); 15(2); 16(4); 18(1)
Calciana	8	6	7(6)
Nuovo Delmona	11	3	7(1); 16(2)
Naviglio Nuovo	5	1	7(1)
Primo diramatore Vacchelli	8	6	14(1); 16(5)

Analizziamo ora la correlazione fra bocche e portata.

E' evidente che le bocche, sia continue che ad orario, provocano una diminuzione di portata a valle della loro posizione; questo vale durante tutta la stagione irrigua per le bocche continue, per le altre solo quando sono aperte.

Si deduce che la variabilità nel tempo delle portate in una data sezione non dipende dalle bocche continue che, operando in modo costante non influiscono in alcun modo. La variazione di portata è legata quindi alle bocche ad orario le quali, funzionando a intermittenza modulano l'andamento della portata nella sezione finale in base allo schema degli orari di apertura e chiusura.

Questa situazione ci porta a non tenere più conto delle bocche continue (è sufficiente conoscere la portata transitante attraverso esse e considerarla costante per tutta la stagione irrigua) e ad analizzare in dettaglio il comportamento delle bocche ad orario e la loro influenza.

Per raggiungere lo scopo che ci siamo posti, cioè effettuare misure di portata a fine e inizio canale per valutarne le perdite e l'efficienza, risulta per noi fondamentale conoscere tutti i dati relativi alla gestione delle bocche ad orario.

Questo si può spiegare attraverso un esempio.

Prendiamo in esame le portate disponibili alla sezione finale del canale Vacchelli :

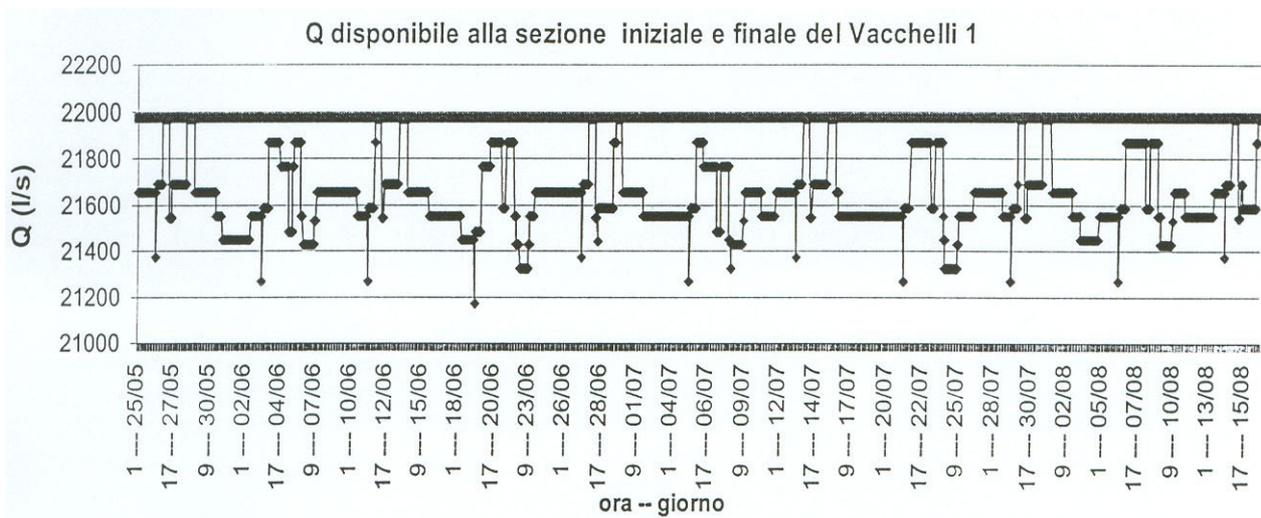
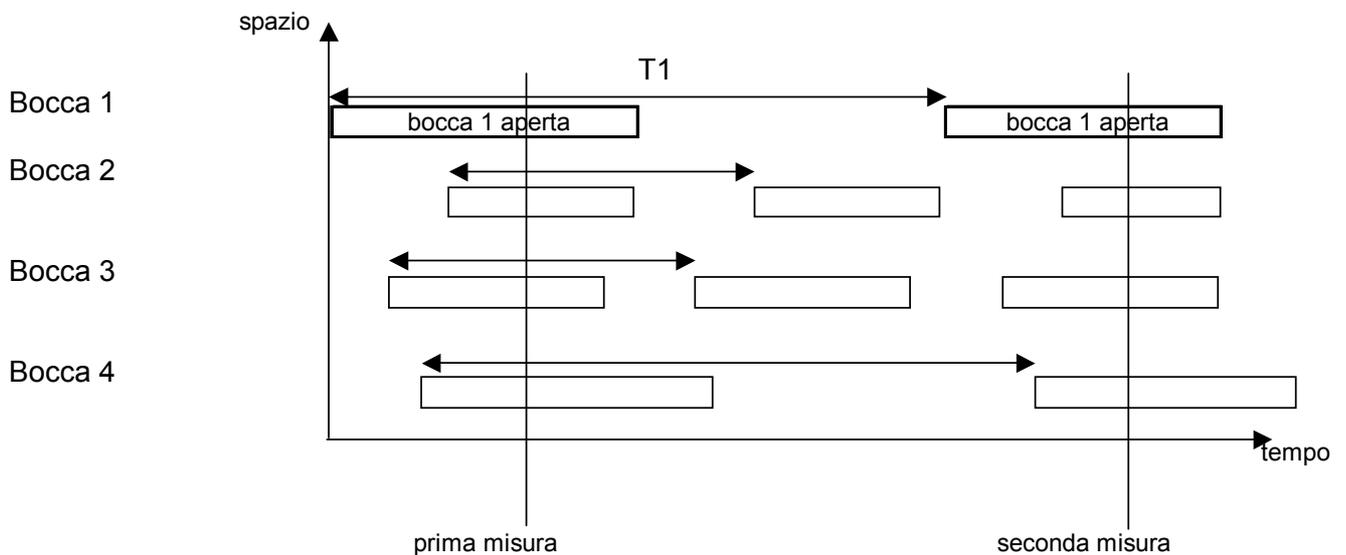


Figura 3.2.2

Il canale Vacchelli ha 11 bocche ad orario, ognuna caratterizzata dal proprio turno irriguo T , per un totale di quattro turni irrigui diversi (si veda tabella precedente). Si sa comunque che ogni turno irriguo T è costante e lo si conosce perché tabellato.

Come illustra il grafico l'insieme di più bocche ad orario lungo lo stesso canale porta ad una situazione particolare nella quale la portata varia continuamente, ma rispettando una certa periodicità e presentando valori approssimativamente uguali al ripetersi della stessa periodicità. Quest'ultima dipende esclusivamente dalla condizione globale di tutte le bocche ad orario.

Riportiamo di seguito un semplice esempio di una situazione schematizzata di 4 bocche ad orario lungo un canale:



La portata del canale varierà ad ogni apertura e chiusura, si nota quindi che le misure di portata devono essere fatte una volta noti tutti i turni irrigui delle bocche.

Capitolo 4 Bilancio idrico

4.1 Aspetti generali e relative problematiche

La corretta utilizzazione dell'acqua non potrebbe mai prescindere dalla valutazione delle quantità disponibili attraverso un completo bilancio idrologico di bacino idrografico.

Nel caso di vaste pianure alluvionali, ben alimentate da catene montuose con un elevato livello di precipitazioni pluvio/nevose, il problema raggiunge livelli di grande complessità e, necessariamente, costringe ad approcci parziali; da qui nasce un primo limite al quale si cerca di ovviare con rilevamento dati in aree ristrette, analisi campione e modellizzazione.

Quando la risorsa 'acqua' è oggetto di un intenso sfruttamento, sia superficiale che profondo, sviluppatosi nel corso di decine di secoli, che ha portato ad 'antropizzare' molti fenomeni idrologici, il bilancio idrico deve, inevitabilmente, essere impostato su aree limitate, secondo un processo 'a mosaico' che porti, in tempi certo non brevi, a valutazioni, tra loro coerenti, la cui composizione consenta di valutare la situazione di bacino e la sua evoluzione.

E' il caso della pianura Padana: l'intenso sfruttamento delle risorse fisiche in essa presenti e, soprattutto, dell'acqua, ha portato oggi a situazioni di grande complessità, con fenomeni che evolvono anche in tempi brevi, chiaramente provocati dalle scelte e dagli indirizzi della società piuttosto che da dinamiche assolutamente naturali.

Il caso del livello delle freaticimetriche dell'area di Milano è eclatante; l'andamento della piezometria, che oggi pone notevolissimi problemi di interazione con le strutture realizzate nel primo sottosuolo di quelle zone, non è certo dovuto ad evoluzione naturale.

Ma altri fenomeni, di area ancor più vasta – addirittura interessanti interi bacini idrografici - dipendono da scelte dell'uomo: basti pensare all'attuale ciclo dell'acqua nei bacini idrografici lombardi a sinistra del fiume Po, con il sistema di sfruttamento delle acque in quota sulle Alpi, i bacini idroelettrici, che trattengono grandi volumi con modalità e tempi legati a logiche di produzione di energia; sistema che prosegue nei grandi laghi prealpini, la cui regolazione artificiale sposta la disponibilità, secondo le esigenze idroelettriche nel semestre 'invernale' ed a beneficio dell'irrigazione nel semestre 'estivo', con conseguente parziale 'antropizzazione' del regime dei fiumi emissari.

La sottostante pianura è zona di massimo sfruttamento dell'acqua, coincidente con la maggiore pressione antropica sul territorio, che, a sua volta, si è sviluppata proprio a causa della notevole disponibilità idrica.

Sul territorio di pianura la risorsa acqua subisce gli effetti dell'emungimento dalle falde, la cui valutazione generale rappresenta il problema più complesso in assoluto, e l'estesa diffusione dell'acqua sul territorio, funzione, questa volta senz'altro positiva, assunta dal sistema irriguo.

E' infatti dimostrato che il sistema irriguo, derivando notevoli portate dai fiumi e distribuendole capillarmente sui territori agricoli, contribuisce in modo determinante alla dotazione quali/quantitativa delle falde,¹ alimentando costantemente questi serbatoi sotterranei.

Il fenomeno, dovuto alla percolazione in profondità di parte delle acque che vengono distribuite sul terreno, costituisce una prerogativa del sistema irriguo, della quale si avvantaggia l'intera collettività. Questa funzione dovrebbe essere sempre considerata nello studio del bilancio idrologico, che, purtroppo, spesso considera l'elevata dotazione irrigua specifica della pianura Padana - compresa tra 0,5 e 4,0 l/s per ettaro - come un ingiustificato spreco.

Un aspetto fondamentale per la corretta conduzione del bilancio idrologico è la produzione di dati rilevati in modo sistematico ed omogeneo. Sebbene i fenomeni idrologici siano fortemente determinati dalle azioni dell'uomo, sviluppatasi in tempi geologicamente brevissimi, la 'risposta' del sistema è governata da leggi naturali e dai fenomeni meteorologici, la cui interpretazione può essere condotta da studi idrologici che analizzano periodi il più estesi possibile.

Lo sviluppo delle esigenze della moderna società e la politica nazionale di decentramento della Pubblica Amministrazione, che ha accresciuto il numero dei soggetti a diverso titolo interessati ad attività di 'protezione delle risorse ambientali' riducendo – però - la scala di interesse e di intervento, hanno comportato l'aumento delle difficoltà nello sfruttare le risorse umane ed economiche disponibili nel modo più adatto allo studio dell'acqua nella sua unicità.

Pur esistendo notevoli potenzialità di rilevamento dei dati interessanti, assistiamo ad una parcellizzazione delle attività, e quindi delle risorse, che non consente ancora di unire e rendere coerenti i dati disponibili. Anche la stessa produzione dei dati potrebbe essere opportunamente indirizzata per eliminare ciò che non è interessante o costituisce un'inutile ripetizione, e per realizzare rilevamenti in aree o tematiche 'scoperte'.

Sarebbe sufficiente che la preposta istituzione pubblica, che già esiste, mantenendo le prerogative di ciascun soggetto in grado di produrre dati (senza così togliere alcunchè!) dettasse indirizzi di rilevamento e gestisse un'unica ed accessibile banca informativa, impegnandosi sulla certificazione della qualità di quanto prodotto; sarebbe una versione, in moderna cooperazione, dell'attività condotta, con drammatica incostanza, dell'Istituto Idrografico del Ministero dei Lavori Pubblici e dalla sua emanazione periferica, per quanto qui interessa, dell'Ufficio Idrografico del Po di Parma.

Nell'attuale situazione ogni passo, ancorchè limitato, che possa contribuire ad indirizzare la ricerca verso l'impostazione di un bilancio idrologico complessivo, è da intraprendere, nella speranza che in futuro esso possa essere utile alla costruzione di quel mosaico di esperienze e studi che potrebbe portare alla più corretta valutazione della disponibilità e della 'circuitazione' dell'acqua in Lombardia.

¹ Vincenzo Francani - Angelo Elefanti, *Acque sotterranee in Lombardia. Gestione sostenibile di una risorsa strategica*, Regione Lombardia – Assessorato Risorse Idriche e Servizi di Pubblica utilità, Milano 2001.

In questa direzione si muove, senz'altro, il presente studio che vuole definire il bilancio idrologico di una rete irrigua a servizio di un territorio esteso. Rete irrigua, in gran parte di origine antica, caratterizzata da una notevole interazione con il terreno, essendo costituita in grande misura di canali non rivestiti.

La definizione delle perdite di condotta, essendo chiaro che l'interazione con la falda – per evidenti motivi altimetrici – non può che essere globalmente negativa per la rete stessa, è una indicazione senz'altro utile per il gestore, che potrà valutare l'opportunità di eseguire, in determinati tratti, opere di impermeabilizzazione – con una logica certo contraria a quanto qui esposto! – ma consente anche di valutare il fenomeno delle perdite nel suo contributo all'impinguamento delle falde e, superficialmente, al fenomeno delle risorgenze, quantificando un valore aggiunto alla rete così come ora è.

Trattandosi di una rete di notevoli dimensioni, sia in sviluppo che in portata distribuita, la ricerca può inoltre concorrere a definire, in raffronto con altre misurazioni esistenti, un ordine di grandezza della capacità di ricarica, in questi territori o in territori simili, ridotta a parametri specifici (per chilometro di canale, per sezione liquida, . . .), al fine di una valutazione generale dei benefici dell'irrigazione su area vasta.

4.2 Metodologia utilizzata

4.2.1 Misure di portata tramite mulinello

La portata è, per definizione, il flusso del vettore velocità attraverso una sezione trasversale del corso d'acqua. Se consideriamo \mathbf{v} il vettore velocità e \mathbf{n} il versore concorde con il moto generale dell'acqua (da monte verso valle) normale alla superficie \mathbf{A} , la portata è data dall'espressione:

$$Q = \int_A \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dA$$

Il metodo più diffuso di misura delle portate per i corsi d'acqua naturali ma anche artificiali consiste nell'eseguire un certo numero di misure di velocità in diversi punti, opportunamente distribuiti, di una superficie ideale disposta trasversalmente al corso d'acqua, e nell'approssimare l'integrale con una sommatoria. Le misure di portata si riducono quindi a misure di velocità.

Lo strumento usato per misurare la velocità dell'acqua in un punto è il **mulinello** costituito da due componenti: un equipaggio mobile che, investito dalla corrente, ruota con velocità angolare funzione della velocità dell'acqua, e un dispositivo che conta il numero di giri in un fissato periodo T .

I mulinelli sono di due tipi:

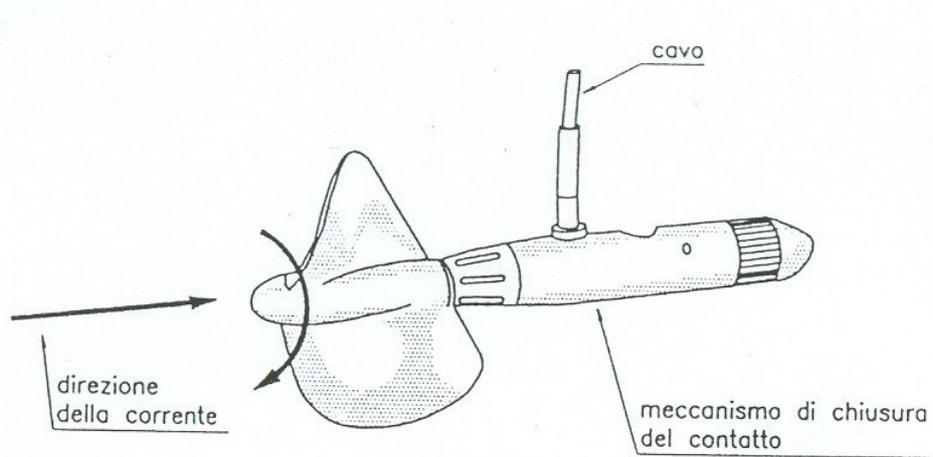


Figura 4.2.1.a Mulinello ad asse orizzontale

- mulinello ad asse orizzontale o mulinello ad elica (fig.4.2.1.a)

è il più comune (usato anche da noi) è costituito da un elica il cui asse si dispone nella direzione della corrente. La velocità di rotazione dell'elica è data dal rapporto fra il numero di giri (che appare sul dispositivo conta giri) e il relativo intervallo di tempo T .

Le eliche sono caratterizzate dal passo (distanza verticale fra l'asse e l'estremità della pala), compreso normalmente fra 0.05m e 0.5m. Quelle a passo breve hanno pale fortemente arcuate, quelle a passo lungo hanno pale quasi piane.

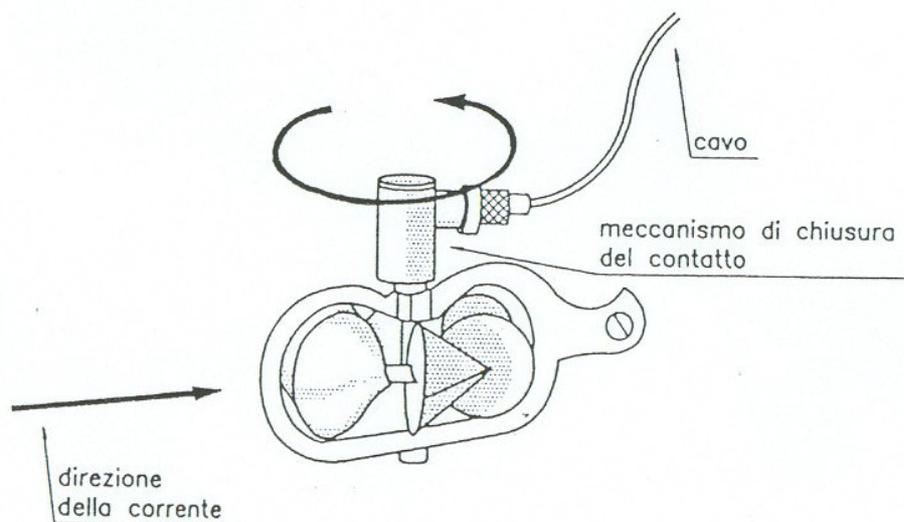


Figura 4.2.1.b Mulinello ad asse verticale

- *mulinello ad asse verticale o mulinello a coppelle* (fig.4.2.1.b)

L'equipaggio mobile è costituito da un certo numero di coppelle, disposte a corona intorno all'asse, che offrono alla corrente una resistenza diversa a seconda che questa investa la faccia concava o quella convessa. La corrente mantiene in rotazione l'equipaggio. Questo tipo di mulinello è usato negli Stati Uniti.

Taratura

La taratura di un mulinello è la determinazione sperimentale della relazione che lega la velocità angolare delle eliche ω e la velocità della corrente v .

L'operazione di taratura si esegue trascinando a velocità costante e nota il mulinello montato su un opportuno supporto in una vasca d'acqua ferma.

In questo modo si determina la curva di taratura del mulinello espressa nella forma lineare

$$v = a + b\omega$$

La costante **a** rappresenta la velocità minima per vincere gli attriti; la costante **b** è, nel caso dei mulinelli ad asse orizzontale, molto vicina al passo dell'elica.

La curva di taratura dipende dal tipo di supporto usato per il mulinello che non deve mai essere cambiato. E' importante inoltre che l'elica non subisca deformazioni poiché la curva risente delle condizioni di manutenzione.

Esecuzione delle misure con il mulinello

Scelta della sezione

- 1- Si cerca, nei limiti del possibile, di far coincidere la sezione nella quale si eseguono le misure di portata con quella in cui è installato l'idrometro. Spesso le circostanze favorevoli all'esecuzione delle misure si presentano altrove: si separano le due sezioni ritenendo la portata la stessa.
- 2- Per ottenere delle misure di portata soddisfacenti è necessario che i filetti liquidi siano tra loro paralleli in modo che, scelta la sezione trasversale, sia minimo l'angolo formato dalla direzione del vettore velocità con quella della normale alla sezione. Individuare quindi una sezione il più possibile ortogonale alla direzione della corrente.
- 3- La profondità dell'alveo deve essere tale da permettere una buona esecuzione delle misure; la profondità della sezione deve quindi essere compresa tra 0,10m e 6/7 m.

- 4- Non ci devono essere zone di esondazione, nelle quali la vegetazione rende impossibile l'uso del mulinello, e il fondo deve essere il più regolare possibile. Ogni irregolarità (rocce, vegetazione arbustiva, banchi di sabbia...) influisce sfavorevolmente sull'andamento dei filetti liquidi e rende più incerta la determinazione della sezione trasversale. Si deve quindi intervenire sull'alveo ripulendolo e regolarizzandolo (questo soprattutto per piccoli alvei in quanto l'effetto delle irregolarità è inversamente proporzionale alla larghezza della sezione).

Esecuzione delle misure

Come primo passo si richiede il Campionamento del vettore velocità nella sezione trasversale: misurata la larghezza della sezione si fissa un certo numero di verticali; lungo ogni verticale si effettuano misure con il mulinello a diverse profondità. (figura 4.2.1.c)

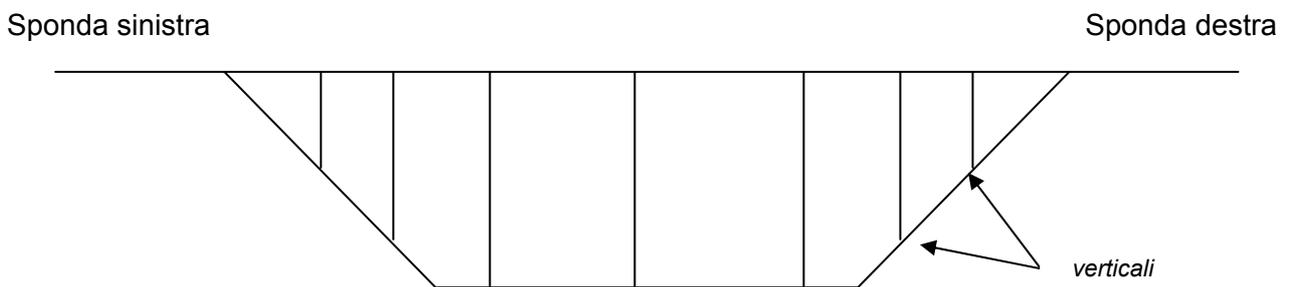
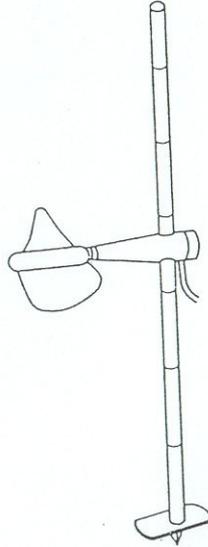


Figura 4.2.1.c Sezione canale

E' possibile eseguire queste operazioni in 4 modi diversi a seconda delle circostanze: da una passerella o da un ponte, a guado, con una teleferica, da un natante.

Misurazione a guado

Figura 4.2.1.d Pertica per le misure a guado



Le misure a guado, che si eseguono con il mulinello fissato ad una micropertica, sono chiaramente riservate al caso di profondità limitate (in generale minori di 0,50 m) e di velocità della corrente debole (inferiori a 2 m/s).

Per materializzare la sezione si adopera una corda tesa tra le due sponde, sulla quale sono riportati dei contrassegni per facilitare il reperimento delle verticali, oppure un nastro graduato.

La profondità a cui si trova di volta in volta il mulinello si legge sull'asta, graduata, in corrispondenza della posizione in cui si trova il mulinello, che può scorrere lungo l'asta.

Il mulinello si dispone con l'asse ortogonale alla sezione di misura, scelta in modo da poter trascurare l'angolo formato dall'asse del mulinello con la direzione del vettore velocità.

Misurazione tramite ponte o passerella

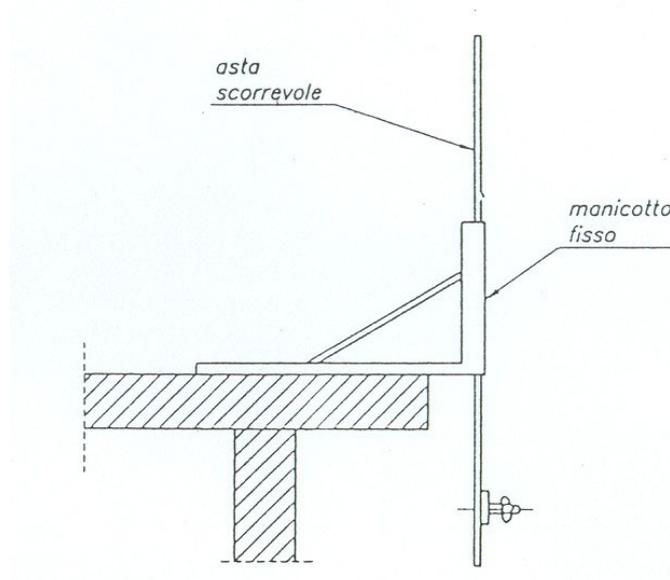


Figura 4.2.1.e Pertica per misure da passerella

La misurazione tramite passerella viene utilizzata quando le caratteristiche del corso d'acqua non permettono di eseguire le misure a guado; questa tecnica è stata adottata per eseguire la campagna di misure di portata lungo la rete del Consorzio, visto la presenza lungo i canali di ponti strada, ponti canale, passerelle, etc.

Quando si opera da una passerella o da un ponte si usa come supporto un manicotto fisso alla cui estremità scorre un'asta graduata (quella da noi utilizzata ha fondoscala di 5 m e sensibilità al cm). La sezione è materializzata dallo stesso manufatto dal quale si eseguono le misure e la posizione di ogni verticale si individua immediatamente con un nastro graduato.

Il mulinello viene agganciato nella parte inferiore dell'asta nella direzione opposta a quella della corrente e si orienta con l'asse perpendicolare alla sezione di misura utilizzando preferibilmente un'elica autocomponente.

Misurazione tramite teleferica

La teleferica è generalmente preferita per installazioni fisse, ma richiede un investimento considerevole e serve generalmente per larghezze non superiori a 200÷400 m.

Uno schema di teleferica è riportato nella figura 5.2.1.f

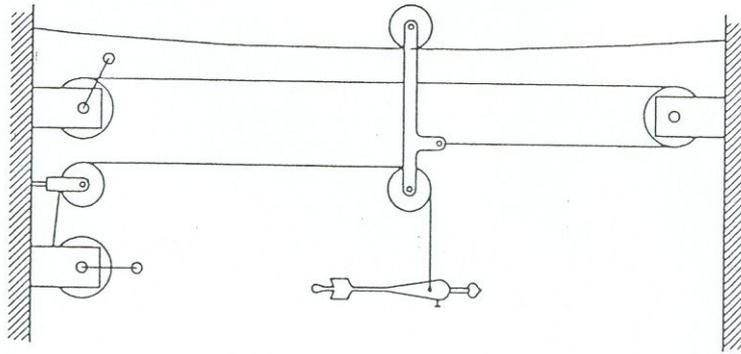


Figura 4.2.1.f Teleferica per misure con mulinello

Un carrello scorre sopra un primo cavo portante, teso in corrispondenza della prima sezione di misura.

Il carrello sostiene una puleggia, su cui passa un secondo cavo, fissato al pesce a un capo e all'argano all'altro.

Un terzo cavo, fissato a un altro argano, gira intorno a una puleggia sulla sponda opposta e quindi raggiunge il carrello, su cui è fissato.

Questo cavo, mantenuto in tensione dal peso del pesce, serve agli spostamenti orizzontali, mentre quello precedente serviva per gli spostamenti verticali.

Quando la larghezza del fiume è troppo grande (maggiore di 100 m) il terzo cavo è invece un cavo senza fine, perché il suo peso si opporrebbe al ritorno automatico del carrello.

Per rendere più agevole lo spostamento del pesce in orizzontale si ha in genere un solo argano a due tamburi, munito di un dispositivo di innesto, per cui il cavo al quale è appeso il pesce si avvolge automaticamente man mano che il carrello si avvicina alla sponda da cui si esegue la misura.

La posizione della verticale e la profondità del punto di misura si individuano attraverso lo srotolamento del cavo che trascina il carrello e quello del cavo elettroconduttore.

Misurazione con natante

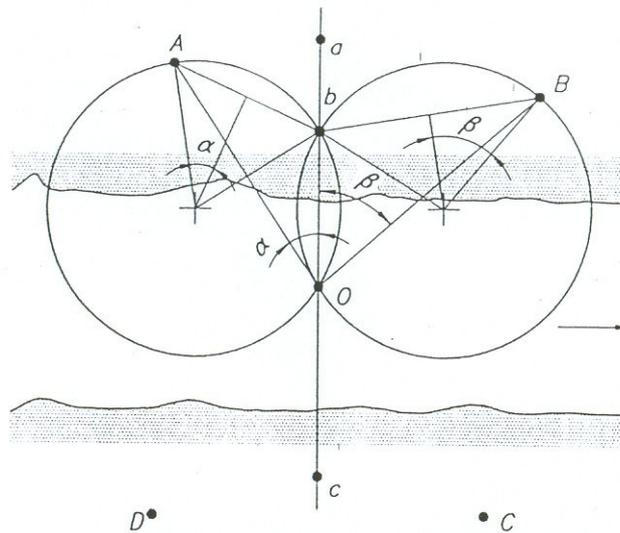


Figura 4.2.1.g Reperimento della posizione del natante

Quando non ci sono installazioni fisse utilizzabili e il corso d'acqua è troppo profondo per essere guadato le misure di velocità si eseguono da un natante.

La sezione si materializza, quando non è più larga di 300 m, per mezzo di un cavo teso tra le due sponde, sul quale sono fissati a intervalli dei contrassegni, che servono ad individuare le verticali lungo le quali si eseguono le misure.

Il natante si ancora al fondo oppure al cavo a seconda delle circostanze e comunque in modo da garantire sempre la massima sicurezza degli operatori.

Quando non è possibile tendere un cavo attraverso il corso d'acqua occorre determinare la posizione del natante per via strumentale.

Si materializza la sezione con tre picchetti (a , b e c), due su una sponda, rispetto ai quali si allinea il natante, e uno sull'altra.

Si dispongono inoltre altri quattro punti di riferimento (A , B , C e D), due su una sponda e due sull'altra. fig.4.2.1.g

Il punto O in cui si trova il natante si può sempre definire come l'intersezione di due cerchi, per individuare ciascuno dei quali sono necessari tre punti.

Le distanze tra i punti a terra sono note, perché si effettua un rilievo topografico preliminare dei picchetti e dei punti di riferimento.

Gli angoli α e β sono uguali ai corrispondenti angoli alla circonferenza Aob e bOB , che si misurano con un apposito strumento dal natante. In linea di principio le misure di due angoli basterebbero.

Per tenere sotto controllo gli errori si misurano in genere un anche un terzo e un quarto angolo, utilizzando il picchetto c e i due picchetti di riferimento C e D posti sull'altra sponda.

4.2.2 Altri metodi di misurazione della portata

Misure di portata con metodi chimici

La portata di un certo corso d'acqua si può misurare versando nella corrente una certa quantità di un prodotto chimico assente in condizioni naturali e analizzando quindi dei campioni d'acqua prelevati da una sezione a valle, nei quali il prodotto è presente in concentrazione diversa a seconda della portata.

Descriviamo qui molto brevemente due di questi metodi.

Il primo metodo consiste nel versare, a portata costante, una soluzione concentrata di un prodotto chimico nel corso d'acqua.

Se il rimescolamento dell'acqua tra il punto di immissione e quello di prelievo dei campioni è completo, la concentrazione c è la stessa in tutti i punti della sezione di prelievo, una volta raggiunta la situazione di regime, legata alla concentrazione C della soluzione iniziale, alla portata di immissione q e alla portata del corso d'acqua Q dalla relazione (approssimata ma del tutto corretta, perché q è assolutamente trascurabile di fronte a Q)

$$(1) \quad Q = q \cdot C / c$$

che esprime il principio di conservazione di massa.

Il prodotto chimico comunemente adoperato per queste misure è il bicromato di sodio.

La portata di immissione q è mantenuta costante con qualche artificio; il più semplice è di tener costante il livello del recipiente di alimentazione per mezzo di un dispositivo a sfiore. Fig 4.2.2.a

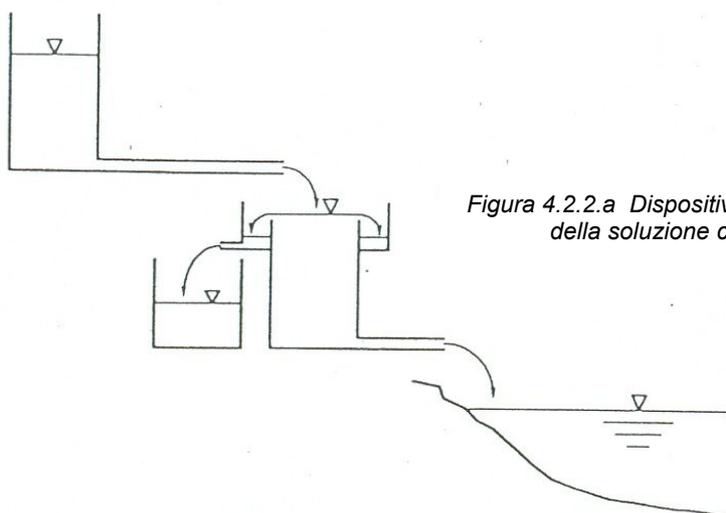


Figura 4.2.2.a Dispositivo a sfiore per l'immissione a portata costante della soluzione concentrata per la misura della portata

La durata dell'immissione deve essere ampiamente sufficiente a garantire il raggiungimento della situazione di regime. Per stabilire con sicurezza la durata si effettua una prova preliminare, versando nella corrente, all'altezza del punto di immissione, qualche grammo di fluorescina sciolto in un litro di soluzione ammoniacale. La durata dell'immissione si assume uguale alla somma del tempo impiegato dalla chiazza di fluorescina per raggiungere la sezione di prelievo e di quello impiegato per attraversarla, aumentato di circa 20 minuti.

I campioni si prelevano in diversi punti della sezione e in più istanti successivi, per controllare che la situazione di regime sia stata effettivamente raggiunta e che la diluizione sia uniforme nello spazio.

La misura della concentrazione c , che è dell'ordine di qualche milligrammo per litro, si effettua con un metodo colorimetrico: si versa nel campione di soluzione diluita un reagente che ne provoca la colorazione e si passa quindi il campione al *colorimetro*, uno strumento che misura il grado di assorbimento di un fascio di luce attraversante il liquido.

Il valore della concentrazione c si determina per mezzo della curva di taratura del colorimetro, preparata con campioni di concentrazione nota, che fornisce la concentrazione della soluzione in funzione dell'assorbimento.

Il secondo metodo consiste nel versare nel corso d'acqua, in un modo qualunque, un volume noto V di soluzione a concentrazione C e nel prelevare nella sezione di misura una successione di campioni tali da poter costruire con buona precisione il grafico che dà l'andamento nel tempo della concentrazione c .

Indicando con $(0, T)$ un intervallo di tempo con inizio a un istante precedente l'arrivo della soluzione alla sezione di misura e abbastanza lungo da contenere tutto il periodo in cui la concentrazione c è diversa da zero, per il principio di conservazione della massa deve valere la relazione

$$(2) \quad VC = Q \int_0^T c dt$$

Eseguendo il calcolo dell'integrale si può ricavare il valore della portata Q .

È assolutamente necessario che la concentrazione c sia la stessa in ogni punto della sezione trasversale e che non si abbia nessuna perdita della sostanza in soluzione tra il punto di immissione e la sezione di prelievo.

L'adozione dei metodi chimici è fortemente limitata dalla spesa per l'acquisto del prodotto chimico, che cresce proporzionalmente con la portata da misurare.

Misure di portata con galleggianti

Quando per qualsiasi ragione non è possibile eseguire le misure di velocità con il mulinello o con un altro metodo ugualmente preciso, torna utile eseguire delle misure di velocità superficiale con dei galleggianti.

Di uso frequente sono i galleggianti semplici, generalmente formati di sfere metalliche cave o tavolette, che si gettano nei canali per tratti rettilinei in modo che dal tempo t impiegato a percorrere una data lunghezza s è possibile dedurre la velocità del galleggiante $v=s/t$ e quindi della corrente.

Per ottenere il valor medio della velocità superficiale occorre eseguire delle misure di velocità a diversa distanza dalla riva.

Si pone dunque il problema di misurare sia la velocità sia la distanza.

Si sceglie un tratto del corso d'acqua che sia il più regolare possibile e nel quale i filetti liquidi si possano ritenere rettilinei e paralleli e si dispongono quattro picchetti **A**, **B**, **C** e **D** due su una riva e due su quella opposta, in modo che si trovino ai vertici di un rettangolo. Fig 4.2.2.b

Le osservazioni richiedono l'impiego temporaneo di due persone, disposte sulla stessa riva accanto ai due picchetti **A** e **B**.

L'osservatore appostato accanto al picchetto **A** (a monte) dà un segnale quando il galleggiante - che può anche essere uno dei tanti oggetti portati dalla corrente durante una piena - si trova nel punto **a**, sulla linea AD. L'osservatore posizionato accanto al picchetto **B** (a valle), deve essere munito di due cronometri, coi quali misura sia il tempo t impiegato dall'oggetto ad andare da **a** a **b** (che si trova sulla linea BD) sia il tempo T impiegato per andare da **a** a **c** (che si trova sulla linea BC).

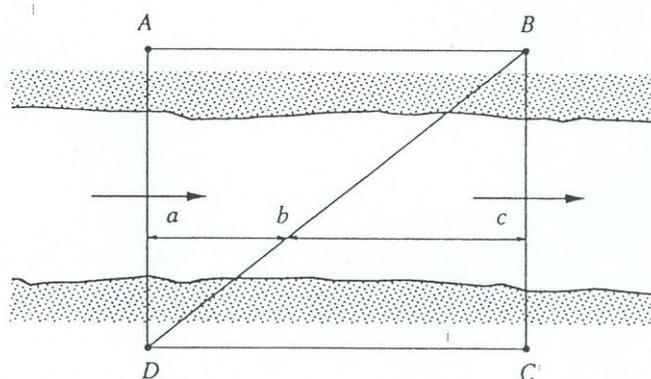


Figura 4.2.2.b Misura di velocità superficiale con il metodo del galleggiante

Poiché i due triangoli ABD e abD sono simili, la distanza aD è data dall'espressione

$$(3) \quad aD=AD(ab/AB)$$

Assumendo i tempi proporzionali alle distanze percorse (si assume la velocità costante nel tratto ac), risulta

$$(4) \quad ab=ac(t/T)=AB(t/T)$$

sostituendo l'espressione di ab fornita dalla (4) nella (3), si ottiene l'espressione che definisce la distanza

$$(5) \quad aD=AD(t/T)$$

La velocità v del galleggiante nel tratto ac, che si assume costante, è fornita dal rapporto

$$(6) \quad v=AB/T$$

In realtà le velocità non sono costanti lungo le traiettorie. Per minimizzare gli errori, quindi, le velocità misurate si assegnano alla sezione trasversale equidistante dai picchetti A e B. Si costruisce poi il grafico rappresentante la distribuzione delle velocità superficiali nella sezione e si determina, con un'integrazione grafica o con altro metodo, il valor medio V_s della velocità superficiale.

Misure di portata tramite idrometri

L'idrometro è lo strumento per la misura del livello dell'acqua o altezza idrometrica nei corsi d'acqua, in funzione del quale si determina la portata. L'idrometro più semplice è l'asta idrometrica. Si tratta di un'asta graduata, disposta per lo più verticalmente, lunga abbastanza da restare immersa nell'acqua anche quando il livello è eccezionalmente basso e visibile anche quando è eccezionalmente alto, solidamente fissata a una sponda, per esempio alla spalla di un ponte o a un muro di protezione.

L'asta idrometrica può essere materialmente divisa in più segmenti separati, fissati in posizioni diverse, in modo da poter seguire l'escursione dei livelli senza difficoltà di lettura.

Teoricamente lo zero dell'idrometro dovrebbe trovarsi a una quota tale per cui le misure di livello siano sempre positive, anche nel caso delle magre più eccezionali.



Figura 4.2.2.c Esempio di idrometro presente nella rete del CIC

Quando ciò non succede la parte della scala che resta al disotto dello zero è graduata con valori negativi.

In ogni caso si prende sempre nota della quota dello zero idrometrico rispetto ad un caposaldo topografico posto al sicuro dalle piene, così in caso di distruzione dell'idrometro si può provvedere alla sua sostituzione senza dover determinare di nuovo la scala delle portate.

Requisito essenziale per la sezione in cui si installa l'idrometro è la stabilità dell'alveo, senza la quale la costanza della scala delle portate non può essere garantita.

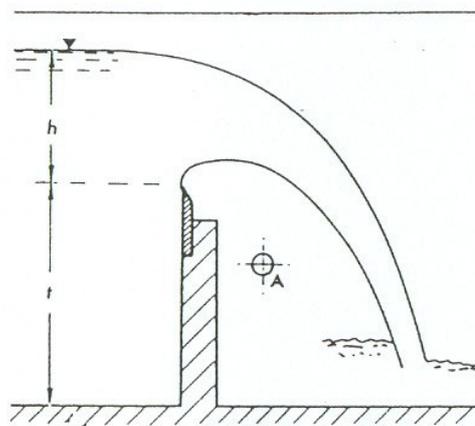
Misure di portata con stramazzi

Col nome di stramazzi vengono indicate le luci a battente nullo, quelle cioè il cui contorno non sia completamente lambito dalla vena effluente.

Essi sono generalmente impiegati come misuratori di portata per le correnti a pelo libero e diffusi nelle reti di distribuzione irrigua.

Lo stramazzo più diffuso è il cosiddetto *stramazzo Bazin*, rettangolare, con contrazione completa alla base e contrazione soppressa sui fianchi. fig 4.2.2.d

Figura 4.2.2.d Stramazzo Bazin



Il tratto di canale in cui lo stramazzo va inserito deve essere rettangolare; lo stramazzo stesso è costituito da una traversa di norma in muratura, sormontata da una lama metallica con bordo superiore a spigolo vivo.

Questa lama è la base della luce rettangolare, larga L come la sezione trasversale del canale, mentre i fianchi sono costituiti dalle stesse pareti del canale, ed è proprio per questo motivo che non c'è contrazione della vena sui fianchi.



Figura 4.2.2.e Esempio di Stramazzo presente sulla rete del CIC

L'equazione dello stramazzo rettangolare per il calcolo della portate è la seguente:

$$Q = \mu_s L h (2gh)^{1/2}$$

Dove **L** è la base della luce rettangolare, **h** è il carico dello stramazzo (dislivello fra il bordo inferiore della luce e la quota del pelo d'acqua nel canale d'arrivo), **g** è l'accelerazione di gravità e μ_s il coefficiente dello stramazzo.

Misuratore (o modellatore) a risalto

Questo strumento, atto alla misurazione della portata d'acqua nei canali a pelo libero, è costituito da:

- un imbocco graduale che non dà luogo a contrazione e a perdita di carico localizzata notevoli. Si tratta di un tronco di canale a sezione convergente ottenuto o mediante una strozzatura trasversale, derivante da accostamento delle sponde, o mediante una soglia di fondo, oppure anche accoppiando i due sistemi.
- un tratto prismatico intermedio in corrispondenza della strozzatura, abbastanza lungo perché la sezione critica cada in esso, e in modo da formare un risalto idraulico all'estremità del dispositivo.
- un tronco di sezione divergente (allargamento) abbastanza graduale.

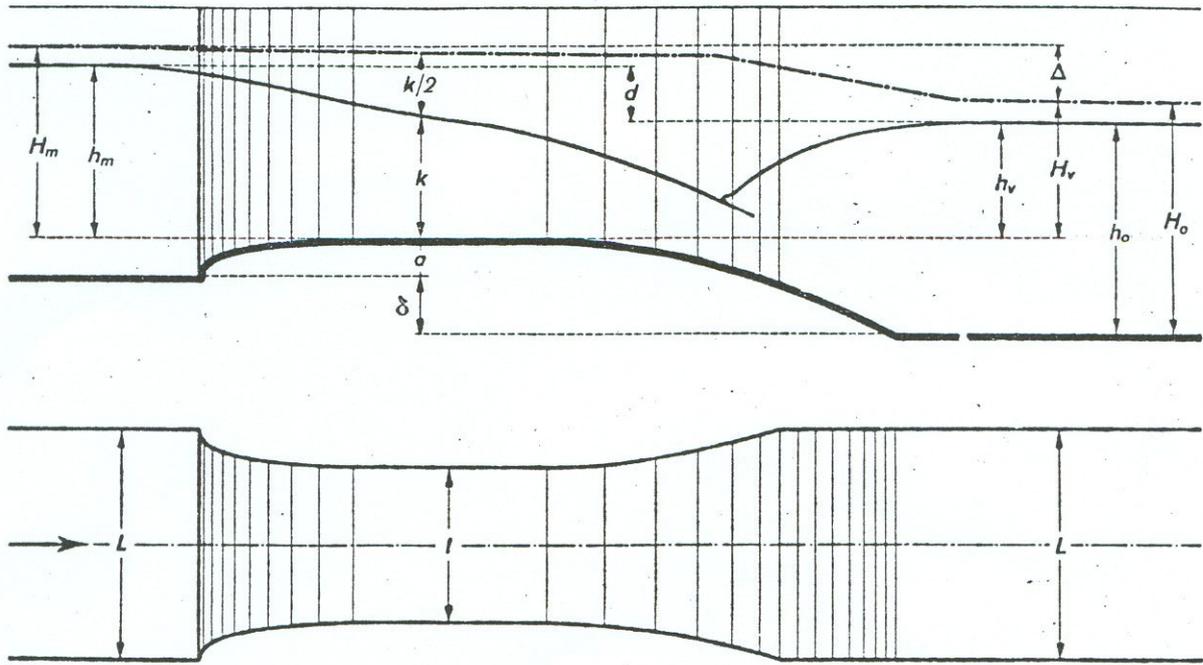


Figura 4.2.2.f Grandezze caratteristiche di un modellatore a Risalto

Diamo nella fig 4.2.2.f lo schema più generale di un modellatore a risalto; i simboli utilizzati sono:

L : larghezza del canale a monte del misuratore;

l : larghezza del misuratore nella sezione ristretta;

$r=l/L$: rapporto di strozzamento;

a : altezza della soglia sul fondo del canale d'arrivo;

δ : dislivello fra le quote di fondo del canale d'arrivo e quello di partenza;

h_m : carico a monte;

h_v : sommergenza;

h_o : profondità dell'acqua nel tratto a valle;

H_m, H_v : distanza, dal piano di fondo della soglia, della linea dei carichi totali, a monte e a valle del risalto;

Δ : perdita di carico richiesta per il funzionamento del modellatore;

d : dislivello fra i peli liquidi (perdita di quota);

k : profondità dell'acqua nella sezione di controllo $k=(q^2/gl^2)^{1/3}$ q : portata generica;

Figura 4.2.2.g Esempio di misuratore a risalto presente nella rete del CIC



Il misuratore a risalto gode inoltre delle seguenti proprietà: può essere considerato un semimodulo, un dispositivo atto a lasciar defluire una portata dipendente dal livello del pelo liquido nel tratto a monte di esso ma indipendente da quello a valle. Una seconda prerogativa è quella della grande praticità di possedere una relazione univoca fra le portate erogate e i carichi a monte o, in altri termini, un'unica scala di portata valevole in ogni circostanza.

Altra caratteristica che può rendere pregevole l'adozione nelle reti irrigue di tale strumento è il fatto di richiedere, per la misura, una piccola perdita di quota fra i due peli liquidi a monte e a valle; si può anzi dire che questa dote sia indispensabile in tutte le situazioni più frequenti delle irrigazioni di pianura, dove i dislivelli disponibili sono di regola assai limitati, e quindi limitate le pendenze.

4.2.3 Caratteristiche della strumentazione utilizzata per le misure di portata sulla rete del CIC



Scheda tecnica

Elica: Ø 120 mm – passo 60 mm

Sensibilità: 0,05 m/s

Velocità max: 5 m/s

Mulinello: Dimensioni 120 x 290 mm

Peso 1,200 Kg

Contatore: frequenza max di conteggio 25 giri/s

Indicatore numerico a 4 cifre

Azzeramento manuale

Alimentazione: 4 batterie da 1,5 V

Precisione $\pm 0,1$ s

Temperatura di funzionamento $-5^{\circ} \div +45^{\circ}$

Preselezione del giro

Dimensioni 110 x 130 x 40 mm

Peso (completo di batterie) 1,050 Kg

Principio di funzionamento del mulinello

L'elica del mulinello è trascinata in rotazione dalla corrente dell'acqua: ogni mezzo giro viene azionato un contatto ed il corrispondente segnale viene acquisito dal contatore.

Ottenuto il numero di giri dell'elica al secondo, dalle tabelle di taratura si ottiene la velocità.

La taratura consiste nel tracciamento per punti delle curve che rappresentano queste funzioni: esse recano in ascisse il numero di giri ed in ordinate la velocità in m/s.

La teoria del mulinello ci fornisce una relazione tra la velocità V della corrente ed il numero di giri n del mulinello attraverso le costanti dello strumento: $V=an+bn^2+c$ dove a rappresenta il passo geometrico dell'elica, mentre b e c sono funzioni degli attriti.

Per velocità superiori al m/s è possibile trascurare gli attriti di movimento, ottenendo così una proporzionalità diretta $V=an$.

Tabelle di taratura del mulinello

Riportano i valori della velocità lineare V in m/s in funzione della velocità di rotazione N dell'elica (giri/s). Se si usa un contatore a preselezione si deve dividere il numero di giri per il tempo di rilevazione in secondi allo scopo di ottenere il valore N , calcolandone anche i primi due decimali.

Si cerca poi la tabella (presente in letteratura) relativa alla parte intera di N ed in essa si trova il valore di V cercato, all'incrocio tra la riga dei decimi di N e la colonna dei centesimi di N .

ESEMPIO

Si sia impostato un tempo di 100 s e lo strumento abbia contato 234 giri. In tal caso è $N=2,34$.

Nella tabella $N=2$, all'incrocio tra la riga $N/10=3$ e la colonna $N/100=4$, si trova il valore $V=0,595$ m/s

$N=2$

$N/100$

$N/10$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	0,595	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Le equazioni di taratura utilizzate sono le seguenti:

- **$V = N \times 0,2514 + 0,0070$ per N compreso tra 0,10 e 9,03**
- **$V = N \times 0,2575 - 0,048$ per N compreso tra 9,03 e 16,00**

e sono state dedotte dai risultati di taratura individuali di un elevato numero di eliche, presso l'Istituto di Idraulica dell'Università di Padova e dalla Stazione di Taratura del Servizio Idrologico Nazionale di Berna (CH) con asta cilindrica \varnothing 20 mm.

Le tabelle forniscono valori con scarti inferiori all'1% rispetto ai valori individuali di taratura nel campo 0-5 m/s.

Per la campagna di misure effettuate per il CIC il processo di calcolo di V , sopra citato, e quindi della corrispondente portata Q , è stato realizzato utilizzando un apposito software messo a disposizione dalla ditta fornitrice del mulinello, contenente all'interno della sua banca dati le equazioni di taratura dello strumento.

Inserendo nel software i dati caratteristici della sezione (lunghezza, profondità, numero di verticali) e il numero di giri relativo ad ogni punto esplorato, si ricavano la velocità media dell'acqua e la corrispondente portata.

Il software ricava una portata per unità di larghezza q , attraverso un modello matematico che consente di calcolare l'area sottesa alla curva velocità – profondità per ciascuna verticale esaminata. La portata totale transitante nella sezione liquida è data dalla sommatoria delle q moltiplicate per la distanza progressiva fra le verticali (Δl).

Capitolo 5 Bilancio idrico della rete irrigua cremonese

5.1 Finalità e problemi operativi e tecnici

L'obiettivo del lavoro è la valutazione delle perdite di condotta per infiltrazione nella rete del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, essenzialmente prodotte nei tratti di alveo in terra o comunque non rivestiti con superfici da potersi ritenere impermeabili.

Il lavoro consiste quindi nel suddividere la rete del Consorzio (in sigla CIC) in tronchi ove sia possibile disporre di sezioni dotate di edificio di misura (risalto, stramazzo, soglia con scala di portata, ecc.) oppure dove sia possibile effettuare misure dirette con mulinello. Per quest'ultimo aspetto è necessaria, innanzitutto, la presenza di una struttura fissa, che consenta l'attraversamento del cavo (passerella, ponticello, ecc.); la sezione, inoltre, deve essere regolare e posizionata in un punto dove non siano presenti situazioni di significativa perturbazione della corrente (curve, ostacoli, cambiamento di sezione, edifici di derivazione, ecc.).

Un problema pratico non di poco conto e che, quindi, riteniamo di segnalare, è la necessità di intervenire, ad ogni misura, nella riduzione della vegetazione acquatica, sviluppatasi nell'intorno della sezione con particolare vigore e velocità grazie ai fattori meteorologici estivi, particolarmente favorevoli. Questo comporta la necessità di coordinare ad ogni uscita l'intervento di uomini (i *campari*) e di mezzi del Consorzio per eseguire tale operazione, immediatamente prima del giorno della misura.

La necessaria, seppur minima, programmazione ha limitato il numero delle uscite, complice l'eccezionalità della stagione che ha comportato un aggravio del lavoro del personale del Consorzio, dovendo gestire la rete in regime costantemente parzializzato e regolato quasi quotidianamente.

Alcune situazioni imprevedibili hanno aggiunto altre difficoltà; da qui ne consegue una quota di uscite che non hanno prodotto il risultato atteso e che quindi sono state riprese.

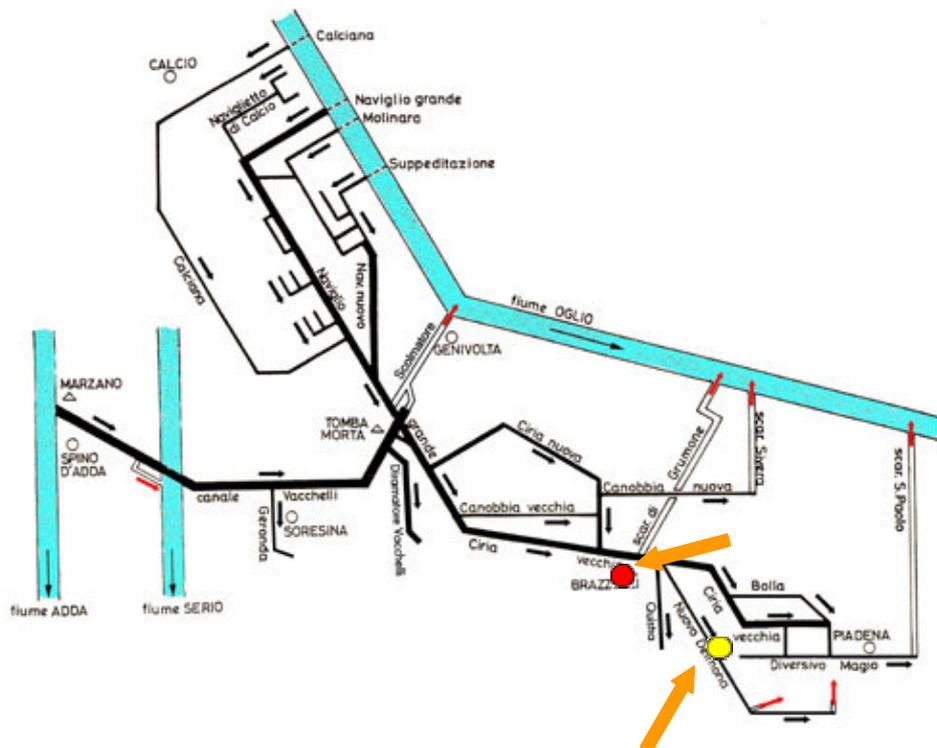
Un'attenzione particolare si è dedicata alla sorveglianza dell'andamento dei livelli in ogni tronco di canale durante le operazioni di misura: è infatti sostanziale che il tirante, nella sezione iniziale, rimanga costante così come costanti e controllati devono essere garantiti i livelli delle portate rilasciate da quel tronco durante tutto il tempo necessario alle misure, le quali, in alcuni casi, possono durare l'intera giornata.

Una difficoltà imprevedibile è stata la particolarissima stagione meteorologica caratterizzata da una quasi assoluta mancanza di precipitazioni da dicembre 2002 ad agosto 2003 inoltrato; assenza di apporto meteorico alla quale si sono aggiunti il mancato completamento degli invasi del

lago d'Iseo e di Como e l'eccezionale protrarsi di temperature atmosferiche ed irraggiamento solare assolutamente eccezionali, verificatisi già dal mese di maggio. Il lavoro è stato quindi condotto con un regime ridotto sia dei canali sia delle erogazioni.

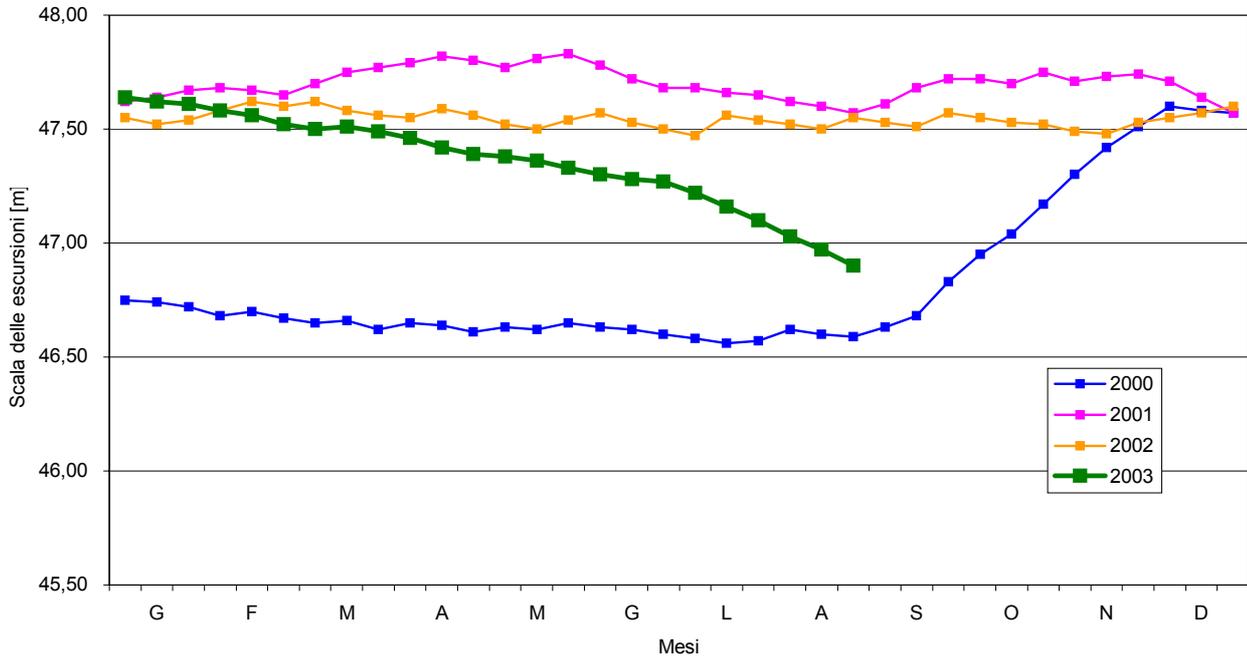
A questo proposito è necessario sottolineare che, relativamente al problema delle perdite per infiltrazione, il tirante d'acqua in ogni tronco è stato sempre prossimo, durante le misure, al tirante massimo, pur trasportando minori portate, sia per effetto dei rigurgiti, mantenuti lungo la rete, al fine di rendere adeguato e stabile il livello di alimentazione delle derivazioni, sia per effetto dell'abnorme sviluppo della vegetazione.

La stagione, eccezionalmente povera di precipitazioni, ha senz'altro concorso ad esaltare il fenomeno delle perdite per filtrazione. L'esame di alcune misure freatiche, condotte dal Consorzio di bonifica Dugali in punti idrologicamente vicini alla rete del CIC, mostrano, infatti, livelli piezometrici particolarmente depressi nel corso del 2003 rispetto ai due anni precedenti. Si può quindi concludere che la particolare soggiacenza della falda freatica ha senz'altro concorso ad esaltare il fenomeno delle perdite per filtrazione nonché degli eventuali impinguamenti per drenaggio; la situazione, da questo unico punto di vista, è senz'altro favorevole!

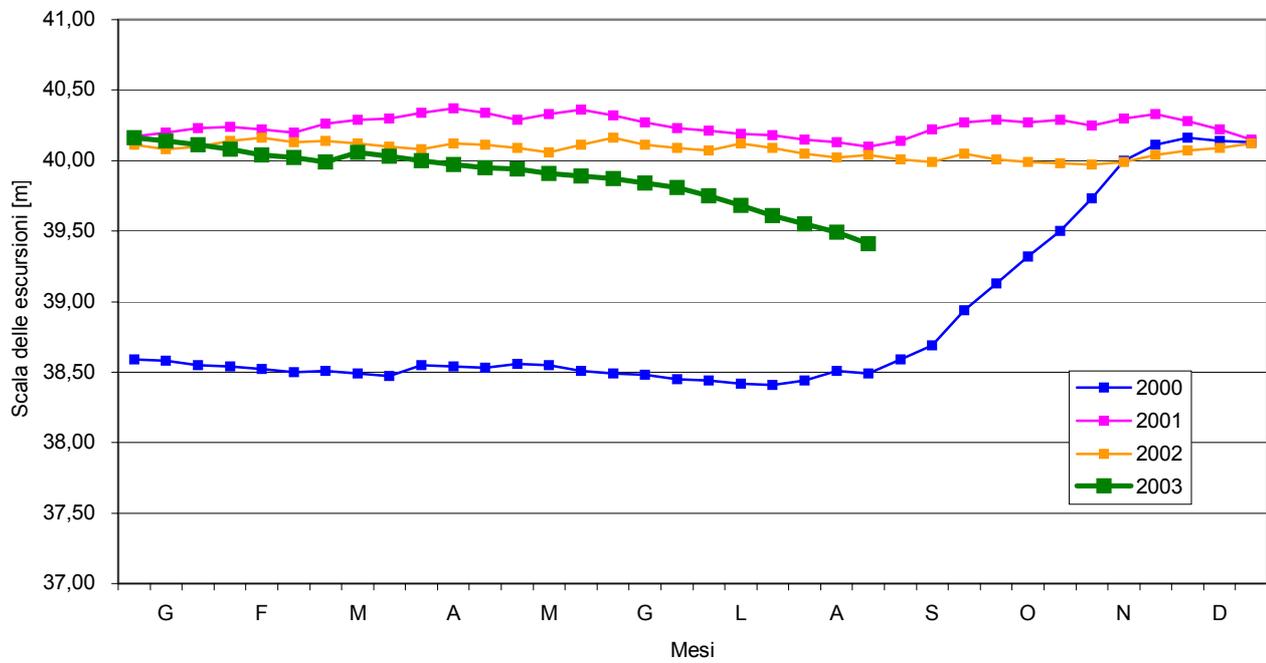


- **Piezometro N°6 – Loc. S. Sillo quota 48,25m**
- **Piezometro N°10 – Loc. Ca' de' Sfrondati quota 41,14m**

FREATIMETRO
n6 - Loc.S.Sillo quota 48,25



FREATIMETRO
n.10 - Loc.Ca' de' Sfronati quota 41,14



5.2 Bilancio di un canale

Per raggiungere il nostro scopo, cioè valutare l'efficienza della rete idrica del CIC, abbiamo così operato.

Innanzitutto si è spezzata la rete in tronchi di canale definiti in base alla possibilità di individuarne: una sezione di ingresso, una sezione di uscita, le caratteristiche idrauliche, i punti di alimentazione con le relative misure, la sorveglianza dei livelli durante le misure.

Le misure effettuate alle estremità del tronco costituiscono l'elemento necessario per chiudere, nel tratto, il bilancio di massa.

Alcune situazioni hanno comportato grandi difficoltà di elaborazione dei dati, altre zone della rete, invece, si sono rivelate poco idonee a dare risultati di facile lettura, soprattutto nel comparto inferiore.

Sebbene non siamo riusciti a trovare in letteratura esempi di bilanci su canali, riferendoci ad un lavoro simile fatto dal CIC nel 1992 e basandoci su conoscenze idrauliche - idrologiche abbiamo dedotto uno schema di bilancio. Figura 5.2.a

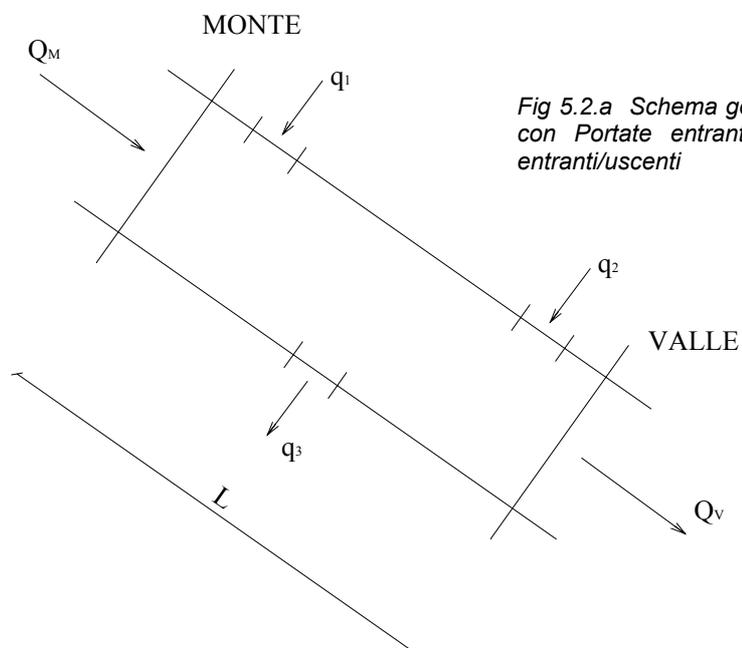


Fig 5.2.a Schema generale di un canale con Portate entranti/uscenti e bocche entranti/uscenti

In sintesi il problema è così posto:

si consideri un canale campione che presenti le seguenti caratteristiche:

- deve essere possibile eseguire misure di portata a monte (Q_m) e a valle (Q_v) del tratto di canale, quindi devono esservi due sezioni ove sia possibile la misura, sia effettuata con mulinello oppure per la presenza di un misuratore;
- Q_m e Q_v siano costanti nell'intervallo di tempo in cui si effettuano le misure di portata;
- deve essere nota la lunghezza del tratto considerato, nonché le sue caratteristiche idrauliche significative per gli scopi del lavoro;
- se lungo il tratto del canale ci sono bocche che immettono o captano acqua è necessario conoscerne ogni singola portata (q_i).

Per ogni bocca si effettua la lettura dell'idrometro corrispondente e si riporta il dato rilevato (altezza dell'acqua) sulla relativa scala delle portate.

$$Q = Ac(R i)^{1/2}$$

In questo modo è possibile conoscere ad ogni istante quanta acqua transita da ogni bocca.

Il bilancio di un canale diventa quindi una sommatoria di tutti gli elementi in gioco che tiene conto, con opportuni segni, del fatto che nelle bocche l'acqua può essere immessa o prelevata.

Se si considera un **canale ideale** che opera con la massima efficienza senza perdite si avrà:

$$Q_v = Q_m + \sum \delta_i q_i \quad \delta_i = 61$$

La situazione **reale** invece è:

$$Q_v < Q_m + \sum \delta_i q_i \quad \delta_i = 61$$

Questo significa che la portata è diminuita, cioè ci sono state delle perdite, lungo il tratto L considerato.

Le **perdite** (P) sono quindi quantificabili ed è possibile stimarne l'entità:

$$P = (Q_m + \sum \delta_i q_i) - Q_v \quad \delta_i = 61$$

Si presenta ora il problema di valutare la tipologia di tali perdite.

Si possono distinguere in:

- perdite dovute al fenomeno dell'infiltrazione I ;
- perdite dovute al fenomeno dell'evaporazione E_p (che nel nostro caso specifico riterremo essere trascurabili)

L'espressione finale del bilancio dovrebbe dunque essere:

$$Q_v = Q_m + \sum \delta_i q_i - I \quad \delta_i = 61$$

Il metodo sopradescritto, seppur riferito ad un canale campione, è facilmente applicabile a tutti i canali delle rete da noi considerati (Canale Vacchelli, Rete del Condominio Pallavicino).

Viene riportata di seguito una tabella riassuntiva di tutti i canali analizzati con le rispettive sezioni a monte e a valle scelte per effettuare le misure.

Nome Canale	Data	Sezione MONTE	Sezione VALLE	Lunghezza Tratto <i>Km</i>
Vacchelli	13/06/03	Pass. pontecanale sul Serio Crema	Passerella cascina Stadiotti Tombe Morte (Genivolta)	13,518
Vacchelli	17/06/03	Pass. sifone Libera Spino d'Adda	Pass. pontecanale sul Serio Crema	18,715
Vacchelli	09/06/03	Pass. sifone Libera Spino d'Adda	Pass. pontecanale sul Serio Crema	18,715
Vacchelli	09/07/03	Pass. pontecanale sul Serio Crema	Passerella cascina Stadiotti Tombe Morte (Genivolta)	13,518
Vacchelli	05/09/03	Pass. pontecanale sul Serio Crema	Pass. bocca Galotta Castelletto Barbò (Cumignano s. N.)	12,100
Calciana	29/07/03	Presa Calcio	Passerella bocca Bobbio Torre Pallavicina	3,405
Calciana	29/07/03	Pontestrada c.na Muracche Fontanella	Immissione nel Naviglio Grande Soncino	5,180
Calciana	17/04/03	Pontestrada Castelcicala Calcio	Passerella bocca Bobbio Torre Pallavicina	3,405
Calciana	17/04/03	Pontestrada c.na Muracche Fontanella	Immissione nel Naviglio Grande Soncino	5,180
Calciana	29/05/03	Passerella bocca Bobbio Torre Pallavicina	Immissione nel Naviglio Grande Soncino	5,180
Calciana	15/09/03	Presa Calcio	Passerella bocca Bobbio Torre Pallavicina	3,405
Calciana	15/09/03	Passerella bocca Bobbio Torre Pallavicina	Immissione nel Naviglio Grande Soncino	5,180
Naviglio Nuovo	29/07/03	Pontestrada delle Sabbie Torre Pallavicina	Immissione nel Naviglio Grande Cumignano s. N.	11,550
Naviglio Grande	29/07/03	Presa Calcio	Passerella Gorgo Rotondo Cumignano s. N.	18,600
Naviglio Grande	30/07/03	Passerella sifone Gabriela Tredici Ponti (Genivolta)	Pontecanale al Km 32,300 Casalbuttano	9,830

Nome Canale	Data	Sezione MONTE	Sezione VALLE	Lunghezza Tratto
Naviglio Grande	05/09/03	Passerella sifone Gabriela Tredici Ponti (Genivolta)	Pontecanale al Km 32,300 Casalbuttano	9,830
Ciria Vecchia	07/08/03	Ponte Mainardi Grontardo	Pass. Bocca Balzemino Pescarolo	3,960
Nuovo Delmona	07/08/03	-	Pontestrada al Km 1,030 Vescovato	-
Ciria Nuova	31/07/03	Misuratore Mirabello (Casalmorano)	Pass. Bocca Fiammena Olmeneta	10,045
Canobbia Nuova	31/07/03	-	Passerella cascina Mainardina Olmeneta	
Ciria Vecchia	07/08/03	-	Pontestrada monte b. Ponte di Rialto Villanuova Brazzuoli (Pozzaglio)	

Riteniamo sia importante sottolineare che le misure di portata effettuate nel periodo dedicato ai sopralluoghi all'interno delle campagne cremonesi (da aprile a settembre 2003) sono di numero maggiore a quelle sopra riportate: in totale 36 sezioni esaminate.

I motivi che hanno portato a ritenere di dovere "scartare" alcune misure fatte e a non considerarle nel bilancio sono diversi: in alcuni casi (ad esempio Vacchelli in data 28/07/03) le cattive condizioni meteorologiche hanno invalidato le prove; in altre situazioni la difficoltà di reperibilità di dati relativi a bocche rigurgitate (ad esempio il Bolla nel caso della Ciria Vecchia del 20/06/03) non ci hanno permesso di completare la relativa analisi del canale. Infine alcune misure (Cavo di Suppedizione e Molinara) sono state fatte solo per verifica e non ai fini di un bilancio.

Viene riportato quindi nella tabella sottostante l'elenco dei tratti di canale non considerati a testimonianza del fatto che il lavoro è stato nel complesso consistente e non semplice.

Nome Canale	Data	Sezione MONTE	Sezione VALLE
<i>Vacchelli</i>	28/07/03	Passerella sifone Libera Spino d'Adda	Pass. pontecanale sul Serio Crema
<i>Naviglio Grande</i>	25/06/03	Passerella Gorgo Rotondo Cumignano s. N.	Passerella sifone Gabriela Tredici Ponti (Genivolta)
<i>Ciria Vecchia</i>	20/06/03	Ponte Mainardi Grontardo	Ponte bocca Maltagliato Vescovato
<i>Ciria Vecchia</i>	20/06/03	Passerella presa Bolla Cicognolo	Ponte Dossi Cicognolo

Nome Canale	Data	Sezione MONTE	Sezione VALLE
<i>Cavo di Suppeditazione</i>	08/08/03		Pontecanale Basse II Torre Pallavicina
<i>Molinara</i>	08/08/03		Pontecanale roggia Campino Pumenengo

5.3 Sezioni considerate

Per effettuare il bilancio delle rete idrica del CIC si sono scelte lungo i canali principali le sezioni sulle quali eseguire le misure di portata con il mulinello.

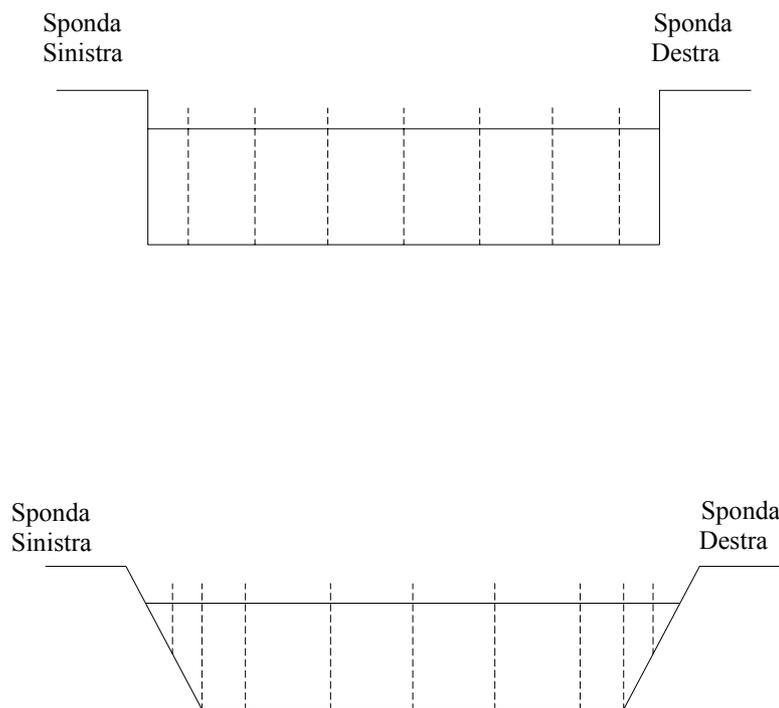
Si è cercato di selezionare zone in cui fosse possibile un confronto diretto con un idrometro; spesso si sono presentate circostanze favorevoli all'esecuzione delle misure altrove.

Passerelle, pontistrada, ponticanale sono stati i luoghi ideali dove operare. Era necessario infatti avere un solido punto d'appoggio per la strumentazione che fosse facilmente raggiungibile.

Viene riportato di seguito l'elenco completo di tutte le sezioni considerate nel bilancio e sulle quali si sono eseguite le misure di portata con il mulinello. Per ogni sezione è riportata una descrizione generale accompagnata da una fotografia scattata durante il lavoro.

Si specifica inoltre la geometria dell'alveo del canale in quel punto:

a forma rettangolare e trapezoidale:



Conoscere a priori la forma dell'alveo è stato utile per la determinazione e il posizionamento delle verticali (linee tratteggiate) necessarie al campionamento dell'intera sezione. Viene riportata di seguito una tabella riassuntiva di tutti i canali analizzati con le rispettive sezioni a monte e a valle.

Sezioni esaminate

Canale VACCHELLI

Sezione:

Passerella al sifone Libera

Km 1,285

Località:

Spino d'Adda



Larghezza del canale: 24,000 m

Numero verticali esaminate: 11

Alveo : canale a forma rettangolare
fondo e sponde in rivestito in calcestruzzo

Canale VACCHELLI

Sezione: **Passerella al pontecanale sul Serio
Km 20,000**

Località: **Crema**



Larghezza del canale: 13,030 m
Numero verticali esaminate: 9
Alveo: canale a forma rettangolare
sponde e fondo in calcestruzzo

Canale VACCHELLI

Sezione:

Passerella alla cascina Stadiotti

Km 33,518

Località:

Tombe Morte (Genivolta)



Larghezza del canale: 14,550 m

Numero verticali esaminate: 11

Alveo: canale a forma trapezoidale
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale CALCIANA

Sezione:

Passerella a valle della bocca Bobbio

Km 7,810

Località:

Torre Pallavicina



Larghezza del canale: 3,590 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde e fondo in calcestruzzo

Canale CALCIANA

Sezione:

Pontestrada alla cascina Muracche

Km 10,060

Località:

Fontanella



Larghezza del canale 2,520 m

Numero verticali esaminate 6

Alveo: canale a forma trapezoidale
 fondo e sponde in calcestruzzo

Canale NAVIGLIO GRANDE

Sezione:

**Passerella al Gorgo Rotondo
Km 18,600**

Località:

Cumignano s. N.



Larghezza del canale: 13,040 m

Numero verticali esaminate: 9

Alveo: canale a forma rettangolare
fondo e sponde in calcestruzzo

Canale NAVIGLIO GRANDE

Sezione:

**Passerella al sifone Gabriela
Km 22,470**

Località:

Tredici Ponti (Genivolta)



Larghezza del canale: 10,600 m

Numero verticali esaminate: 9

Alveo: canale a forma trapezoidale
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale NAVIGLIO GRANDE

Sezione:

Pontecanale irrigatrice

Km 32,300

Località:

Casalbuttano



Larghezza del canale: 4,320 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in cotto, fondo in terra

Canale NAVIGLIO NUOVO

Sezione:

Pontestrada delle Sabbie

Km 1,610

Località:

Torre Pallavicina



Larghezza del canale: 8,000 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in cotto, fondo in terra

Canale CIRIA VECCHIA

Sezione:

Pontestrada a monte bocca Ponte di Rialto

Km 6,130

Località:

Villanova Brazzuoli (Pozzaglio)



Larghezza del canale: 9,100 m

Numero verticali esaminate: 9

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale CIRIA VECCHIA

Sezione: **Pontestrada Mainardi**
Km 16,600

Località: **Grontardo**



Larghezza del canale: 7,800 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde e fondo in calcestruzzo

Canale CIRIA VECCHIA

Sezione: **Passerella alla bocca Balzemino**
Km 20,560

Località: **Pescarolo**



Larghezza del canale: 8,210 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma trapezoidale
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale CIRIA NUOVA

Sezione:

Passerella alla bocca Fiammena

Km 10,310

Località:

Olmeneta



Larghezza del canale: 8,650 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale CANOBIA NUOVA

Sezione:

Passerella alla cascina Mainardina

Km 1,450

Località:

Olmeneta



Larghezza del canale: 4,520 m

Numero verticali esaminate: 7

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

Canale NUOVO DELMONA

Sezione:

Pontestrada vodagionale

Km 1,030

Località:

Vescovato



Larghezza del canale: 3,920 m

Numero verticali esaminate: 5

Alveo: canale a forma rettangolare
sponde in calcestruzzo, fondo in terra

La proposta di bilancio e la stima delle perdite lungo ogni tratto sono state così eseguite:

- si considera il valore della portata rilevata nella sezione di monte;
- vengono aggiunte o sottratte le portate entranti o uscenti dalle bocche aperte nel tratto considerato e da eventuali emissari. E' fondamentale sottolineare l'importanza della collaborazione dei *campari*, che hanno fornito dati e informazioni sulle bocche ad ogni uscita (altezza idrometro, orari di apertura e chiusura...) e hanno provveduto alla pulizia dell'alveo e delle sponde interessate;
- Il risultato dell'operazione precedentemente descritta è un valore di portata non reale che si avrebbe nel caso si ipotizzasse un canale ideale; la differenza di tale valore con quello rilevato con il metodo del mulinello lungo la sezione di valle esprime, entro i limiti dell'ammissibilità, l'ammontare delle perdite del tratto di canale;
- le perdite così valutate sono rapportate al perimetro bagnato, medio se variabile lungo il tratto, del canale al fine di ottenere un parametro confrontabile tra i vari acquedotti; parametro che consente, infatti, un'interpretazione più omogenea in ordine alle caratteristiche dei terreni attraversati.

Si riporta quindi per ogni tratto il valore del perimetro bagnato medio e dell'area della sezione media entrambi calcolati a partire dalle altezze medie ricavate dalle sezioni misurate e dalla stima della larghezza media lungo tutto il tratto.

Si definisce inoltre raggio idraulico medio il rapporto fra l'area della sezione media e il perimetro bagnato medio.

Si sottolinea già ora, come poi si vedrà in seguito, come le perdite di condotta valutate mostrino un variabilità nel tempo sempre in decrescenza.

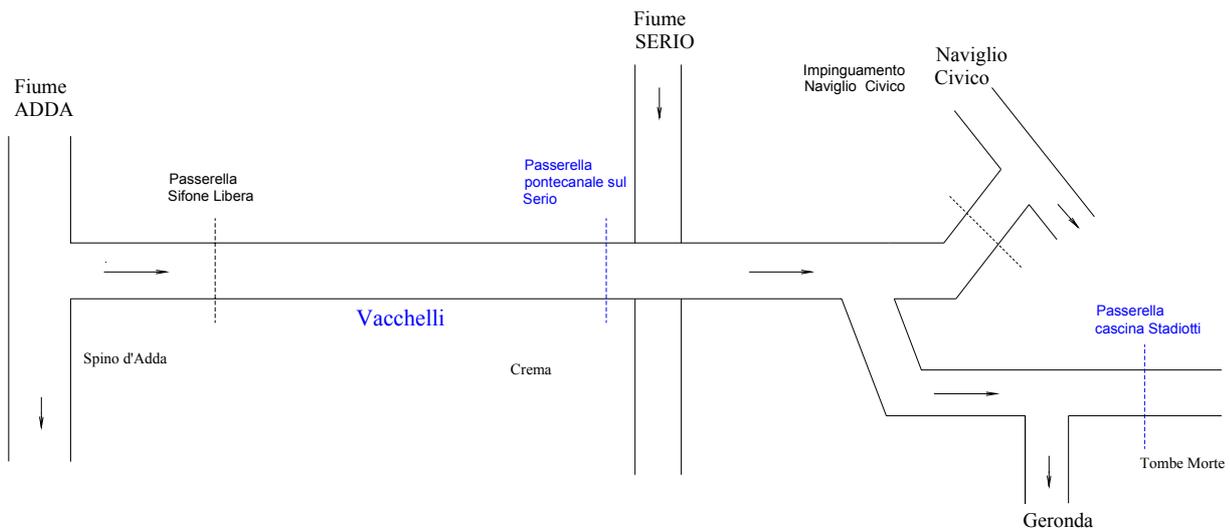
Il fenomeno è facilmente spiegabile: con il procedere del tempo le infiltrazioni dal canale provocano la graduale saturazione dell'intorno del canale stesso, con conseguente diminuzione del battente tra il pelo libero della corrente e la falda freatica localizzata. Questa dinamica è particolarmente interessante, perché, di fatto, essa costituisce una sorta di 'impermeabilizzazione per saturazione' che rende, ad esempio, meno opportuno un intervento artificiale.

Tratto n. 1 "VACCHELLI 1"

1. Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 13/06/03

Lunghezza tratto 13,518 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]		nome	[l/s]	
Pass. pontecanale sul Serio	33690	Naviglio Civico e bocche di monte	-12353	18334	Pass. cascina Stadiotti	17514	820
Loc. Crema		Galotta	-137		Loc. Tombe Morte		perdite
Progr. Km 20,000		Renga	-288		Progr. Km 33,518		
		Geronda	-2578				[l/sKm]
		TOT	-15356				60,7

Perdite rilevate: 60,7 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 15.54 m

Perdite per metro bagnato: 3,9 l/(s x km x m) **%Perdite: 2,4**

Area sezione media: 25,00 m²

Raggio idraulico medio: 1,61 m

Velocità media della corrente: 0,929 m/s altezza media: 2,10 m

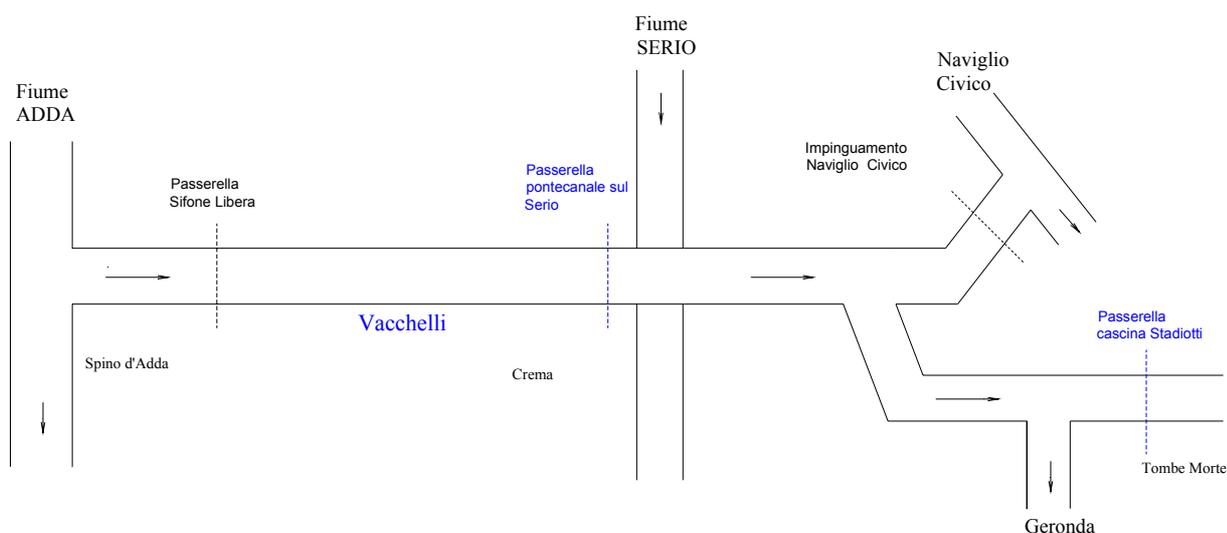
Il canale Vacchelli è stato posto in esercizio nel mese di aprile, con tirante alla presa pari a cm 55/60, poi, da maggio, ha raggiunto livelli sempre maggiori fino ad arrivare al il massimo consentito

dalla concessione, 185/190 cm, il 7 giugno. La misura quindi è stata eseguita non appena stabilizzato il regime del canale stesso e delle bocche, sette giorni dopo il raggiungimento del massimo battente.

2. Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 09/07/03

Lunghezza tratto 13,518 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. pontecanale sul Serio	32140	Naviglio Civico e bocche di monte	-11544	17057	Pass. cascina Stadiotti	16641	416
Loc. Crema		Ostinata	-383		Loc. Tombe Morte		perdite
Progr. Km	20,000	Gallotta	-137		Progr. Km	33,518	[l/sKm]
		Renga	-302				30,8
		Geronda	-2717				
		TOT	-15083				

Perdite rilevate : 30,80 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 15.66 m

Perdite per metro bagnato: 1.97 l/(s x km x m) **%Perdite: 1,29**

Area sezione media: 25,65 m²

Raggio idraulico medio: 1,64 m

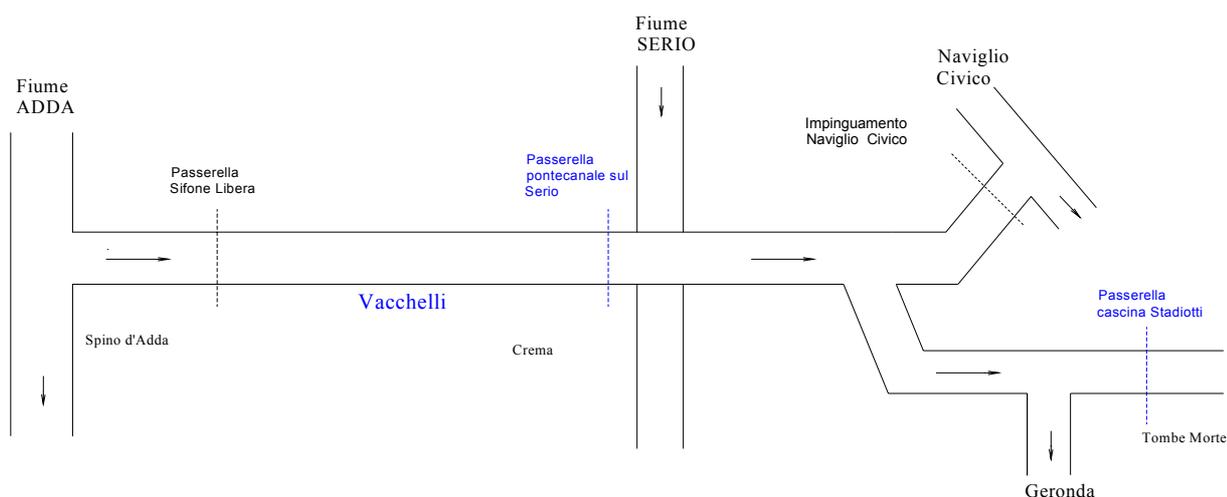
Velocità media della corrente: 0,888 m/s altezza media: 2,15 m

La misura ripete, negli stessi termini, la n. 1. e porta a valutare perdite minori del 50% rispetto alla precedente. E' evidente l'effetto conseguente al procedere della stagione irrigua che ha comportato la saturazione dei primi strati del sottosuolo nei pressi del canale. A tale proposito è necessario citare il fatto che, nelle zone dove il canale è pensile sulla campagna, ed in particolar modo verso il tratto terminale, dalla metà di luglio sono comparse numerose zone dove si sono riscontrati affioramenti di acqua al piede esterno degli argini; segno evidente che la saturazione del terreno ha gradualmente raggiunto, nei pressi del cavo, il livello massimo e quindi contrastando, per minor battente, il fenomeno delle infiltrazioni.

3. Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 05/09/03

Lunghezza tratto 12,090 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. pontecanale sul Serio	19584	Naviglio Civico e bocche di monte	-6454	11673	Passerella bocca Gallotta	11451	222
Loc. Crema		S. Vitale	-118		Loc. Castelletto Barbò		perdite
Progr. Km 20,000		Stanga Marchesa	-1067		Progr. Km 32,090		[l/sKm]
		Agosta	-137				18,35
		Renga	-135				
		TOT	-7911				

Perdite misurate: 18,35 l/(s x Km)

Perimetro bagnato medio: 14,97 m

Perdite per metro bagnato: 1,23 l/(s x Km x m) %Perdite: 1,1

Area sezione media: 21,84 m²

Raggio idraulico medio: 1,50 m

Velocità media della corrente: 0,608 m/s altezza media: 1,86 m

Questa misura ha consentito di valutare le perdite a conclusione della stagione per verificarne l'andamento.

Rispetto alla misura appena precedente, fatta lungo lo stesso tratto (n. 2), le perdite si sono ridotte. Interessante è quindi il confronto nel tempo dei dati rilevati lungo questo tratto del Vacchelli (compreso tra Crema a Tombe Morte): vi è una progressiva diminuzione delle perdite

Giugno 60,70 l/(s Km)

Luglio 30,80 l/(s Km)

Settembre 18,35 l/(s Km)

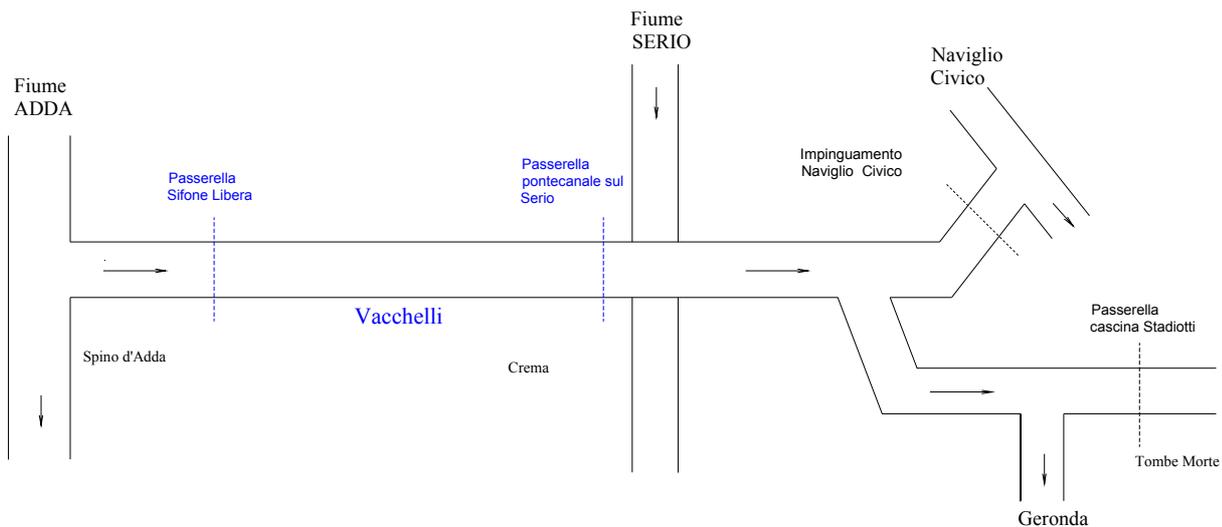
Il che conferma quanto detto prima: col passare del tempo, il canale quasi vuoto viene portato a regime e le infiltrazioni provocano la graduale saturazione del terreno circostante.

Tratto n. 2 "VACCHELLI 2"

1. Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 17/06/03

Lunghezza tratto 18,715 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. sifone Libera	34364	Bocche	-358	34006	Pass. pontecanale sul Serio	33041	965
Loc. Spino d'Adda					Loc. Crema		perdite
Progr. Km	1,285				Progr. Km	20,000	[l/sKm]
							51,6

Perdite rilevate : 51,60 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 25.52 m

Perdite per metro bagnato: 2.02 l/(s x km x m) **%Perdite: 2,8**

Area sezione media: 49,98m²

Raggio idraulico medio:1,96m

Velocità media della corrente:0,864m/s altezza media: 2,30 m

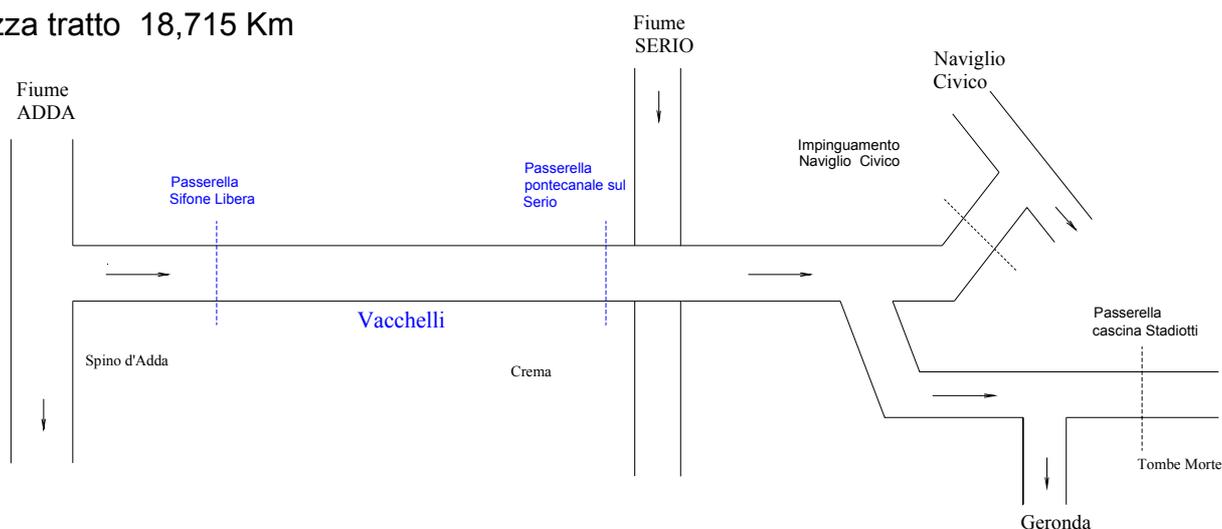
Questa misura è pressochè contestuale alla 1 di "VACCHELLI 1" e riguarda il tratto precedente del canale, dall'inizio sino alla progressiva km 20,000. Le perdite sono dello stesso ordine di

grandezza, sebbene il canale sia, nel tratto tra Palazzo Pignano e Crema, più depresso rispetto alla circostante campagna. E' evidente la mancanza assoluta di apporti, in questo primo tronco, da imputare alla eccezionale depressione della falda freatica, testimoniata dallo scarsissimo getto delle risorgive poste alcuni chilometri a monte del canale stesso, delle quali, purtroppo, non disponiamo di rilevamenti sistematici.

2. Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 09/07/03

Lunghezza tratto 18,715 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. sifone Libera	32670	Bocche	-347	32323	Pass. pontecanale sul Serio	32140	183
Loc. Spino d'Adda					Loc. Crema		perdite
Progr. Km	1,285				Progr. Km	20,000	[l/sKm]
							9,78

Perdite rilevate: 9,78 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 25.40 m

Perdite per metro bagnato: 0,38 l/(s x km x m) **%Perdite: 0,6**

Area sezione media: 48,26 m²

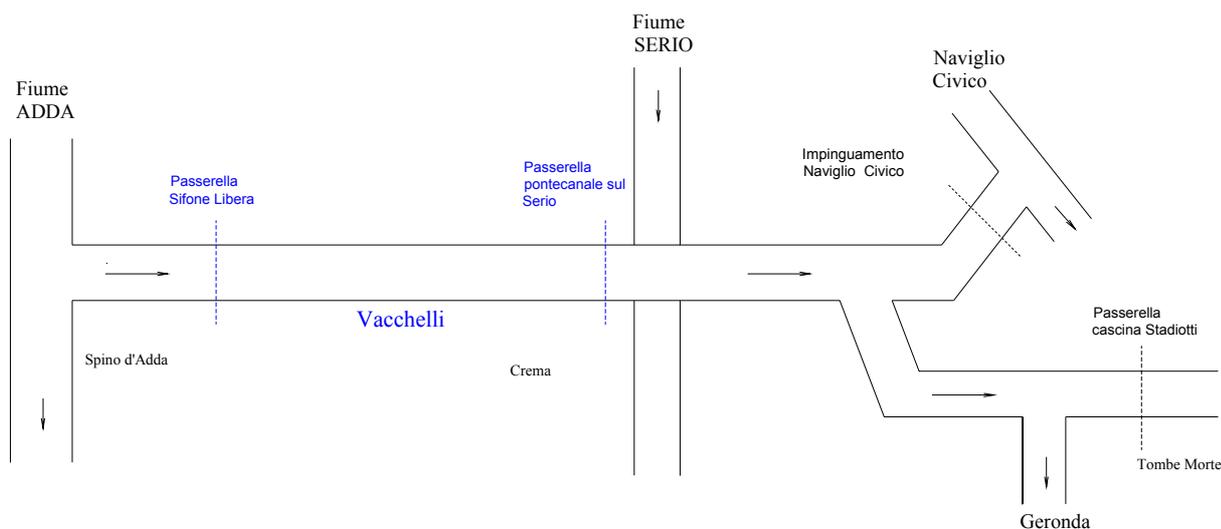
Raggio idraulico medio: 1,90 m altezza media: 2,24 m

Il canale per i primi tre chilometri è pensile e a fondo ghiaioso, successivamente per l'innalzamento del terreno si porta in zona di bonifica per tornare poi pensile in prossimità di Crema dove comunque è rivestito.

2(*) Canale PIETRO VACCHELLI

Data rilievo 28/07/03

Lunghezza tratto 18,715 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. sifone Libera	22273	bocche	- 313	21960	Pass. pontecanale sul Serio	22507	< 0
Loc. Spino d'Adda					Loc. Crema		perdite
Progr. Km	1,285				Progr. Km	20,000	[l/sKm]
							< 0

Perdite non stimate

Perdite per metro bagnato: non stimate

(*) Questa misura ripete la 2. e dà un risultato a prima vista sorprendente: la portata a Crema (km 20,000) è superiore di 547 l/s rispetto alla portata all'origine del canale (km 1,285). Analizzando i dati meteorologici ci accorgiamo che nel precedente giorno 25 si è verificata una pioggia di 50 millimetri in una zona a campagna ad Ovest della città di Crema, parte della quale cola nel Vacchelli. La *misura non è*, come logico, *significativa* poiché, evidentemente, risente del fenomeno transitorio legato alle precipitazioni.

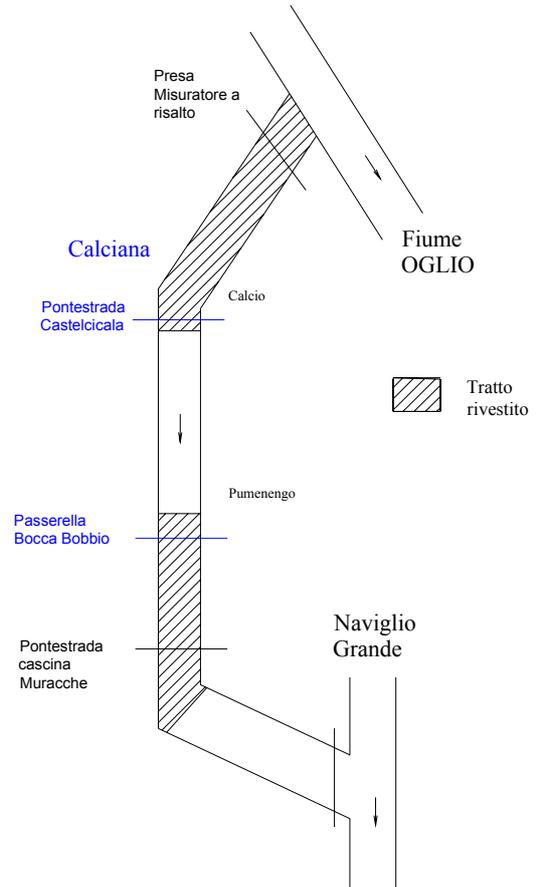
Tratto n. 3 "CALCIANA 1"

1. Canale CALCIANA

Data rilievo 17/04/03

Lunghezza tratto 4,100 Km

Lunghezza tratto non rivestito 3,405 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pontestrada Castalcicala Loc. Calcio Progr. Km 3,710	1106	Bocche Chiuse		-	Passerella bocca Bobbio Loc. Torre Pallavicina Progr. Km 7,810	867	239
							Perdite [l/sKm] 70,2

Perdite rilevate: 70,2 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 3,82 m

Perdite per metro bagnato: 18,38 l/(s x km x m) **%Perdite: 21,6**

Area sezione media: 1,43 m²

Raggio idraulico medio: 0,37 m

Velocità media della corrente: 0,605 m/s altezza media: 0,51 m

All'inizio della stagione sono state fatte delle prove lungo la Calciana, il canale che secondo il CIC perde per infiltrazione molta acqua. Circa cinque anni fa si decise di rivestirlo lungo quei tratti che dai rilevamenti risultavano più interessati a tale fenomeno.

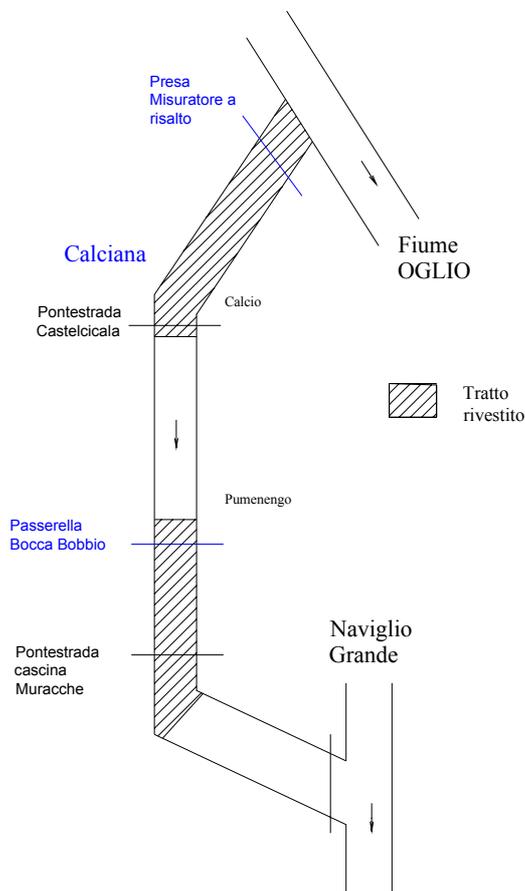
Le misure sopra riportate sono state fatte lungo il tratto non rivestito e confermano l'alta perdita: 70.2 l/(s Km). La causa fondamentale di questo fenomeno è legata alla tipologia e alla tessitura del terreno sottostante: depositi fluvioglaciali composti da ghiaie grossolane e sabbie.

2. Canale CALCIANA

Data rilievo 29/07/03

Lunghezza tratto 7,810 Km

Lunghezza tratto non rivestito 3,405 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Presa	2040	Oldofredi	-175	947	Pass. bocca Bobbio	621	326
Loc. Calcio		Pumenengo	-224		Loc. Torre Pallavicina		
Progr. Km	0,000	Cortivelli	-224		Progr. Km	7,810	perdite
		Portico	-223				[l/sKm]
		Triulzio	-191				95.5
		Bobbio	-56				
		TOT	-1093				

Perdite rilevate: 95,5 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 3,46 m

Perdite per metro bagnato: 27,6 l/(s x km x m) **%Perdite: 27,3**

Area sezione media: 0,924 m²

Raggio idraulico medio: 0,27 m

Velocità media della corrente: 0,523 m/s altezza media: 0,33 m

Come già detto questo tratto del cavo scorre in terreni a tessitura particolarmente grossolana, costituiti da depositi fluvioglaciali quaternari, composti da ghiaie grossolane e sabbie. Anche la semplice osservazione dello strato superficiale di alterazione mostra la prevalenza di tali materiali. La misura conferma quella condotta dal Consorzio, il 15/07/99, nel medesimo tratto, che ha raggiunto il valore di 71 l/(s x km).

Sebbene in luglio si sia nel mezzo della stagione irrigua, le perdite non sono diminuite a causa, appunto, della tipologia del suolo.

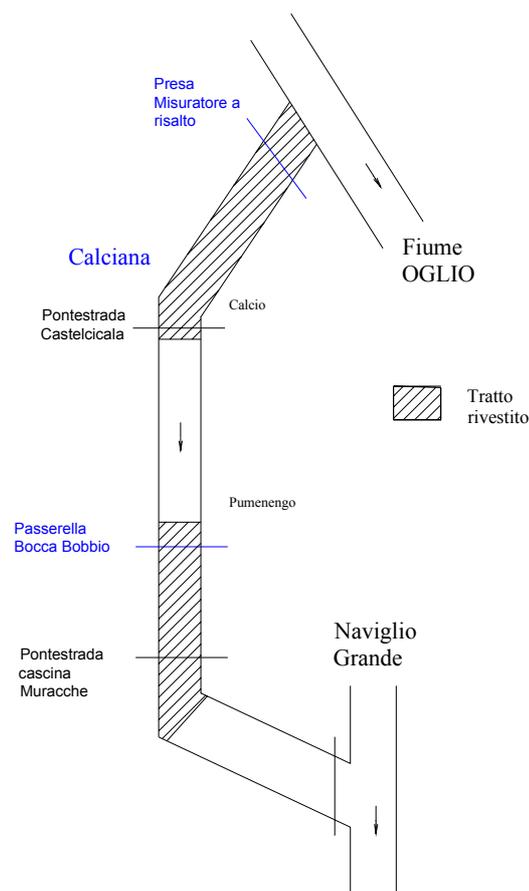
Alla luce di questi dati il CIC avrà quindi il compito di valutare se intervenire artificialmente.

3. Canale CALCIANA

Data rilievo 15/09/03

Lunghezza tratto 7,810 Km

Lunghezza tratto non rivestito 3,405 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Presa	1500	Oldofredi	-120	503	Pass. bocca Bobbio	415	88
Loc. Calcio		Pumenengo	-150		Loc. Torre Pallavicina		
Progr. Km	0,000	Cortivelli	-230		Progr. Km	7,810	perdite
		Portico	-238				[l/sKm]
		Triulzio	-204				25,8
		Bobbio	-55				
		TOT	-997				

Perdite rilevate: 25,8 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 3,37 m

Perdite per metro bagnato: 7,66 l/(s x km x m) **%Perdite: 5,9**

Area sezione media: 0,798 m²

Raggio idraulico medio: 0,24 m altezza media: 0,29 m

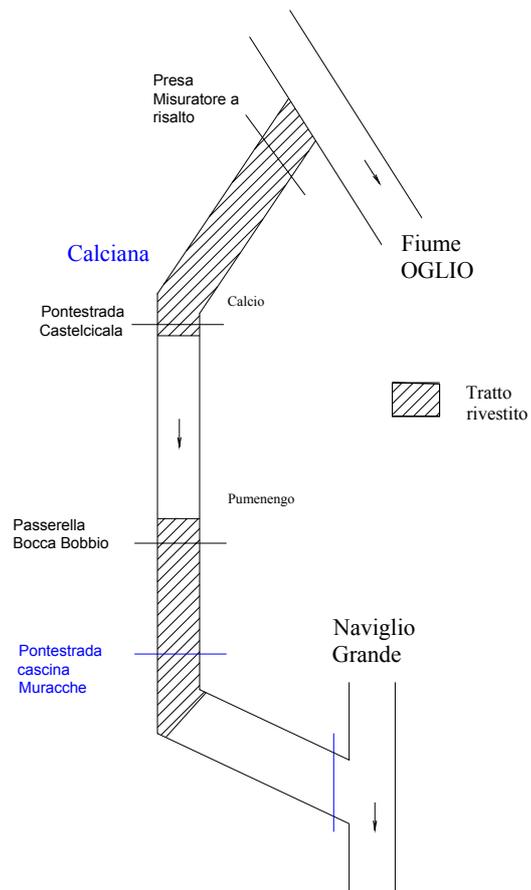
Tratto n. 4 “CALCIANA 2”

1. Canale **CALCIANA**

Data rilievo 17/04/03

Lunghezza tratto 5,600 Km

Lunghezza tratto non rivestito 5,180 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Ponestrada cascina Muracche Loc. Fontanella Progr. Km 10,060	905	Bocche Chiuse		-	Immissione nel Naviglio Grande Loc. Soncino Progr. Km 15,700	400	505 Perdite [l/sKm] 97,5

Perdite rilevate: 97,5 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 3,40 m

Perdite per metro bagnato: 28,68 l/(s x km x m) **%Perdite: 55,8**

Area sezione media: 0,84 m²

Raggio idraulico medio: 0,24 m

Velocità media della corrente: 1,186 m/s altezza media: 0,30 m

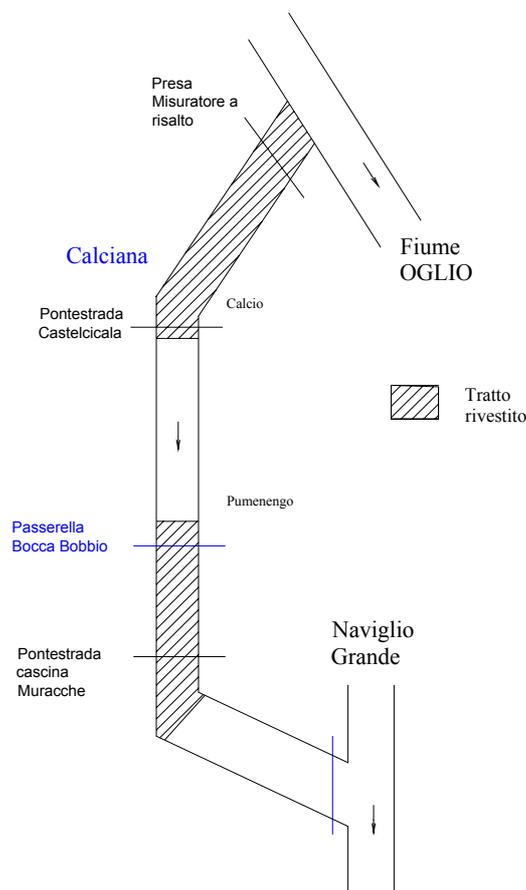
Questa prova, svoltasi lo stesso giorno della n.1 (di CALCIANA 1), interessa invece la parte finale della Calciana anch'essa non rivestita. Ci si trova nel territorio di Soncino caratterizzato da terreni argillosi quindi più impermeabili. Le perdite dovrebbero essere contenute ma si è rilevato un valore alto; il motivo è legato al fatto che, come nel caso del Vacchelli, ad inizio stagione le perdite sono alte perché il suolo, ancora "asciutto", non risente della graduale saturazione che avverrà col tempo.

2. Canale CALCIANA

Data rilievo 29/05/03

Lunghezza tratto 7,890 Km

Lunghezza tratto non rivestito 5,180 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. bocca Bobbio	741	Fontanone Pedretti	-146	78	Immissione nel	0	78
Loc. Torre Pallavicina		Fontanone Della Volta	-26		Naviglio Grande		
Progr. Km	7,810	Fosso d'Oglio	-183		Loc. Soncino		Perdite
		Cavallino	-153		Progr. Km	15,700	[l/sKm]
		S. Michelino	-155				15

Perdite rilevate: 15,0 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 3,50 m

Perdite per metro bagnato: 4,28 l/(s x km x m) **%Perdite: 10,5**

Area sezione media: 0,98 m²

Raggio idraulico medio: 0,28 m

Velocità media della corrente: 0,591 m/s altezza media: 0,35 m

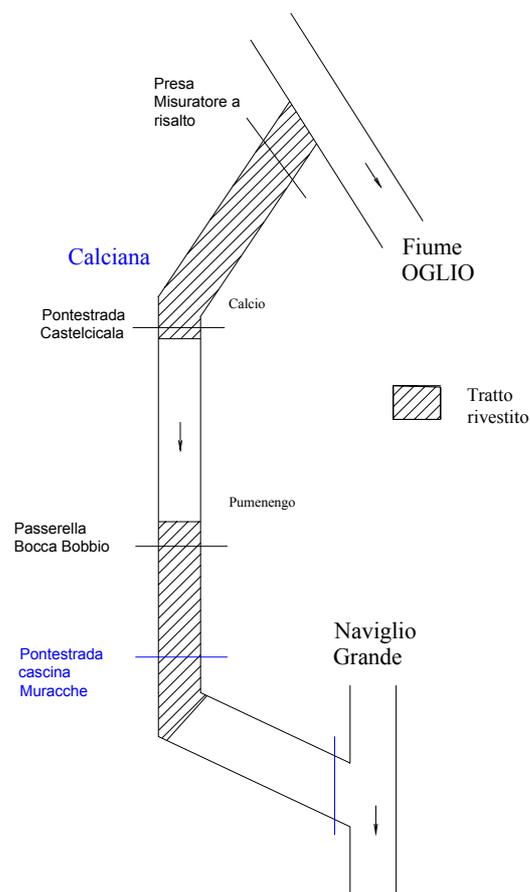
Si presenta un immediato confronto con la prova precedente: dopo un mese, lungo lo stesso tratto, le perdite sono drasticamente diminuite. Il terreno argilloso inizia a saturarsi e crea una "barriera" impermeabile per l'acqua. A confronto infatti 15 l/(s Km) sono pochi.

3. Canale **CALCIANA**

Data rilievo 29/07/03

Lunghezza tratto 5,600 Km

Lunghezza tratto non rivestito 5,180 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pontestrada cascina	468	Fosso d'Oglio	-135	44	immissione nel	0	44
Muracche		Cavallino	-115		Naviglio Grande		perdite
Loc. Fontanella		S. Michelino	-174		Loc. Soncino		[l/sKm]
Progr. Km	10,060	TOT	-424		Progr. Km 15,700		8.5

Perdite rilevate: 8,5 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 3,22 m

Perdite per metro bagnato: 2,64 l/(s x km x m) **%Perdite: 9,4**

Area sezione media: 0,588 m²

Raggio idraulico medio: 0,18 m

Velocità media della corrente: 0,860 m/s altezza media: 0,21 m

A fine luglio, lungo il secondo tratto non rivestito della Calciana le perdite sono ulteriormente calate, diventando quasi trascurabili.

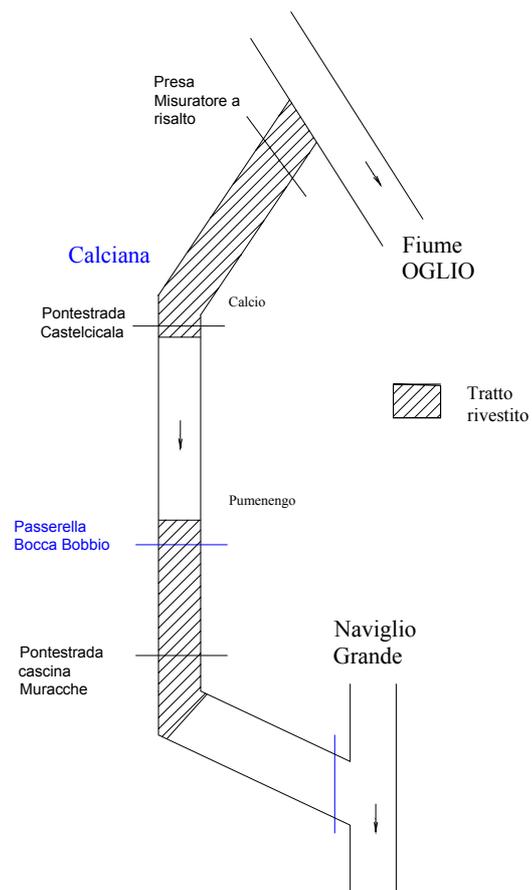
Interessante quindi il confronto tra i due tratti non rivestiti dello stesso canale, mentre nel tratto compreso tra le sezioni di Castelcicala e bocca Bobbio le perdite rimangono rilevanti a distanza di tre mesi, tra la cascina Muracche e l'immissione nel Naviglio Grande le perdite si riducono fino a diventare, a fine stagione irrigua di valore trascurabile

4. Canale **CALCIANA**

Data rilievo 15/09/03

Lunghezza tratto 7,890 Km

Lunghezza tratto non rivestito 5,180 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. bocca Bobbio	415	Fontanone Pedretti	-95	47	Immissione nel Naviglio Grande	0	47
Loc. Torre Pallavicina		Fontanone Della Volta	-18		Loc. Soncino		Perdite
Progr. Km	7,810	Fosso d'Oglio	-130		Progr. Km	15,700	[l/sKm]
		Cavallino	-125				9,1
		TOT	-368				

Perdite rilevate: 9,1 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 3,37 m

Perdite per metro bagnato: 2,7 l/(s x km x m) **%Perdite: 11,3**

Area sezione media: 0,798 m²

Raggio idraulico medio: 0,24 m altezza media: 0,29 m

Tratto n. 5 "NAVIGLIO N-G"

1. Canale NAVIGLIO NUOVO

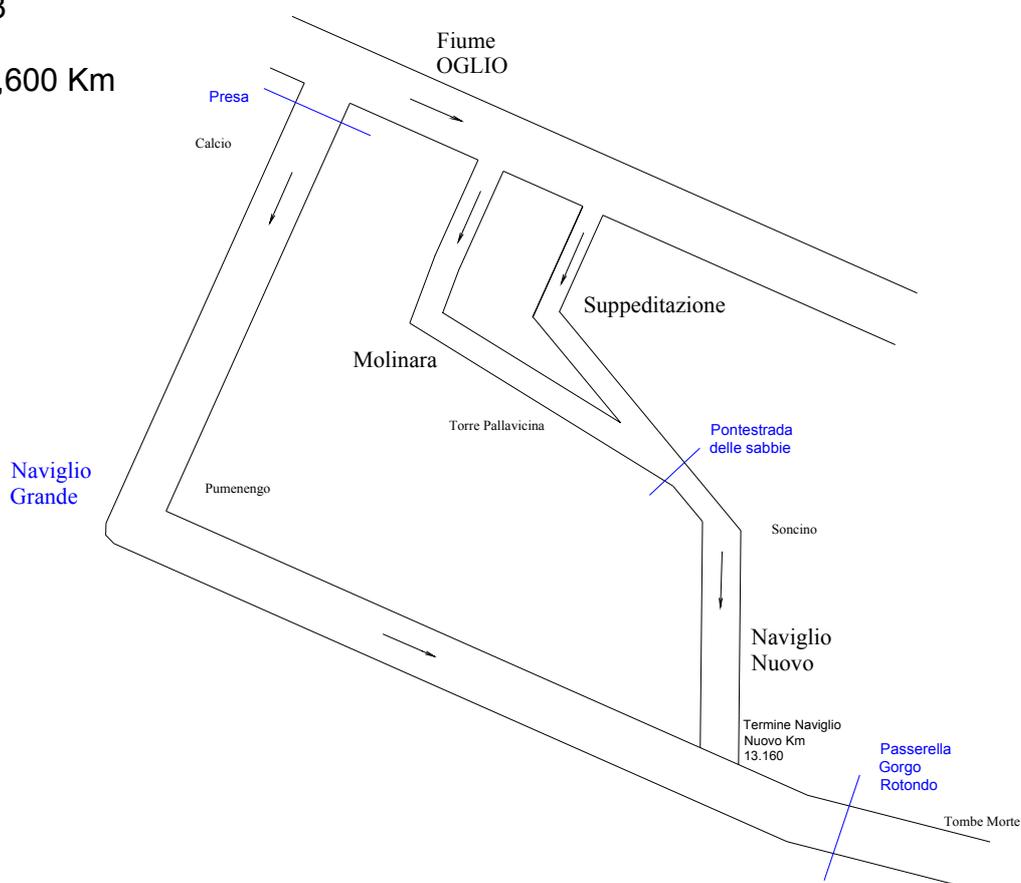
Data rilievo 29/07/03

Lunghezza tratto 11,550 Km

Canale NAVIGLIO GRANDE

Data rilievo 29/07/03

Lunghezza tratto 18,600 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pontestrada Sabbie Loc. Torre Pallavicina Progr. Km 1,610	6840	Bocche	-1220	9483	-	-	794
Preso Nav. Gr. Loc. Calcio Progr. Km 0,000	6011	Bocche	-2148		Pass. Gorgo Rotondo Loc. Cumignano s. N. Progr. Km 18,600	8689	Perdite [l/sKm] 26.33
TOT	12851	TOT	-3368				

Perdite rilevate: 26,33 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 12,72 m

Perdite per metro bagnato: 2,07 l/(s x km x m) **%Perdite: 6,2**

Area sezione media: 11,655 m²

Raggio idraulico medio: 0,92 m

Velocità media della corrente: 0,675 m/s altezza media: 1,11 m

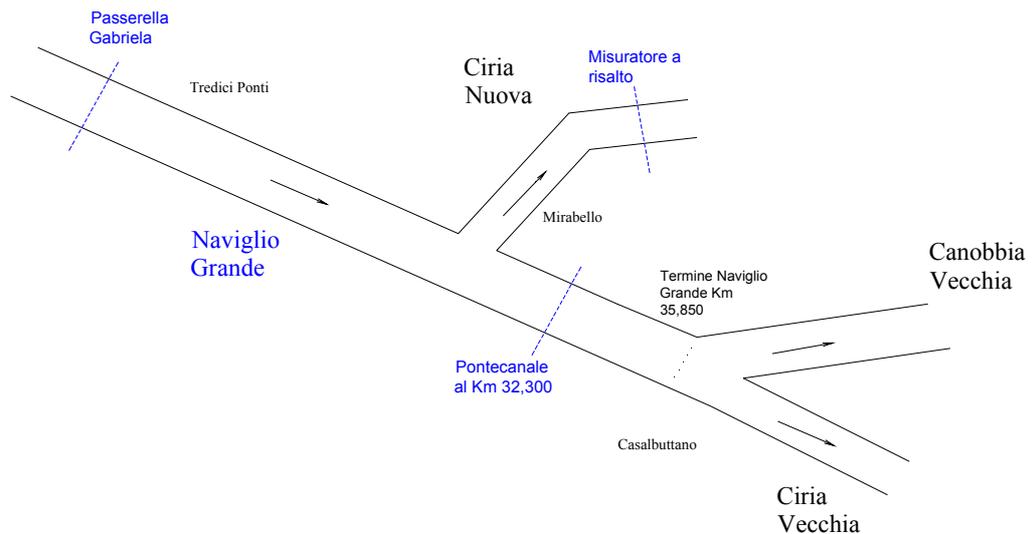
La conformazione della rete e l'attuale disponibilità di sezioni di controllo o in grado di ospitare la misura di portata hanno reso necessario considerare uniti i due tratti del Naviglio Grande e del Naviglio Nuovo.

Tratto n. 6 “NAVIGLIO GRANDE”

1. Canale NAVIGLIO GRANDE

Data rilievo 30/07/03

Lunghezza tratto 9,830 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pass. sifone Gabriela	12657	Bocche	-1255	3997	Pontecanale irrigatrice	3426	571
Loc. Tredici Ponti		Ciria Nuova	-7000		Loc. Casalbuttano		
Progr. Km	22,470	Diramatore di Casalbuttano	-405		Progr. km	32,300	perdite
		TOT	-8660				[l/sKm]
							58

Perdite rilevate: 58,0 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio : 10,56 m

Perdite per metro bagnato: 5,5 l/(s x km x m) **%Perdite: 4,5**

Area sezione media: 10,24 m²

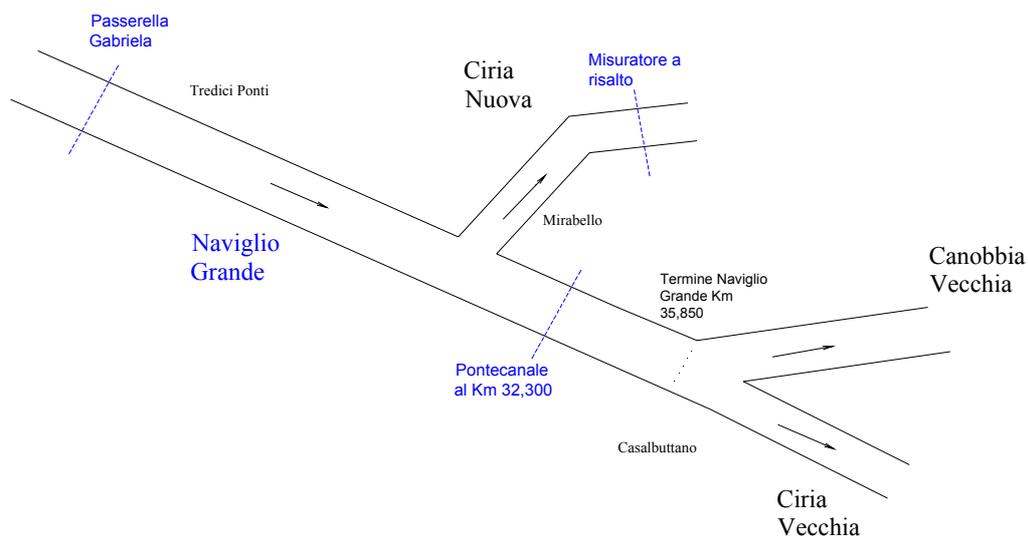
Raggio idraulico medio: 0,97 m

Velocità media della corrente: 0,775 m/s altezza media: 1,28 m

2. Canale NAVIGLIO GRANDE

Data rilievo 05/09/03

Lunghezza tratto 9,830 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite	
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	
Pass. sifone Gabriela	8787	Ciria Nuova	-6000	2787	Pontecanale irrigatrice	2418	369	
Loc. Tredici Ponti					Loc. Casalbuttano			
Progr. Km 22,470					Progr. km 32,300			
		TOT	-6000				Perdite [l/sKm] 37.5	

Perdite rilevate: 37,5 l / (s x km)

Perimetro bagnato medio: 10,16 m

Perdite per metro bagnato: 3,7 l / (s x km x m) **%Perdite: 4,2**

Area sezione media: 8,64 m²

Raggio idraulico medio: 0,85 m

Velocità media della corrente: 0,646 m/s altezza media: 1,08 m

Questa misura è stata eseguita a fine stagione irrigua, ed è caratterizzata da assenza, nel tratto indagato, di erogazioni, fatta salva la derivazione di Ciria Nuova. Rispetto alla misura n.1 (di NAVIGLIO GRANDE) le perdite registrano una diminuzione.

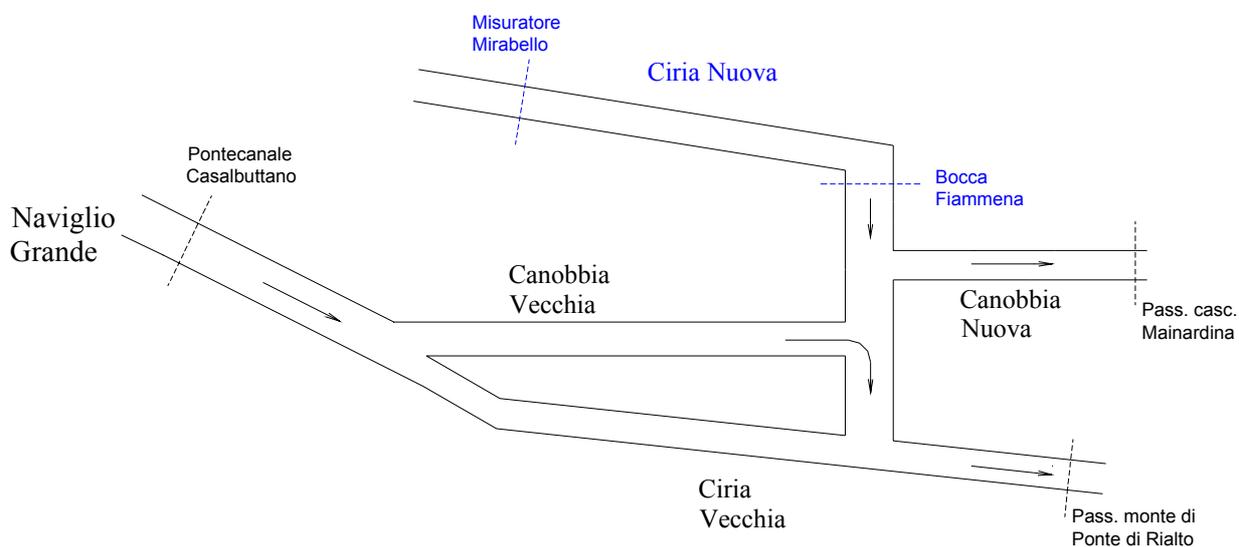
Da sottolineare che tali valori rimangono nell'ordine di grandezza di quelli rilevati sul canale Vacchelli, nel tratto limitrofo al Naviglio Grande.

Tratto n. 7 "CIRIA NUOVA"

1. Canale CIRIA NUOVA

Data rilievo 31/0703

Lunghezza tratto 10,045 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Misuratore	8000	Piazza	-173	6760	Pass. bocca Fiammena	6728	32
Loc. Mirabello		Gerenzana	-175		Loc. Olmeneta		
Progr. Km	0,265	Talamazzino est	-104		Progr. Km	10,310	perdite
		Bevilacqua	-107				[l/sKm]
		Talamazza	-467				3,2
		Meliola	-92				
		Fiammena	-122				
		TOT	-1240				

Perdite rilevate: 3,2 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 9,46 m

Perdite per metro bagnato: 0,34 l/(s x km x m) %Perdite: 0,4

Area sezione media: 8,61 m²

Raggio idraulico medio: 0,91 m

Velocità media della corrente: 0,649 m/s altezza media: 1,23 m

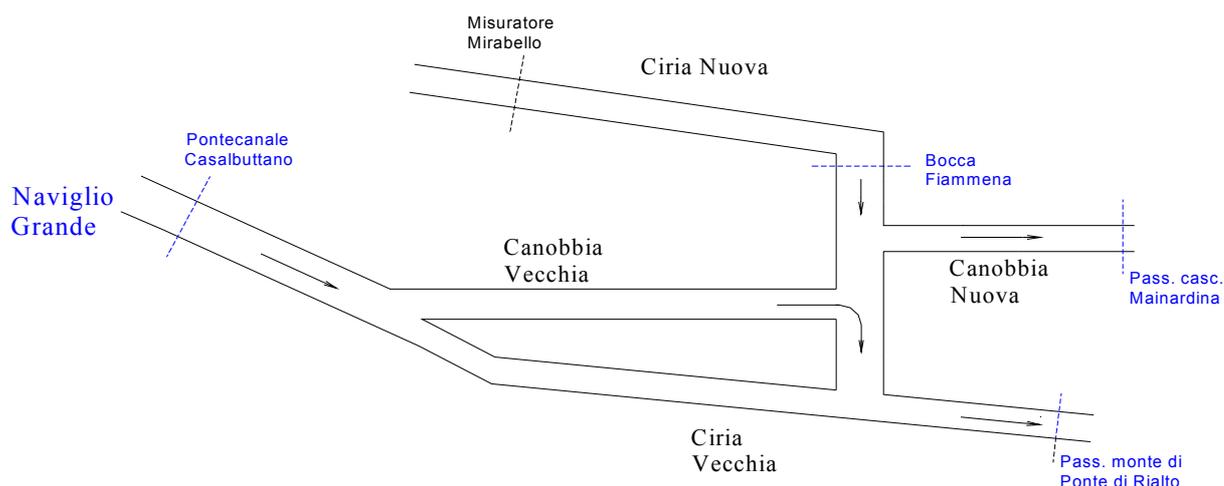
Il valore è da giudicare attendibile, sebbene modesto, poiché il territorio attraversato presenta una notevole impermeabilità.

Tratto n. 8 "RETICOLO"

1. Canale NAVIGLIO GRANDE

Data rilievo 31/0703

Lunghezza tratto 16,940 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Pontecanale irrigatrice	*4000	Ciria Nuova	6728	8104	Ciria Vecchia	7749	355
Loc. Casalbuttano		Canobbia Nuova	-2167		Pontestrada a monte		perdite [l/sKm]
Progr. Km	32,500	<i>Bocche Nav. G.</i>		bocca Ponte di Rialto		21	
		<i>Iacini</i>	-2	Loc. Villanova Brazz.			
*portata stimata sulla base del		<i>Fossa Borghesana</i>	-162	Progr. Km	6,130		
valore rilevato il 30-07-03 di		<i>Bocche Ciria Vecchia</i>					
3426 l/s (Naviglio Grande in		<i>Canziana</i>	-171				
aumento di 1cm)		<i>Bocche Canobbia V.</i>					
		<i>Malcorrente</i>	-122				
		TOT	4104				

Perdite rilevate: 21,0 l / (s x km)

Perimetro bagnato medio: 9,19 m

Perdite per metro bagnato: 2,29 l / (s x km x m) **%Perdite: 3,3**

Area sezione media: 8,74 m²

Raggio idraulico medio: 0,95 m

Velocità media della corrente: 0,613 m/s altezza media: 1,35 m

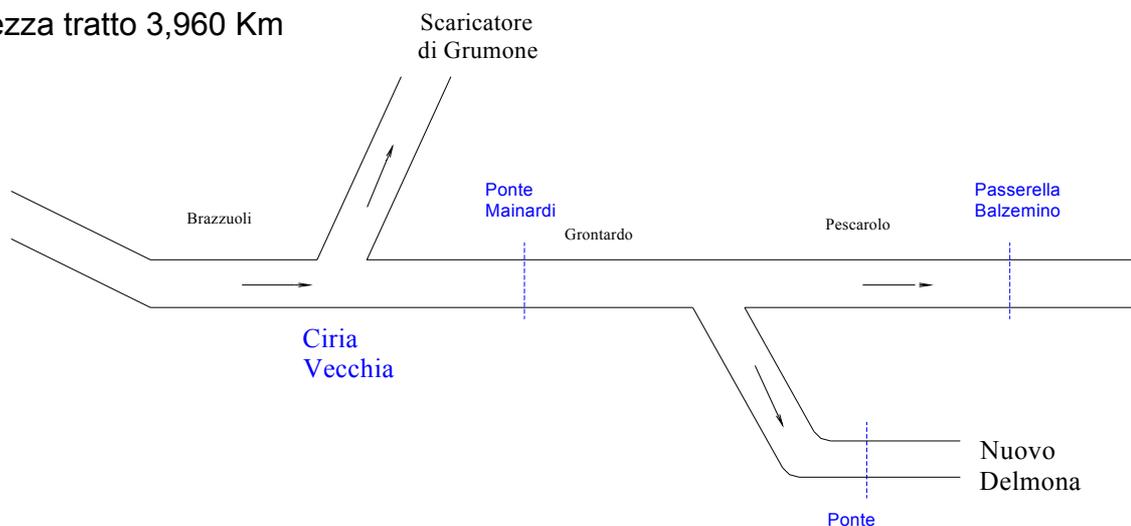
Le misurazioni iniziano a rendersi difficoltose a causa della complessità dell'andamento dei canali. Da questo punto, che costituisce di fatto il baricentro della rete, le perdite, ancorchè valutate con tali accorpamenti, si orientano su valori pressoché modesti e tendenti allo stesso ordine di grandezza delle approssimazioni delle misure.

Tratto n. 9 "CIRIA VECCHIA"

1. Canale CIRIA VECCHIA

Data rilievo 07/08/03

Lunghezza tratto 3,960 Km



sezione di monte		Portate IN-OUT		differenza	sezione di valle		perdite
nome	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]	nome	[l/s]	[l/s]
Ponte Mainardi	5564	Nuovo Delmona	-1744,2	3245,6	Pass. bocca Balzemino	3175	70,6
Loc. Grontardo		Gron.Pes.Ves	-280,8		Loc. Pescarolo		
Progr. Km	16,600	Beltrami	-74,7		Progr. Km	20,560	perdite
		Ceriali	-55,8				[l/sKm]
		Crocino	-22,5				17,8
		Canova	-88,2				
		Balzemino	-52,2				
		TOT	-2318,4				

Perdite rilevate: 17,8 l/(s x km)

Perimetro bagnato medio: 6,3 m

Perdite per metro bagnato: 2,8 l/(s x km x m) **%Perdite: 1,3**

Area sezione media: 4,6 m²

Raggio idraulico medio: 0,73 m

Velocità media della corrente: 0,486 m/s altezza media: 1,15 m

Le perdite modeste della Ciria Vecchia,comparate con quelle rilevate dalle misure n.1(di CIRIA NUOVA) e n.1(del RETICOLO),forniscono un riscontro ulteriore sulla conformazione della zona caratterizzata da sedimenti limosi e argillosi.

Si ritiene quindi poco rilevante lo studio delle perdite nella parte inferiore della rete(dalla Ciria Nuova alla fine della Ciria Vecchia)rispetto alla parte superiore.

5.5 Descrizione pedologica dei canali della rete

Per la valutazione delle caratteristiche pedologiche dei terreni attraversati dai canali della rete del CIC si sono consultate carte pedologiche dei suoli della pianura cremonese create dall'ERSAL, Ente Regionale di Sviluppo Agricolo della Lombardia.

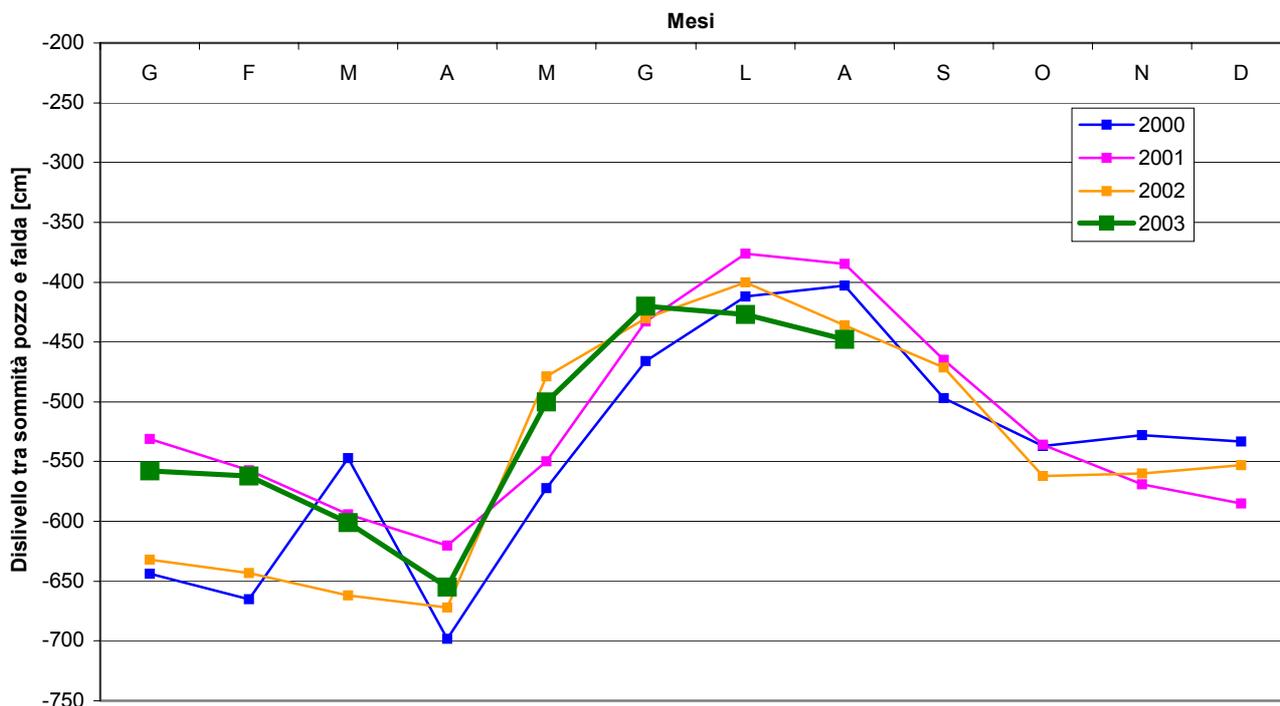
Le classificazioni fatte per ogni canale sono approssimative in quanto basate su attributi medi. Infatti le carte sono 1:50000, i canali sono lunghi decine di Km e attraversano terreni tra loro differenti, difficilmente descrivibili con un'unica definizione.

Canale Vacchelli

Il tratto del canale tra Spino d'Adda e Crema (da noi denominato "Vacchelli 2") si estende per circa 18,700 Km. Si rileva che nei primi 6 Km il canale attraversa un suolo caratterizzato da tessitura media a moderatamente grossolana con saturazione alta e drenaggio buono. Lungo il tratto rimanente la tessitura rimane di medie dimensioni mentre il drenaggio è considerato tra mediocre e lento.

Il secondo tratto che abbiamo esaminato tra Crema e località Tombe Morte ("Vacchelli 1"), lungo circa 13,500 Km, presenta un'uniformità maggiore del territorio: suoli moderatamente profondi, limitati da falda, granulometria varia, tessitura media – grossolana, saturazione alta e drenaggio lento

Calciana 1
Andamento piezometro Cascina "Quadro"

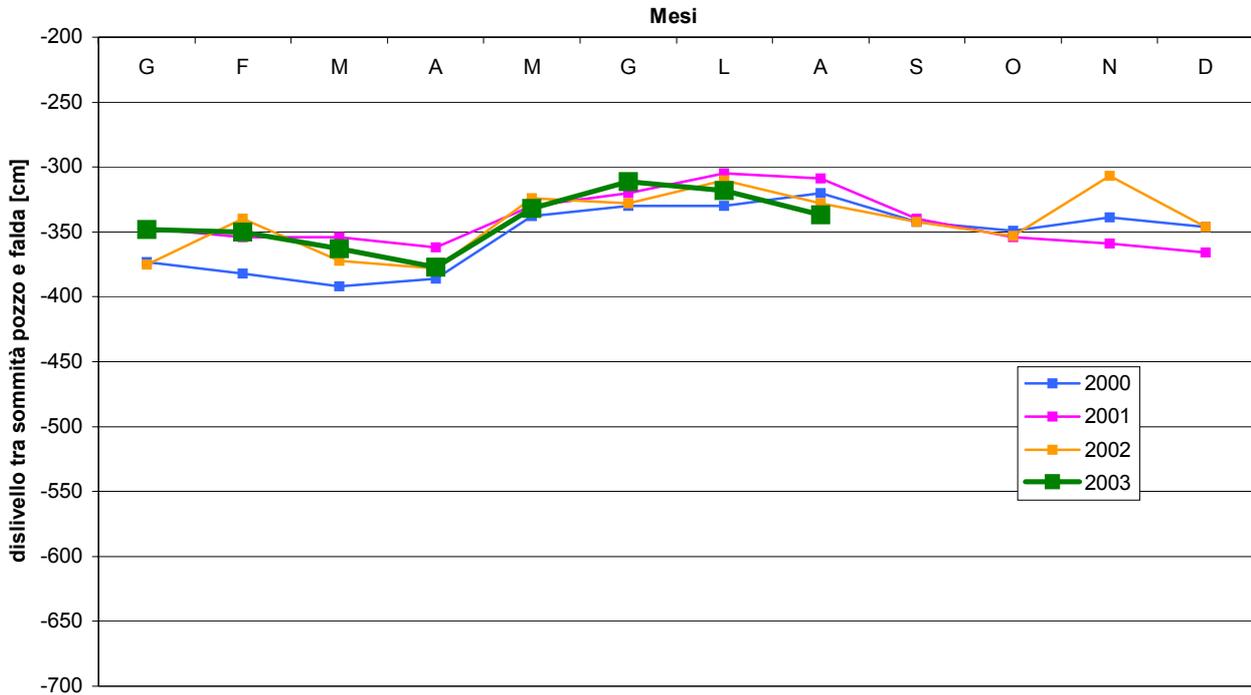


Il grafico evidenzia la particolare situazione che si presenta nel periodo irriguo (da maggio ad agosto): in tutti gli anni considerati vi è un notevole innalzamento della falda la quale risulta quindi indipendente dall'apporto di pioggia (si ricorda che il periodo estivo è carente di precipitazioni) ma influenzata dalle irrigazioni. Questo conferma la descrizione fatta del terreno particolarmente ghiaioso e permeabile e allo stesso tempo giustifica le rilevanti perdite valutate nella parte settentrionale della Calciana.

Caratteri diversi sono invece presenti nella parte finale ("Calciana 2") il cui tratto non rivestito è di 5,810 Km: suoli moderatamente profondi, tessitura media in superficie (0-40 cm) moderatamente fine in profondità (40-90 cm), drenaggio buono.

Anche in questo caso si è considerato un pozzo piezometrico (S. Lucia) nei pressi del tratto d'interesse. L'andamento della falda è descritto dal grafico sottostante:

Calciana 2
Andamento piezometro Cascina "S. Lucia"



Come nella situazione precedente la falda risente dell'apporto dato dall'irrigazione, ma in modo meno evidente: vi è un innalzamento della falda di circa 50 cm in media contro i 200 cm riscontrati nel pozzo Quadro. Questo conferma la diversità di terreno che caratterizza la parte finale della Calciana la quale infatti rileva perdite inferiori: suoli con tessitura più fine e minore permeabilità.

Naviglio Nuovo e Grande

L'estensione del tratto considerato, in tutto 30.150 Km, consente una valutazione approssimativa che tiene conto delle caratteristiche generali: per quanto riguarda il Naviglio Nuovo da Pontestrada delle Sabbie all'immissione nel Grande si tratta di suoli moderatamente profondi con tessitura media – grossolana, saturazione alta, drenaggio buono; il Naviglio Grande attraversa suoli simili differenti per un drenaggio da buono a mediocre. (Questo tratto è stato chiamato "Naviglio N-G")

Naviglio Grande

Con il tratto considerato (da Genivolta a Casalbuttano) iniziamo a spostarci verso la parte sud-orientale della rete. La pedologia del territorio varia gradualmente da suoli profondi su substrato sabbioso, tessitura media e drenaggio mediocre a suoli su substrato sabbioso con limo e tessitura media-fine.

Ciria Nuova e “Reticolo”

Le caratteristiche pedologiche di tutta l'area si possono così riassumere:

superficie pianeggiante o debolmente ondulata, suoli profondi, substrato sabbioso con limo, tessitura media-fine, drenaggio lento con problemi di smaltimento delle acque superficiali.

Ciria Vecchia

Se consideriamo l'intera rete del CIC questo è il canale più a Sud che abbiamo analizzato. In quest'area i suoli sono molto profondi su substrato limoso, tessitura da media a moderatamente fine e drenaggio mediocre.

Spiegazioni

Tessitura (valori medi):

- grossolana: dal 70% al 100% sabbia
- media: 40% sabbia, 40% limo, 20% argilla
- fine: 20% sabbia, 60% argilla, 20% limo

Drenaggio:

- buono: l'acqua è rimossa prontamente dal suolo, ma non rapidamente; permeabilità moderata;
- mediocre: l'acqua è rimossa piuttosto lentamente; permeabilità moderatamente bassa ;
- lento: l'acqua è rimossa lentamente dal suolo il quale è periodicamente bagnato; permeabilità bassa.

Capitolo 6 Analisi e interpretazione dati

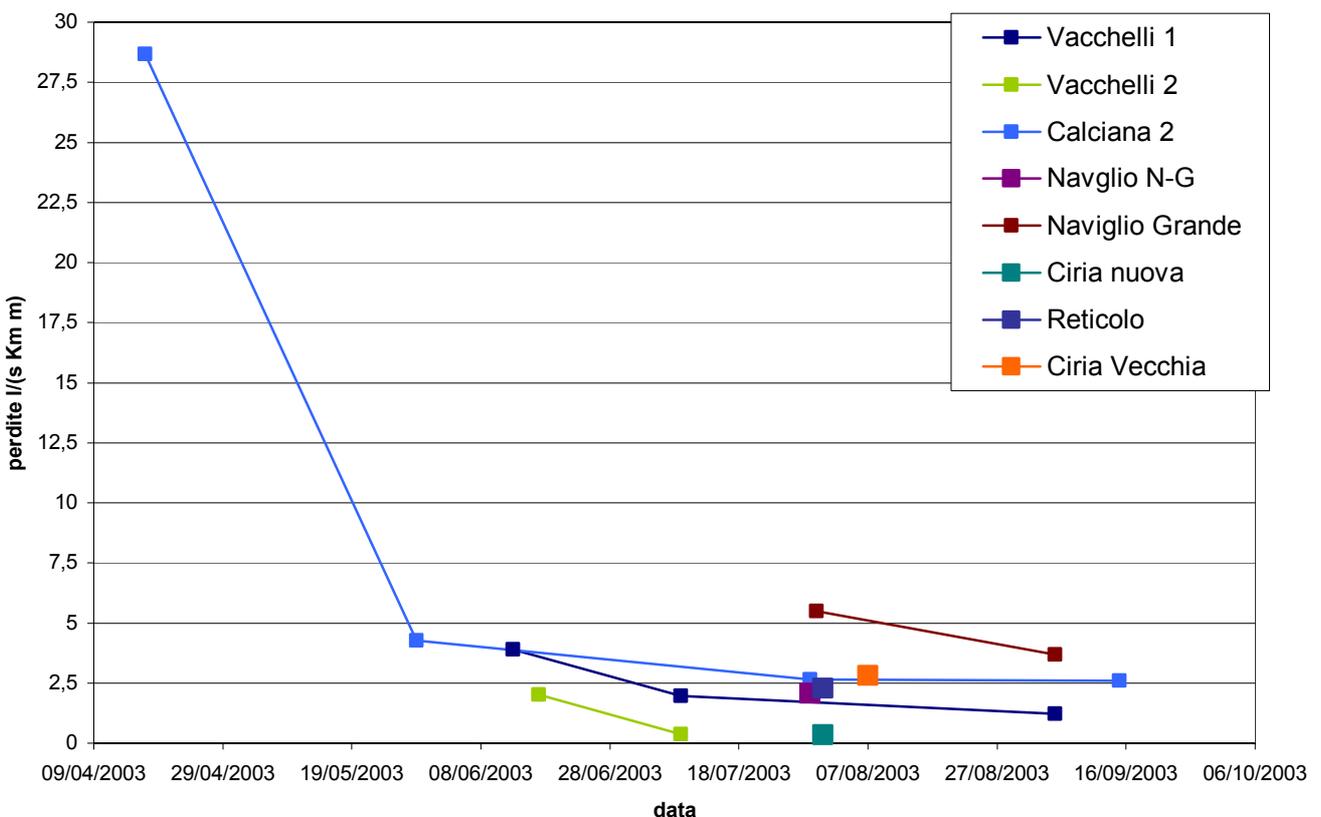
6.1 Situazione della rete irrigua del CIC

Nel capitolo precedente sono state elencate tratto per tratto le perdite rilevate nei diversi periodi della campagna di misure. Si analizza ora la situazione complessiva dell'intera rete (escluso il canale Calciana che avrà una trattazione a parte) e se ne descrive l'andamento generale nel tempo delle perdite.

Il grafico sotto riportato descrive il comportamento delle perdite di ogni singolo canale espresse in $l/(s \text{ km m})$. Per alcuni tratti di canale sono state effettuate più misure nel tempo ed è stato possibile quindi evidenziarne l'andamento nell'intera stagione irrigua; altri tratti sono invece rappresentati da un'unica misura (quindi da un unico punto nel grafico).

Fig. 6.1.1

Andamento delle perdite su tratti della rete del CIC



Risulta evidente come le perdite assumano un andamento decrescente, simile per tutti i tratti della rete con valori trascurabili a fine stagione irrigua.

Col passare del tempo quindi le perdite diminuiscono. Questo è spiegabile se si tiene conto di alcuni importanti fattori:

- i terreni sono di tessitura da media a fine, presentano dunque una permeabilità da media a bassa;
- l'analisi dell'andamento freaticometrico dei piezometri del Consorzio Dugali (n. 6, n. 10) rileva che la falda è molto prossima al piano campagna

Si potrebbe ipotizzare che il moto dell'acqua avvenga per infiltrazione passando da uno stato di insaturazione ad una progressiva saturazione del suolo.

Il processo di infiltrazione può essere descritto attraverso l'equazione di Horton.

In tale equazione si osserva che l'infiltrazione parte da un dato valore f_0 e decresce in maniera esponenziale fino al raggiungimento di un valore costante f_c (figura 6.1.2).

L'equazione è la seguente:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

dove k è una costante di dimensione $[T^{-1}]$

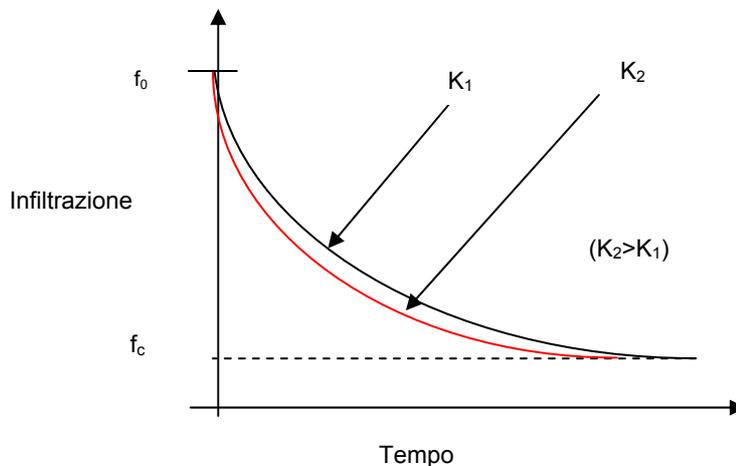


Figura 6.1.2

Tale valore f_c è simile al valore k_s di conducibilità idraulica nel terreno in condizioni di saturazione. Come si nota nell'insaturo l'infiltrazione tende a diminuire e quindi diminuiscono anche le perdite idriche. Comunque, dall'applicazione del modello di Green-Ampt che simula in modo semplice la propagazione del fronte d'infiltrazione nell'insaturo, è possibile stimare il tempo necessario affinché tale fronte raggiunga durante il periodo d'irrigazione la falda freatica.

Si prende in considerazione il modello di Green-Ampt:

tale modello stima la velocità di infiltrazione ipotizzando un profilo di umidità nel suolo di tipo semplificato. Gli autori (1911) ipotizzarono che lungo la verticale, z , il fronte di infiltrazione fosse orizzontale (Figura 6.1.3) e separasse una zona sovrastante satura ($\theta=n$), da quella inferiore non

satura, dove il contenuto d'acqua fosse pari a quello iniziale ($\theta=\theta_i$). Detta, L , la distanza, lungo la verticale z , tra la superficie del suolo e la posizione del fronte di infiltrazione il volume infiltratosi, $F(t)$, al tempo, t , è dato da:

$$F(t) = L^*(n-\theta_i) = L^* \Delta\theta \quad (1)$$

La velocità di infiltrazione viene rappresentata dalla legge di Darcy scritta per la sola zona satura, tra la superficie e il fronte di infiltrazione a profondità L :

$$q = -K \left[\frac{h_1 - h_2}{L} \right] \quad (2)$$

dove h_1 è l'eventuale tirante idrico sulla superficie del suolo (generalmente $h_1=0$) ed h_2 è il carico agente sul fronte di infiltrazione somma del carico capillare, ψ , e del carico gravitazionale, L . Questa si può anche scrivere come

$$q = -K \left[\frac{h_o - (-\psi - L)}{L} \right] \quad (3)$$

se $h_o \ll (\psi + L)$ allora la (3) diventa

$$q = -K \left[\frac{\psi + L}{L} \right] \quad (4)$$

Dalla (4) considerando che $L=F/\Delta\theta$ e che $q=dF/dt$ si ha:

$$\frac{dF}{dt} = K \left[\frac{\psi\Delta\theta + F}{F} \right] \quad (5)$$

da cui il volume infiltrato al tempo t è:

$$F(t) = Kt + \psi(\theta_i) \cdot \Delta\theta \ln \left(1 + \frac{F(t)}{\psi\Delta\theta} \right) \quad (6)$$

e la velocità di infiltrazione:

$$q(t) = K \left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (7)$$

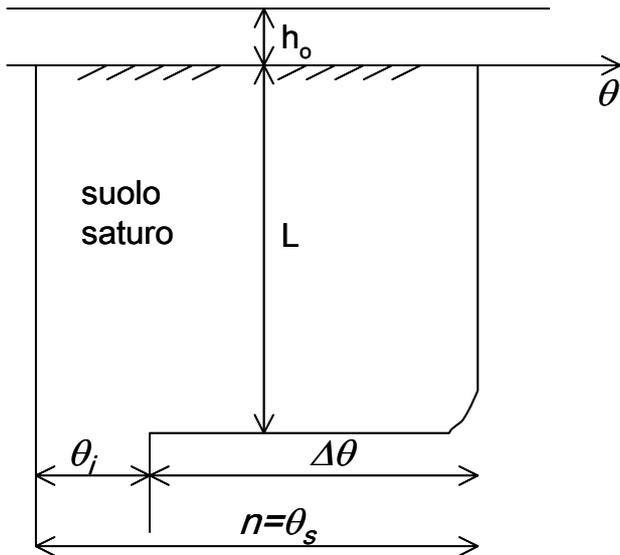


Figura 6.1.3. Profilo verticale del contenuto idrico nel modello di Green-Ampt

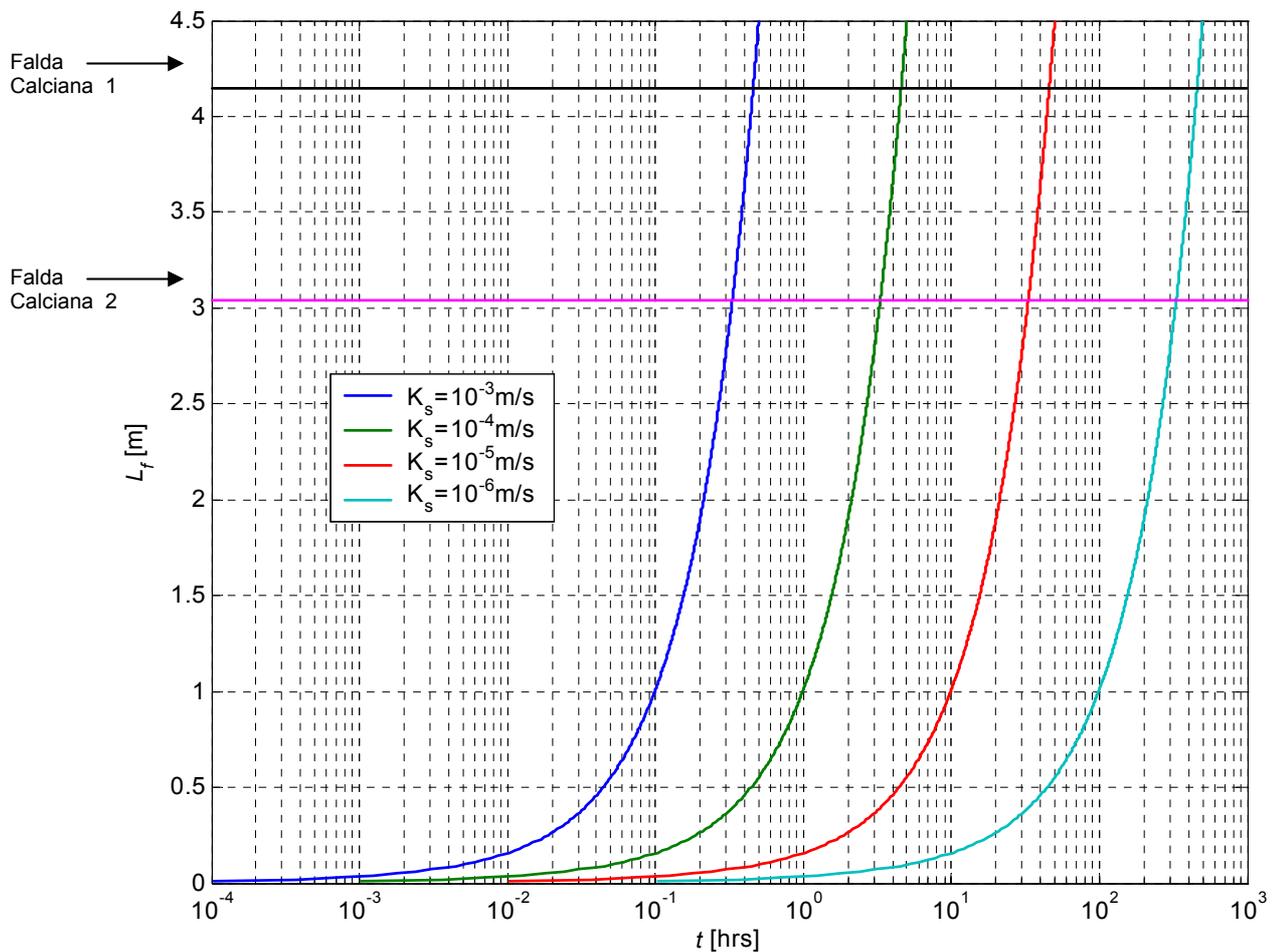
E' possibile ricavare l'equazione che fornisce il tempo necessario perché il fronte d'infiltrazione raggiunga una certa profondità L_f (che per noi è la profondità della falda):

$$t = I + \frac{\psi_f \Delta\theta}{K_s} \ln\left(1 + \frac{I}{-\psi_f \Delta\theta}\right)$$

Dove I è l'infiltrazione cumulata, $\Delta\theta$ è la variazione del contenuto d'acqua nel suolo, K_s è la conducibilità idraulica a saturazione e ψ_f è la pressione capillare.

L'equazione è stata applicata al caso della Calciana per la quale erano disponibili i dati freaticometrici (Calciana 1, profondità minima della falda nel periodo considerato 4,20 m; per la Calciana 2, 3,10 m).

Si sottolinea che si è scelto di applicare tale metodo alla Calciana perchè per i dati in nostro possesso, risultava il canale con il dislivello tra falda e piano campagna maggiore. Per diversi valori di permeabilità si è ricavato il seguente grafico (vedere pagina seguente)



Dal grafico si osserva che il tempo necessario al fronte umido per raggiungere la falda nel caso peggiore (Calciana 1) è il seguente: Per $K_s=10^{-3}$ m/s $t=0,5$ h, per $K_s=10^{-4}$ m/s $t=4,5$ h, per $K_s=10^{-5}$ m/s $t=45$ h, per $K_s=10^{-6}$ m/s $t=450$ h (circa 20 giorni).

Ciò significa che se si considera un valore di conducibilità idraulica di 10^{-6} m/s, il tempo impiegato dal fronte umido a raggiungere la falda sarà di circa 20 giorni. Considerando che tutte le misure sono state eseguite dopo un tempo superiore a 20 giorni dall'entrata a regime dei canali, si può così ipotizzare che durante il periodo oggetto di studio, si è in una condizione di filtrazione in terreno saturo.

La graduale diminuzione delle perdite, fenomeno che interessa tutti i canali della rete, potrebbe così essere descritta attraverso la legge di Darcy. L'interazione tra la falda e i canali d'irrigazione determina una progressiva diminuzione del carico idraulico specifico, e di conseguenza il decremento delle perdite.

Definizione di filtrazione e legge di Darcy

Il trasferimento dell'acqua nel suolo saturo avviene per *filtrazione*, un processo che si rappresenta come il fluire continuo del liquido nel terreno, dove i pori e i canalicoli sono completamente invasi dallo stesso liquido e il moto è condizionato dalla tessitura del terreno.

Il processo fisico è in realtà molto complesso per la presenza di una struttura solida, quella del terreno, che è di solito non uniforme e non omogenea.

Il moto è provocato dalla forza gravitazionale, la quale, agendo sulle molecole del liquido, tende a trasferirle da quote a potenziale superiore a quote a potenziale inferiore.

La dinamica del moto è però fortemente condizionata dalla struttura del suolo e dalla sua configurazione geologica, che dovrebbe essere nota prima di iniziare una descrizione modellistica del fenomeno fisico.

Per ogni direzione spaziale si definisce un coefficiente medio di conducibilità idraulica del suolo, termine con cui viene chiamata questa capacità di consentire il moto del liquido da parte del suolo nella esperienza di Darcy.

Le relazioni che descrivono il moto del liquido, supposto di aver orientato il sistema di riferimento secondo le tre direzioni principali di variazione del parametro **K** (conducibilità idraulica), sono le seguenti:

$$q_x = -K_x \partial H / \partial x \quad q_y = -K_y \partial H / \partial y \quad q_z = -K_z \partial H / \partial z$$

dove q_x, q_y e q_z sono le portate specifiche nella tre direzioni principali; K_x, K_y e K_z sono le conducibilità idrauliche rispettivamente nelle tre direzioni principali; $H(x,y,z)$ è il carico idraulico dato dalla somma tra la quota z e il potenziale di ritenzione capillare del suolo.

Quando i tre parametri K_x, K_y e K_z sono uguali, cioè $K_x = K_y = K_z$, il mezzo dove si muove il liquido si dice isotropo, in altre parole il suolo è isotropo; mentre se la conducibilità è costante in ogni punto dello spazio il mezzo si dice omogeneo e vale la seguente relazione:

$$\partial K_x / \partial x = \partial K_y / \partial y = \partial K_z / \partial z = 0$$

Come si vede dall'equazione precedente la velocità di filtrazione (e quindi le perdite idriche del canale) diminuisce al decrescere del dislivello di carico ΔH . E' presumibile quindi che durante il periodo d'irrigazione la falda si sollevi in prossimità dei canali e diminuisca di conseguenza ΔH determinando un decremento delle perdite come osservato in figura 6.1.1.

Basandoci sulle descrizioni pedologiche tratte dalle carte dell'ERSAL si è cercato di classificare i tratti in base alle caratteristiche medie del substrato (ghiaia/sabbia, sabbia, sabbia fine/limo, limo). E' da sottolineare che tale classificazione, riferita a tratti con estensione di decine di chilometri, è

approssimativa: ciò è dovuto alla difficoltà di raggruppare sotto un'unica voce caratteri territoriali (tessitura, drenaggio...) variabili nello spazio. Tale rappresentazione è riportata nell'*Allegato E*.

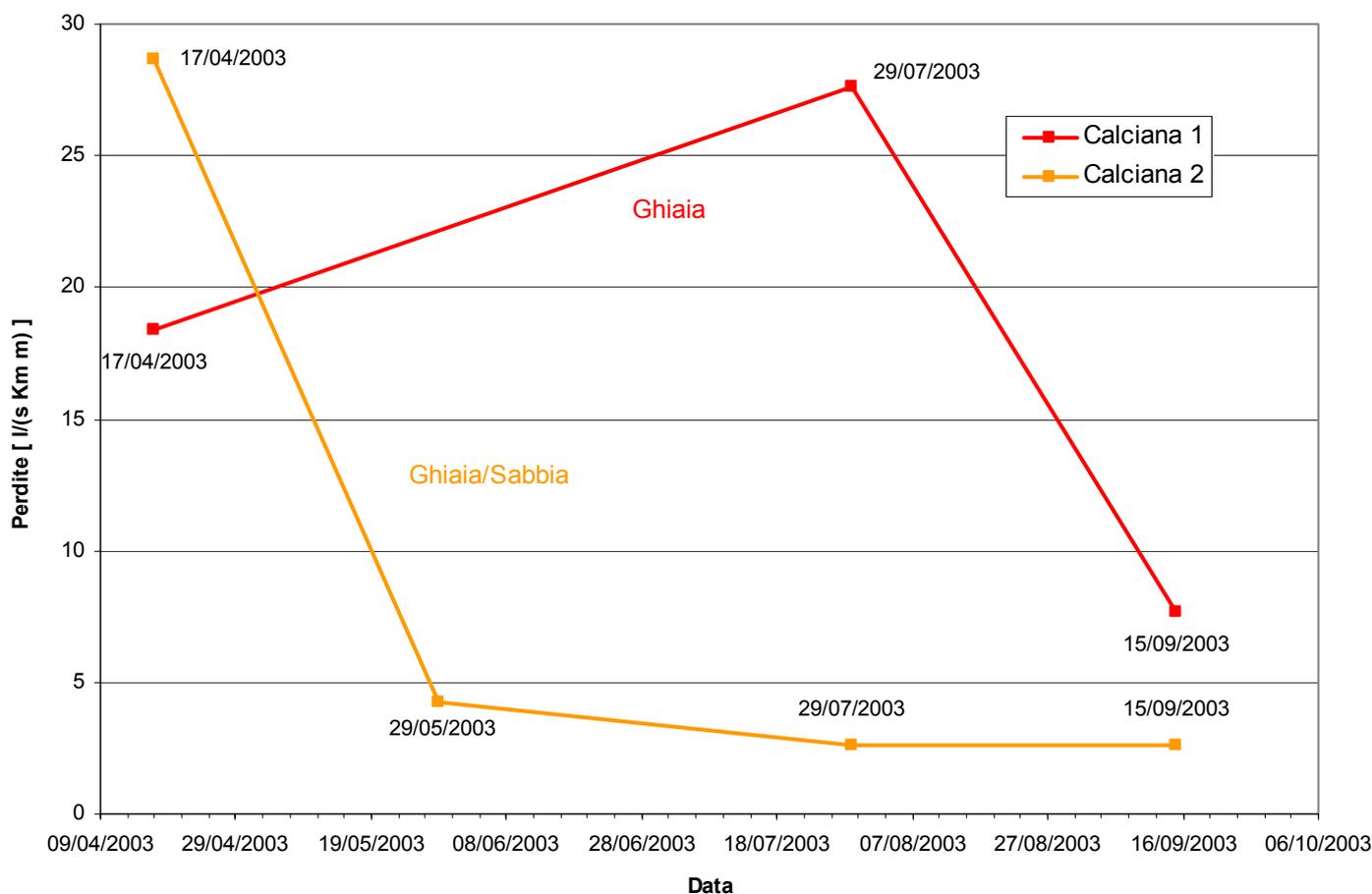
6.2 Il caso del canale Calciana

Si è ritenuto opportuno trattare a parte la situazione di tale canale a causa delle particolarità che si sono presentate durante l'analisi dei dati rilevati.

Ricordiamo che per valutare le perdite lungo questo canale si sono considerati due tratti distinti (Calciana 1 più a Nord, Calciana 2 più a Sud) entrambi non rivestiti e intervallati da tratti con alveo e sponde cementificate.

L'andamento delle perdite dei due tratti è riportato nel seguente grafico:

Andamento delle perdite del canale Calciana



E' evidente come la Calciana 1 presenta un andamento completamente diverso dalla Calciana 2, molto più simile a tutti gli altri tratti della rete e interpretabile allo stesso modo.

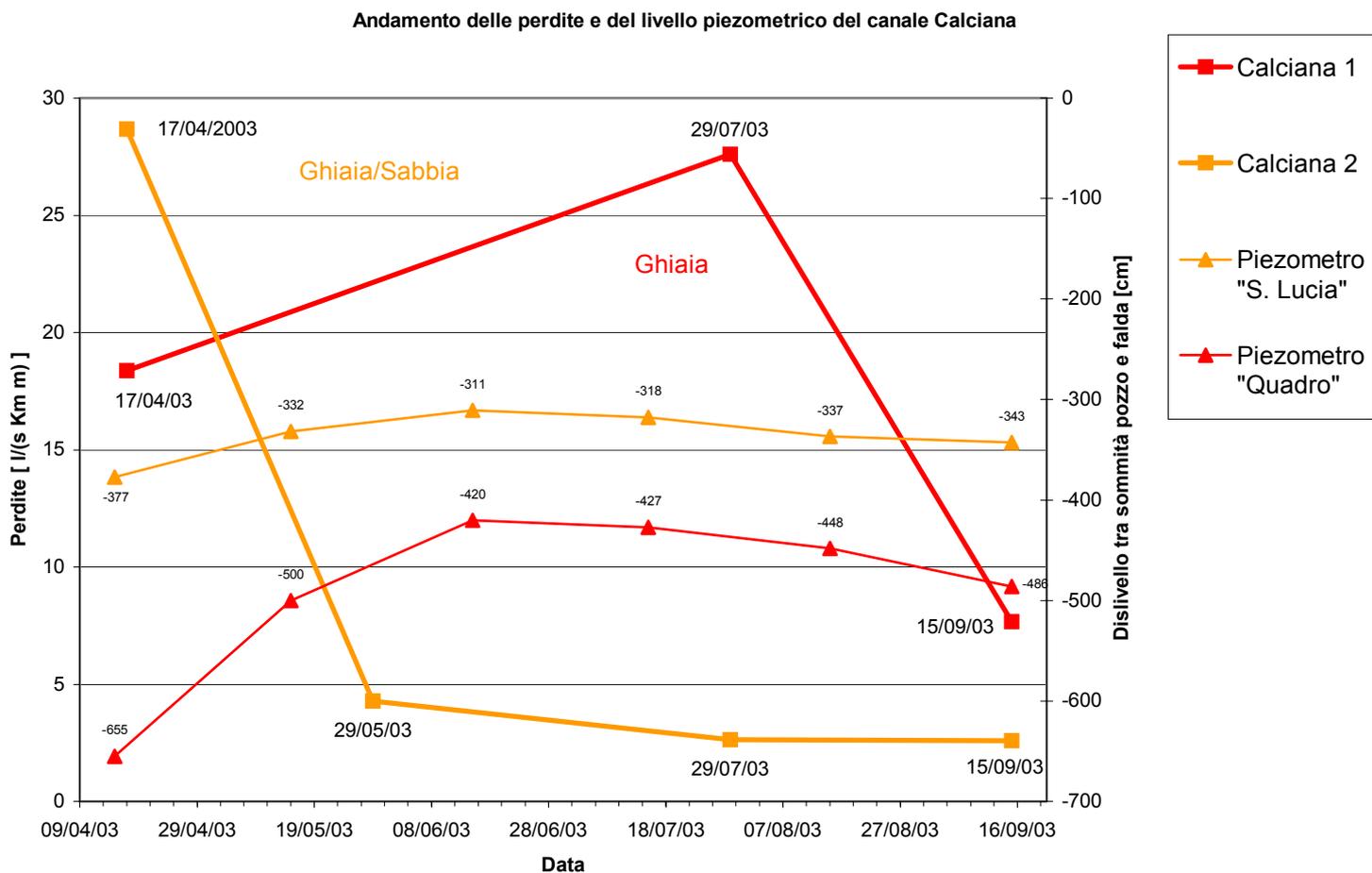
Una prima spiegazione di tale fenomeno è legata alla tipologia di terreno fortemente differente: la Calciana 1 corre su un substrato di ghiaia grande caratterizzata da un'elevata permeabilità; il terreno del secondo tratto invece ha tessitura più fine e meno omogenea.

Questo spiega il perché il valore delle perdite sia così alto confrontato con il resto della rete.

L'interpretazione dell'andamento crescente nel primo tratto della Calciana 1 è più complessa. Si è effettuato quindi un raffronto con i dati freaticometrici di due piezometri del Consorzio Naviglio:

- piezometro Cascina "Quadro" per la Calciana 1 distante dal canale circa 15 m;
- piezometro Cascina "S. Lucia" per la Calciana 2 distante dal canale circa 25 m

Si è rappresentato nello stesso grafico l'andamento delle perdite per tratto e del corrispondente piezometro:



L'andamento della Calciana 1 è anomalo e non rispecchia quanto emerso dall'applicazione del metodo di *Green-Ampt*; le perdite assumono valori crescenti fino alla fine di luglio per poi diminuire.

Con i dati a disposizione ci si trova nella condizione di non poter dare una valida interpretazione del fenomeno.

Ci limitiamo quindi a fornire solo delle ipotesi, consapevoli della necessità di ulteriori indagini a seguito del nostro studio.

Ipotesi 1

Si potrebbe pensare che il substrato della Calciana 1 sia interessato da invasioni di lenti di argilla a bassa permeabilità nel materasso filtrante.

Se così fosse all'inizio della stagione la filtrazione avverrebbe nel terreno saturo sovrastante lo strato d'argilla (che giustificherebbe il fatto che ad aprile le perdite sono minori).

Col passare del tempo il fronte umido bypassa la lente di argilla ritrovandosi prima in situazione di terreno insaturo e poi di terreno saturo, ricreando così le stesse condizioni in cui si trovano gli altri canali interpretabili attraverso la legge di Darcy.

Ipotesi 2

Eventuale prelievo abusivo della risorsa idrica

Si sottolinea l'importanza di effettuare ulteriori indagini e valutazioni in grado di convalidare, o eventualmente smentire le ipotesi sopra formulate

Capitolo 7 Conclusioni

Lo studio fatto lungo l'intera rete irrigua del Consorzio cremonese ha consentito per la prima volta di avere una valutazione complessiva delle perdite e quindi dell'efficienza della rete. Tale studio non era mai stato eseguito precedentemente per difficoltà di tipo organizzativo (disponibilità di personale) ed esecutivo (problema della pulizia e manutenzione delle sezioni dei canali).

Alla luce di tale situazione lo studio svolto acquisisce un'importanza ancora maggiore: comprendere l'andamento e il funzionamento generale della rete, estesa per 260 Km, al fine di fornire elementi necessari per intraprendere azioni atte a migliorarne l'efficienza.

Per quanto si siano presentate difficoltà anche durante il nostro lavoro (maltempo e altri fattori hanno invalidato alcune prove), la campagna di misure che si è condotta è stata consistente.

Nel complesso si sono analizzati 8 distinti tratti che ricoprono quasi interamente la rete (vedere Allegato A) per un totale di 36 sezioni esaminate da Aprile a Settembre.

Le perdite idriche, normalizzate in litri al secondo per chilometro e per metro di perimetro bagnato hanno assunto valori che si possono riassumere in un valore medio pari a 5 l/(s Km m).

Tutti i tratti considerati, ad eccezione del canale Calciana per il quale si sono formulate specifiche ipotesi (si rimanda al paragrafo 6.2), hanno evidenziato un andamento delle perdite decrescente nel tempo. Il fenomeno è spiegabile attraverso l'applicazione della legge di Darcy (si è in una condizione di filtrazione in terreno saturo) giustificato con il metodo di Green-Ampt e attraverso il classico modello Hortoniano per l'infiltrazione nell'insaturo.

Nel complesso le perdite sono mediamente dell'ordine del 5%; se ne osserva una progressiva diminuzione lungo la rete spostandosi dai tratti più a nord (Calciana e Naviglio Grande) a quelli più a sud (Ciria Nuova e Ciria Vecchia). Questo è legato alla variazione della tessitura del suolo (carte podologiche E.R.S.A.L.) la cui granulometria da grossolana diventa moderatamente fine accompagnata da un drenaggio da buono a mediocre.

Considerando i valori di perdite ottenuti la rete del Consorzio si può quindi dividere in due parti che, non a caso, quasi coincidono con la suddivisione storica dell'antico Condominio Pallavicino: Reparto Superiore e Reparto Inferiore, con demarcazione grosso modo coincidente con il tratto di Ciria Nuova.

Questo non toglie comunque l'importanza di continuare nella campagna di valutazioni e misure, che non può certo esaurirsi nell'attuale esperienza.

Infatti, nonostante l'attento lavoro dei "Campari", addetti alla manutenzione generale della rete, alcune prove di portata da noi eseguite non sono state considerate in quanto hanno portato a valori non attendibili e non utilizzabili ai fini del nostro studio. Si è presentata la difficoltà di individuare sezioni di misura idonee, in cui non siano presenti situazioni di significativa perturbazione della corrente (curve, ostacoli, cambiamento di sezione, edifici di derivazione..).

Un ulteriore problema che si è presentato nel corso della campagna di misure è stato quello della presenza di vegetazione acquatica, sviluppatasi nell'intorno delle sezioni con particolare vigore e velocità grazie ai fattori meteorologici estivi particolarmente favorevoli.

Si nota comunque una corrispondenza delle perdite per filtrazione con i parametri assegnati al comprensorio del CIC ad opera del Consorzio dell'Oglio, ente regolatore del lago d'Iseo. Il decreto n.92/1976 del suo Presidente, allora prof. Duilio Citrini, individua il fabbisogno idrico unitario per valori che nel Reparto Superiore raggiungono i 2,3 l / (s x ha) e nel Reparto inferiore non superano l' 1,10.

Altrettanto interesse riveste la valutazione, qui non condotta, dell'opportunità di intervenire per diminuire le perdite idriche che, nel Reparto Superiore, ammontano ad una portata istantanea di 377 l/s.

Preso in esame la tariffa oggi praticata, mediamente 24.50 Euro per ogni litro al secondo (esclusa IVA), è facile prevedere il tempo di ammortamento delle opere di impermeabilizzazione, soprattutto nel caso di Calciana, che presenta il maggior valore specifico di perdita.

Questa ipotesi non tiene però conto di due aspetti rilevanti:

- le perdite idriche, che si manifestano rilevanti in aree a quote ' elevate ', rispetto alla campagna cremonese, vanno senz'altro a beneficio di altre utenze. E' noto infatti, proprio nel caso di Calciana, che alcuni fontanili ad essa limitrofi iniziano a produrre dopo un certo tempo dalla messa a regime del canale consortile. Realizzare l'impermeabilizzazione toglierebbe questo fenomeno che può essere considerato come una situazione di equilibrio che, se eliminata, costringerebbe a ricercare una soluzione forse meno opportuna della realizzata impermeabilizzazione;
- le esigenze ambientali, universalmente condivise, portano ad ostacolare, o perlomeno non condividere, la realizzazione di estese impermeabilizzazioni, per evidenti motivi di conservazione.

In base alle considerazioni fin'ora fatte è possibile ipotizzare cambiamenti di alcuni aspetti:

- Per ovviare ai problemi sopra citati si propone l'installazione lungo la rete del CIC, in punti strategicamente interessanti (già oggetto di studio) di misuratori come stramazzi e risalti, questi ultimi particolarmente adatti ad essere utilizzati in reti di irrigazione poiché richiedono modesti dislivelli tra sezione di monte e valle dell'ordine di 10-15 cm. Questo consentirebbe un più veloce e semplice monitoraggio delle portate transittanti.

- Un ulteriore passo verso una migliore gestione della risorsa idrica è quello di cercare di comprendere le entità dell'interazione tra canali d'irrigazione e falda poiché, in questo studio, è emerso che quest'ultima, seppure in percentuali differenti, è influenzata dall'irrigazione delle culture. Si è ipotizzata quindi la possibilità, per altro sostenuta dai gestori del CIC, di dotare la rete di piezometri posizionati in prossimità dei canali in modo da poter meglio comprendere il fenomeno risultato evidente a causa della stagione estiva particolarmente siccitosa.

- Inoltre, valutando i risultati ottenuti e le ipotesi citate, si potrebbe anticipare la messa a regime dei canali per avere in piena stagione irrigua un valore di perdita minore.

Questa soluzione comporterebbe però la riorganizzazione del lavoro di tutti gli addetti del consorzio (campari): si dovrebbero anticipare le opere di manutenzione e di pulizia dei canali; il controllo della crescita vegetale e di tutte le componenti che influiscono sulle corrette condizioni dei canali, richiedendo così più tempo

Alla luce di tali considerazioni probabilmente, visti i valori in gioco, potrà apparire scelta più opportuna, fatti salvi casi limitati nello spazio, trovare soluzioni di compromesso che rendano più efficiente la rete senza eliminare l'attuale stato di filtrazione. In particolare, per citare un esempio, il ripristino delle fasce boscate lungo i canali permetterebbe di guadagnare in minor sviluppo algale, e quindi in miglior prestazione idraulica della sezione sia nel tempo che nello spazio, che potrebbe così attutire la perdita d'acqua.

NOTE E COMPLEMENTI

Paragrafo 2.1

1. Consorzio irrigazioni cremonesi

2. Sorgenti di emergenza che ,spontaneamente o artificialmente,affiorano in prevalenza nella striscia di terreno ,larga una decina di chilometri,compresa fra le isoipse di 110 ed 80 metri circa

3. *adduttori* sono i canali principali(cioè che derivano dai fiumi)

ripartitori o secondari o diramatori sono i canali alimentati dagli adduttori

dispensatori o canali terziari(nel cremonese comunemente dette rogge) i canali che portano le acque dai ripartitori alle aziende agricole.

Dei dispensatori si possono distinguere quelli a corpo semplice(trasportano un solo corpo di acqua cioè la portata,generalmente di 100-400 l/s,destinata nel suo insieme ad una o più aziende agricole costituenti il comizio elementare) da quelli a corpo multiplo che trasportano una portata due o tre volte il corpo semplice e che si dividono ,a loro volta,in sub-dispensatori.

Paragrafo 2.3

1. In realtà questo valore nasconde notevoli differenze tra le aree della provincia:la dotazione specifica ottima è stata calcolata durante gli studi preliminari per il canale Vacchelli,e vale 1l/s ha per il cremasco e il cremonese,e 0,25-0,50 l/s ha per il cremasco.

Paragrafo 2.4

2. Nel caso in cui nei fiumi non fosse disponibile acqua a sufficienza la portata agli utenti viene ridotta a tutti nella stessa percentuale.

Paragrafo 4.1

¹ Vincenzo Francani & Angelo Elefanti '*Acque sotterranee in Lombardia – gestione sostenibile di una risorsa strategica*' – 2001 Regione Lombardia – Assessorato Risorse Idriche e Servizi di Pubblica utilità.

Riferimenti Bibliografici

F.Michelotto

Analisi della distribuzione temporale e spaziale della dispensa a orario del Consorzio Irrigazioni Cremonesi, 2002.

Angela Nadia Sulis

Progetto di gestione della rete di canali del Consorzio Irrigazioni Cremonesi per l'attivazione di salti d'acqua disponibili ai fini idroelettrici, A.A. 2001/2002

Bruno Loffi

"Consorzio Irrigazioni cremonesi.Cento anni", Camera di Commercio, Industria, Artigianato ed Agricoltura, Consorzio per l'Incremento della Irrigazione nel territorio Cremonese 1987

Citrini D., Nosedà G.

"Idraulica", Casa Editrice Ambrosiana 1987

De Marchi G.

"Nozioni di idraulica riguardo alle bonifiche e alle irrigazioni",Ed.Agricole, Bologna 1948

E.R.S.A.L.

"Pianura-Scienza e storia dell'ambiente padano -Paesaggi e suoli della provincia di Cremona", 1997

E.R.S.A.L.

Progetto Carta Pedologica -"I suoli della pianura cremasca"

E.R.S.A.L.

Progetto Carta Pedologica -"I suoli della pianura cremonese centro-orientale"

E.R.S.A.L.

Progetto Carta Pedologica -"I suoli della pianura cremonese centrale"

Ugo Moisello

"Idrologia Tecnica"

Mauro Greppi

"Idrologia", Hoepli Milano

Contributo allo studio delle acque della provincia di Cremona,edizione a cura della provincia di Cremona

Ven Te Chow-David R.Maidment, Larry W.Mays

Applied Hidrology
Casa Editrice McGraw-Hill

Vincenzo Francani

Idrogeologia generale e applicata
CittàStudiEdizioni

Siti internet consultati

www.consorziirrigazioni.it

www.polimi.it

www.admaiora.uni.it/SIAP/ita/str_mulin.htm

www.unipv.it

www.unipd.it

www.unipr.it