



DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E INGEGNERIA AGRARIA, FORESTALE E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Sezione di Idraulica Agraria

Via Leonardo da Vinci 44 - 10095 - GRUGLIASCO (TO)

Tel. (+39) 011 6708618 - Fax. (+39) 011 6708619

Linee guida per la valutazione delle perdite dei canali irrigui

Torino, 28/10/2011

Prof. Ing. Stefano Ferraris

Prof. Davide Canone

Dott. Davide Pognant

Dott. Ivan Bevilacqua

Dott. For. Maurizio Previati



Indice

Preambolo.....	4
1. Introduzione e finalità.....	5
2. Analisi di letteratura e stato dell'arte.....	8
2.1. Considerazioni generali	8
2.2. Il metodo inflow-outflow.....	9
2.3. Il ponding test	11
2.3.1. Confronto tra il metodo inflow-outflow e il ponding test.....	12
2.4. Fotografia all'infrarosso	12
2.5. Misure di conducibilità elettrica.....	13
2.6. Altre tecniche.....	14
3. Materiali e metodi.....	15
3.1. Criteri per la scelta dei siti di studio.....	15
3.1.1. Osasco – Consorzio irriguo Balera di Osasco.....	17
3.1.2. Fossano – Coutenza dei canali ex-demaniali della pianura di Cuneo.....	20
3.1.3. Tortona – Consorzio irriguo Rogge Tortonesi.....	24
3.2. Metodologie e protocolli di misura	27
3.2.1. TDR (Time Domain Reflectometry).....	27
3.2.2. Prove di Infiltrazione	31
3.2.3. IL sensore GEM-2 della Geophex	32
4. Risultati.....	37
4.1 Metodo Inflow Outflow per la determinazione delle perdite irrigue	37
4.1.1. Acoustic Doppler Profiler	37
Osasco.....	38
Fossano.....	42
Tortona	46
4.1.2. Misurazioni con mulinelli idrometrici	49
Osasco.....	51
Fossano.....	52



Tortona	52
4.2. Relazione tra contenuto idrico misurato tramite TDR e Conducibilità Elettrica misurata tramite EM. 53	
4.2.1 Osasco.....	53
4.2.2 Fossano	57
4.2.3 Tortona	60
4.2.4 Variazione della Conducibilità Elettrica in funzione dell'altezza di pelo libero nel canale. .	62
4.3. Prove di infiltrazione	65
4.3.1. Osasco.....	65
4.3.2. Fossano	66
4.4. Mappatura della conducibilità Idraulica	68
4.4.1. Osasco.....	68
4.4.2. Fossano	72
4.4.3. Tortona	76
5. Conclusioni.....	83
6. Appendice A – Applicabilità e limiti.....	88
Ringraziamenti.....	91
Bibliografia.....	92
ALLEGATI	96
Schede Riassuntive	97
Elenco tavole	109



Preambolo

Nell’ambito della Convenzione quadro, approvata con D.G.R. n. 9-6099 dell’11 giugno 2007, e stipulata tra Regione Piemonte e Università di Torino, Politecnico di Torino, Università degli Studi del Piemonte Orientale e Università degli Studi di Scienze Gastronomiche per l’utilizzo delle competenze specialistiche degli Atenei da parte delle Direzioni regionali;

in considerazione della **necessità della Direzione Agricoltura di avvalersi di competenze specialistiche per la definizione di una procedura volta alla quantificazione delle perdite idriche nei canali irrigui;**

in virtù della proposta scientifica trasmessa alla Direzione Agricoltura dal Dipartimento di Economia e Ingegneria Idraulica, Forestale e Ambientale (D.E.I.A.F.A.) con nota prot. N. 28457/DB11.00 del 13/11/2009 e della relativa Determina Dirigenziale di approvazione n. 1161 del 17/11/2009;

la Sezione di “**Idraulica Agraria**” del D.E.I.A.F.A dell’Università degli Studi di Torino ha ricevuto incarico dalle sopracitate autorità per la realizzazione dello studio denominato:

“Linee guida per la valutazione delle perdite dei canali irrigui”

Il seguente report ha quindi la finalità di fornire i risultati ottenuti dalla sperimentazione in campo nel tentativo di indagare i meccanismi che regolano le perdite idriche con l’uso di tecnologie e conoscenze adeguate alla loro quantificazione secondo un approccio speditivo e *cost-effective* facilmente applicabile dagli operatori sul territorio.



1. Introduzione e finalità

L'acqua rappresenta, nella sua accezione più ampia, una risorsa strategica da cui dipende la vita stessa degli esseri umani, lo sviluppo produttivo e commerciale di un territorio, l'incontro tra popoli e culture. Allo stesso tempo, però, l'impoverimento delle risorse idriche a causa dell'inquinamento, del suo utilizzo sempre maggiore (in molti casi sconsiderato) e dei cambiamenti climatici sta andando a delineare prospettive allarmanti non solo a livello locale, ma addirittura a scala mondiale.

Se da un lato tale situazione si può presentare drammatica e di difficile mitigazione per l'avanzato stato di degradazione antropica e naturale di un territorio, in molte aree del pianeta i governi più avveduti stanno avviando politiche di tutela e conservazione della risorsa idrica (in ogni sua forma e dimensione), ivi incluse azioni volte al risparmio idrico e all'utilizzo consapevole dell'acqua.

A partire dal così detto “*Summit della Terra*”¹, ha avuto origine una sorta di consapevolezza globale dei governi sulla necessità indifferibile ed urgente di minimizzare i comportamenti umani causa di gravi mutazioni climatiche (ovvero capaci di trasformare fenomeni naturali fisiologici in veri e propri problemi di difficile soluzione) e, al contempo, individuare strategie volte alla sostenibilità ambientale dei processi nel rispetto dei ritmi naturali di rigenerazione delle risorse. Nonostante l'indolenza di alcuni Paesi, in seguito a questo primo evento, l'allarme è rimasto vivo e le circostanze di ricerca e confronto si sono moltiplicate e specializzate, dando vita a documenti strategici essenziali (purtroppo talvolta disattesi) tra i quali *Agenda 21*, *la Carta della Terra*, *la Convenzione sulla diversità biologica*, *il Protocollo di Kyoto*, *la Dichiarazione di Johannesburg*, *gli Accordi di Copenhagen e di Cancun* e originando veri e propri filoni di intervento a vari livelli.

Volendo mantenere aderenza agli aspetti idrici, una prima linea di indirizzo politica fondamentale (senza andare troppo a ritroso nel tempo) può essere individuata nella Direttiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio (e s.m.i.), che ha istituito un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque (di superficie, di transizione, costiere e sotterranee). Nel dettaglio la Direttiva si propone di “[...] i) impedire un ulteriore deterioramento, proteggere e migliorare lo stato degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri, nonché delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico; ii) agevolare un utilizzo idrico

¹ prima conferenza mondiale dei capi di stato sull'ambiente tenutasi a Rio de Janeiro dal 3 al 14 giugno 1992.



sostenibile fondato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili; iii) migliorare la qualità dell'ambiente acquatico, anche attraverso misure specifiche per la graduale riduzione e l'arresto degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze inquinanti e pericolose; iii) proteggere la qualità delle acque sotterranee; iv) mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità”.

Il recepimento formale delle indicazioni comunitarie nella Legislazione italiana è avvenuto, dapprima, mediante il D.lgs.152/99 in materia di protezione delle acque dall'inquinamento² e, successivamente, con il Testo Unico Ambientale (D.lgs.152/2006 e s.m.i.) che, riprendendo il 152/99, amplia i concetti di protezione, estendendo la riforma anche ai concetti di a) lotta alla desertificazione, b) tutela dell'acqua dall'inquinamento e c) gestione della risorsa idrica. Nell' art. 73, comma 1, quest'ultimo concetto diviene poi particolarmente importante in quanto la legge stessa si pone la finalità di *“perseguire usi sostenibili e durevoli delle risorse idriche [...]”* e di *“garantire una fornitura sufficiente di acque superficiali e sotterranee di buona qualità per un utilizzo idrico sostenibile, equilibrato ed equo”*. Tra gli strumenti previsti per il raggiungimento dei sopracitati obiettivi si prevede, infine, nell'art.73, comma 2, *“l'individuazione di misure tese alla conservazione, al risparmio, al riutilizzo ed al riciclo delle risorse idriche”*

Uno degli strumenti operativi di livello regionale prescritto da entrambi i decreti per il raggiungimento dei sopracitati obiettivi è rappresentato dal Piano di Tutela delle Acque (PTA) a cui dovranno essere adeguati i relativi Piani Territoriali di Coordinamento Provinciale (PTCP). Il PTA della Regione Piemonte, approvato dal Consiglio Regionale con D.C.R. n°117-10731 in data 13 marzo 2007, definisce l'insieme degli interventi da attuarsi (in materia di acque) sul territorio tra cui la razionalizzazione dei prelievi irrigui e il riequilibrio dei bilanci idrici. Tali azioni, oltre che dal monitoraggio dei prelievi e dalla ridefinizione dei fabbisogni, passano anche attraverso la riduzione delle perdite idriche dalle reti di adduzione e distribuzione delle acque superficiali.

Questa delicata, quanto complessa tematica consentirebbe infatti una significativa ottimizzazione della risorsa, la cui quantificazione risulta però strettamente connessa alla stima delle condizioni attuali dei rendimenti di processo.

² Con l'adozione di misure volte alla tutela quali-quantitativa della risorsa idrica e alla prevenzione/riduzione dell'inquinamento nei corpi d'acqua.



In virtù di tale contesto, il lavoro qui presentato si propone di indagare, attraverso rilievi sperimentali e il confronto di differenti metodologie, tratti omogenei di tre canali irrigui (ciascuno caratterizzato da differenti condizioni stazionali), scelti di concerto con la Direzione Agricoltura della Regione Piemonte e ciascuno rappresentativo di ampie porzioni di territorio nell'ottica di definire adeguate procedure per la quantificazione delle perdite idriche dei canali.

L'integrazione delle informazioni derivanti dal presente studio con sistemi operativi già adottati in tema di bonifica ed irrigazione, quali, sopra tutti, il "Sistema informativo della bonifica ed irrigazione"³(L.R. 21/1999), dovrebbe rappresentare per la Regione Piemonte (e per tutti gli addetti del settore), un valido elemento di supporto decisionale per la valutazione di strategie adeguate alla minimizzazione delle perdite idriche nelle reti di distribuzione.

³ S.I.B.I.: potente quanto versatile strumento costituito da un catasto informatizzato delle strutture/infrastrutture irrigue e dei consorzi che le gestiscono, frutto di un' imponente progetto di censimento avviato dalla Direzione Agricoltura della Regione Piemonte in grado di supportare tutte le fasi pianificatorie ed operative di carattere territoriale (e puntuale).



2. Analisi di letteratura e stato dell'arte

2.1. *Considerazioni generali*

Il settanta per cento dell'acqua dolce globale è utilizzato per l'irrigazione (Hotchkiss et al., 2001). Questa percentuale rappresenta tre volte l'ammontare di acqua utilizzato dall'industria e dieci volte l'ammontare utilizzato per usi domestici e urbani (Hotchkiss et al., 2001). Secondo un'indagine svolta congiuntamente dalle principali agenzie ambientali americane, l'efficienza media del trasporto dell'acqua per fini agricoli negli Stati Uniti è del 78% mentre le perdite nel suo trasporto ammontano a 104 milioni di metri cubi al giorno (Herschy e Fairbridge, 1998). Tali perdite rappresentano dieci volte l'utilizzo domestico giornaliero di acqua negli USA (Herschy e Fairbridge, 1998). Nella valle del basso Rio Grande (USA), la perdita da canali ammonta al 30-36% dell'acqua totale derivata (Fipps, 2001). Sebbene le perdite rappresentino una porzione significativa dell'acqua derivata, un'altra porzione è recuperata attraverso un sistema di drenaggi e può essere riutilizzata all'interno della valle del basso Rio Grande. Analisi sui canali in terra in Pakistan e India hanno mostrato che una grande quantità di acqua è persa a causa delle basse efficienze di trasporto (Alam e Bhutta, 2004; Shahid et al., 1996; Strong and Barron, 1994; Lawler, 1990) e le perdite al contorno dai canali sono state stimate in un range compreso tra il 15 e il 45% del volume derivato totale (Van der Leen et al., 1991-Sharma e Chawla, 1979). Le perdite al contorno nei canali dell'ex URSS sono state quantificate nel 40-50% dell'acqua trasportata (Kacimov, 1992).

I maggiori fattori che influenzano la perdita al contorno nei canali irrigui sono la permeabilità dei suoli, la lunghezza dei canali, la dimensione e la forma del contorno bagnato, l'altezza del pelo libero dell'acqua nei canali, la profondità della falda freatica, la presenza d'impedimenti quali muri, drenaggi e l'esistenza di orizzonti pedologici impermeabili (Akbar, 2005; Alam e Bhutta, 2004; Swamee et al., 2000; Swamee, 1994, 1995). Altri fattori (la cui rilevanza spesso non è tenuta in adeguata considerazione) includono la deposizione di sedimenti sul letto dei canali e la loro granulometria, l'età dell'opera e la presenza di piante acquatiche (Alam e Bhutta, 2004).

Determinare le perdite dei canali in normali condizioni operative presenta sempre un elevato numero di problematiche di difficile soluzione. Le fluttuazioni nel livello dei canali (come anche quelle della falda freatica) possono portare a variazioni durante l'anno e anche all'interno della stessa stagione vegetativa. Inoltre, l'ammontare di acqua persa spesso può rientrare all'interno dei



marginari di errore relativi alle misure di portata. Le perdite sono state tradizionalmente determinate usando misure dirette, metodi indiretti o per predizione. I metodi diretti sono basati su misurazioni di portata e infiltrazione; i metodi indiretti riguardano il monitoraggio della falda adiacente ai canali; i metodi predittivi riguardano equazioni o relazioni empiriche. Metodi comuni usati per determinare le perdite includono l'utilizzo di misurazioni *Inflow-Outflow*, *ponding test*, fotografie all'infrarosso, misurazioni della conducibilità elettrica, misurazioni di infiltrazione con *seepage meter* e misurazioni di infiltrazione di sali.

2.2. *Il metodo inflow-outflow*

Il metodo *inflow-outflow* (il più utilizzato per la determinazione delle perdite dei canali irrigui) richiede che misurazioni dirette di portata siano svolte a più riprese in varie sezioni lungo i canali in esame. Tradizionalmente tali misurazioni venivano svolte usando misuratori a mulinello o elettromagnetici. Le misurazioni effettuate con questi strumenti richiedono molto tempo e non permettono di essere replicate in un breve intervallo. Inoltre, l'errore nelle misurazioni realizzate con tal metodo talvolta eccede l'ammontare delle perdite misurate. Il metodo *inflow-outflow* inoltre richiede che le condizioni di portata rimangano stazionarie all'interno del tratto oggetto di esame per tutta la durata del test (Alam e Bhutta, 2004). Un vantaggio del metodo *inflow-outflow* è che la perdita è misurata in normali condizioni operative. Per questo motivo il metodo *inflow-outflow* è stato considerato il migliore da diversi autori (Alam e Bhutta, 2004).

Siddique et al. (1993) hanno esaminato differenti metodi per la determinazione delle perdite irrigue e le rispettive accuratèzze attraverso l'analisi dei risultati ottenuti nella misurazione delle perdite al contorno per il canale Chashma (Pakistan), dove i test di *inflow-outflow* mostrarono perdite varianti da 9,7 a 11,8 cm al giorno per metro quadrato di superficie. Una relazione tra perdite e dimensione e forma del canale fu cercata, ma non fu trovata.

Weller and McAteer (1993) presero in considerazione tutte le tecniche di misurazione delle perdite e discussero il trattamento statistico degli errori casuali nel metodo *inflow-outflow*. Gli errori riscontrati nel metodo *inflow-outflow* giunsero a valori pari al 110%. Gli autori raccomandarono che i test durassero abbastanza a lungo da raggiungere perdite rappresentanti almeno il 5% delle portate che entravano nel tratto di canale oggetto di studio.



Dukker et al. (1994) misurarono le perdite al contorno dal canale Lower Gugera (Pakistan) usando la tecnica *inflow-outflow* e trovarono un ampio range di variazione nei tassi di perdita dovuti a errori o incertezze nelle misurazioni. Le perdite da loro calcolate variano da 3,5 a 62,0 cm al giorno per metro quadrato di superficie. In seguito conclusero che le perdite al contorno reali possano deviare in gran parte dai valori osservati.

Il metodo *inflow-outflow* è limitato dall'accuratezza delle misure, dal tempo richiesto dalle misurazioni, dalla profondità del canale e dalle fluttuazioni di portata. Tali limitazioni possono essere superate attraverso l'utilizzo di un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).

L'ADCP permette rapide misurazioni di portata in fiumi e altri canali aperti ed è in utilizzo dal 1990. Un ADCP misura lo spostamento Doppler dei segnali acustici che sono riflessi dalle particelle sospese nell'acqua. A seguito di vari studi in laboratorio e in campo, le misurazioni ADCP si sono dimostrate più accurate e affidabili rispetto di quelle fornite dalle tecniche tradizionali. I principi di funzionamento dell'ADCP sono esaminati e descritti dettagliatamente da Yorke e Oberg (2002), Gordon (1996) e Morlock (1996).

Uno dei vantaggi principali dell'ADCP è la velocità e il dettaglio con cui i dati possono essere raccolti. L'ADCP fornisce una maggiore risoluzione spaziale e una riduzione del disturbo provocato dallo strumento nel flusso idrico. Inoltre, l'ammontare di dati che può essere ottenuto da una singola prova di misurazione della velocità eccede grandemente quello fornito da metodi e tecniche tradizionali come i mulinelli idrometrici. L'ADCP divide il canale in migliaia di celle di velocità che forniscono dati sullo schema dei flussi attraverso un canale, fornendo una dettagliata mappatura della velocità e una migliore risoluzione spaziale. In tal modo l'ADCP permette di ottenere una precisione maggiore di quella dalla misurazione di velocità in un punto effettuata con metodi tradizionali. Allo stesso modo dei mulinelli o dei sensori elettromagnetici le misurazioni ADCP richiedono una limitata calibrazione in campo.

L'ADCP ha svolto un'ampia gamma di possibili utilizzi, che vanno dalle misure di portata a quelle di velocità, turbolenza, analisi del trasporto di sedimenti, per arrivare alla validazione di modelli numerici legati ad altre ricerche geologiche o idrologiche (Carr and Rehmann, 2007; Garcia et al., 2007, Nystrom et al., 2007). Inoltre, strumentazioni ADCP sono state utilizzate per stabilire indici di velocità in reti di canali e hanno migliorato notevolmente il rapporto costi/benefici, l'accuratezza



e la qualità delle misure di portata. L'ADCP è stato utilizzato da Kinzli et al. (2010) per determinare le perdite dei canali nel bacino del Rio Grande. Kinzli et al. (2010) riuscirono inoltre a stabilire una relazione tra le perdite dei canali e alcuni parametri caratteristici, quali profondità, contorno bagnato e altezza del pelo libero.

In particolare Kinzli trovò un coefficiente di determinazione R^2 di 0,80 per quanto concerne la correlazione tra perdite e portata dei canali ed un coefficiente R^2 di 0,79 per quanto concerne la correlazione tra perdite dei canali irrigui e contorno bagnato dei canali.

2.3. *Il ponding test*

Il *ponding test*, da un esame della letteratura scientifica sull'argomento, risulta essere il metodo più accurato e affidabile per misurare perdite in canali piccoli ma non è utilizzabili in tutte le condizioni operative.

Questo metodo richiede, infatti, la creazione di uno sbarramento sul canale per permetterne il riempimento con acqua ferma e per misurare il conseguente abbassamento nell'altezza del pelo libero dell'acqua in un periodo prestabilito. Sebbene questo metodo sia accurato, è intrusivo e non può essere utilizzato su canali irrigui larghi, con molte derivazioni o con pendenza accentuata.

La tecnica del *ponding test* non è utilizzabile su tratti di canale con pendenza accentuata poiché in simili condizioni si otterrebbero superfici coperte dall'acqua troppo ristrette per poter stimare in maniera corretta i volumi d'acqua infiltrata.

Un ulteriore svantaggio del *ponding test* è rappresentato dal fatto che il materiale in sospensione può depositarsi sul contorno bagnato e ridurre il tasso di perdita totale (Alam e Bhutta, 2004). Altri Svantaggi sono rappresentati dalla rimozione o distruzione dei ricoprimenti di sedimenti naturali, dagli alti costi, e dalla fattibilità dei test stessi.

Smith e Turner (1982) analizzarono i risultati ottenuti con il metodo del *ponding test* e inoltre realizzarono uno studio sulla conducibilità elettrica che apparve correlata alla natura del *subsoil* e non alle perdite al contorno. Calcoli analitici mostrarono come le perdite al contorno sono influenzate molto di più dal limo depositato sul fondo che dagli orizzonti sottostanti. Tali autori discussero inoltre gli effetti dell'impermeabilizzazione naturale offerta dai sedimenti depositati.



2.3.1. Confronto tra il metodo *inflow-outflow* e il *ponding test*.

Alcuni autori si sono occupati di analizzare e confrontare i due metodi più diffusi, il *ponding test* e il metodo *inflow-outflow*, e di quantificare gli eventuali errori nelle misurazioni: Carter (1970) dimostrò come i metodi correnti potessero misurare flussi con errori del 2-3% o inferiori quando squadre esperte erano impiegate per le misurazioni. In precedenza, Kolupalia (1964) presentò un'eccellente illustrazione di come alti errori percentuali potessero comunque essere rilevati, non importa quanto esperta fosse la squadra responsabile delle misure.

Bodla et al. (1998) hanno condotto *ponding test* e misurazioni *inflow-outflow* in vari canali nell'area del Fordwah Eastern Sadiqia (Iran-Afghanistan). Gli autori hanno preferito l'affidabilità dei risultati ottenuti tramite *ponding test*. Hanno inoltre presentato un'analisi statistica sia dei dati ottenuti dai *ponding test* che di quelli ottenuti dalle misurazioni *inflow-outflow*, supportando in questo modo le loro opinioni.

Skogerboe et al. (1999) hanno studiato alcuni canali nel progetto "Fordwah Eastern Sadiqia Project" usando il metodo *inflow-outflow* e il *ponding test*. Nella maggioranza dei casi, essi hanno considerato preferibile l'utilizzo del metodo *inflow-outflow*, poiché le perdite sono misurate in normali condizioni operative. Essi hanno inoltre suggerito l'utilizzo del metodo del *ponding test* quando le perdite del canale sono relativamente basse. Contrariamente ad alcuni degli autori citati in precedenza (specialmente Bodla et al. 1998) essi non considerarono il metodo del *ponding test* come uno standard per valutare le perdite dei canali. Alcuni canali da loro esaminati mostrano un tasso di perdita negativo.

2.4. Fotografia all'infrarosso

La fotografia all'infrarosso può essere usata per determinare aree con alte perdite mediante l'analisi della copertura vegetativa poiché tratti di canali con perdite elevate presentano una vegetazione ripariale lussureggiante anche nell'attraversamento di aree aride (Engelbert et al., 1997; Meyer, 1975).

La fotografia all'infrarosso non quantifica realmente l'entità delle perdite, ma può comunque rivelarsi utile nell'identificazione delle aree in cui sia auspicabile un'impermeabilizzazione dei canali. Il maggior svantaggio della fotografia all'infrarosso è che non può essere utilizzata nelle aree in cui l'acqua disponibile nel suolo è sufficiente per la crescita ottimale della vegetazione.



2.5. *Misure di conducibilità elettrica*

La determinazione della conducibilità elettrica è un altro metodo che può essere utile per determinare i tassi di perdita dai canali irrigui. Le misure di conducibilità elettrica si possono eseguire mediante diverse tecniche. Le due maggiormente impiegate per il monitoraggio di vaste aree sono l'EM o EMI (Induzione Elettromagnetica) e l'ERT (Tomografia della Resistività Elettrica), quest'ultima fornisce una misura della resistività elettrica che è il reciproco della conducibilità elettrica. L'impiego delle misure di conducibilità elettrica per la determinazione delle perdite da canali irrigui richiede lo sviluppo di una relazione locale che rapporti i valori di conducibilità elettrica ad effettivi valori di contenuto idrico del suolo (Hotckiss et al., 2001).

Curtis e Kelly (1990) presero in esame le relazioni esistenti tra la conducibilità elettrica e le perdite dei canali irrigui, essi misero inoltre in relazione la conducibilità elettrica rispetto ad altri parametri fisici del suolo come la conducibilità idraulica.

Più recentemente, Banton e Seguin (1997) proseguirono gli studi di Curtis e Kelly cercando di discretizzare la variabilità spaziale delle proprietà fisiche del suolo. Nella fattispecie essi cercarono di testare l'utilizzo pratico di misure di conducibilità elettrica per determinare proprietà fisiche del suolo quali la distribuzione delle classi tessiturali e il contenuto di sostanza organica.

Brunet e Clement (2009) effettuarono studi per determinare il contenuto idrico del suolo tramite ERT e TDR (Riflettometria nel Dominio del Tempo). Le differenze tra i dati ottenuti mediante le due strumentazioni risultarono inferiori al 15%. Gli studiosi affermarono pertanto la possibilità di utilizzare i dati TDR per ottenere una curva di calibrazione per i valori di conducibilità elettrica. La determinazione del contenuto idrico da dati di conducibilità elettrica rimane un'operazione complessa, a causa dei numerosi fattori che la influenzano: porosità, temperatura, conducibilità dell'acqua nei pori, e contenuto idrico del suolo. Un utilizzo più esteso della conducibilità elettrica per la misurazione del contenuto idrico dei suoli non può non esimersi da una serie di misurazioni di controllo ottenute da altre strumentazioni quali il TDR.

Gli studi citati hanno permesso una maggiore comprensione delle relazioni che intercorrono tra la conducibilità elettrica e il contenuto idrico del suolo. Sulla base di tali relazioni si può affermare che, i suoli circostanti a tratti di canali con alte perdite al contorno mostrano valori elevati di conducibilità elettrica dovuti al loro elevato contenuto idrico, come dimostrato da Abdu et al.



(2008). Infatti, essi hanno determinato le aree di flusso iporeico di torrenti in asciutta in una zona dell'Idaho (USA) caratterizzata da clima semiarido attraverso l'analisi di mappe della conducibilità elettrica dei suoli. Inoltre si può affermare che, quando il contenuto idrico si mantiene costante in un dato suolo, il valore di conducibilità è più basso in concomitanza di perdite da canali irrigui, come dimostrato da Akbar et al. (2011), che hanno impiegato la tecnica EM per la valutazione dell'impermeabilizzazione dei canali irrigui nel bacino del Southern Murray-Darling (Australia).

2.6. Altre tecniche.

Bouwer (1961) propose alcune tecniche per misurare le perdite dei canali o dei bacini usando misuratori di contorno (*seepage meter*). Egli misurò le perdite creando deliberatamente le differenze di pressione tra l'interno del misuratore e l'acqua circostante, misurando i conseguenti flussi in entrata e in uscita. Questa tecnica è utile per misurare perdite al contorno localizzate.

Bouwer e Rice (1968) presentarono tecniche per la misurazione delle perdite al contorno dei canali irrigui basate sulla penetrazione di sali. La tecnica essenzialmente consisteva nel coprire una parte del fondo del canale o della scarpata con uno strato di cristalli di cloruro di sodio. La concentrazione salina fu misurata con una sonda in grado di misurare la conducibilità elettrica dopo aver lasciato abbastanza tempo al sale affinché si dissolvesse e penetrasse nel materiale sul fondo con il flusso di perdita in uscita. La tecnica è utile per determinare le perdite al contorno localizzate al contrario della tecnica inflow-outflow, che richiede sezioni più lunghe per ottenere tassi di perdita ragionevolmente accurati.



3. Materiali e metodi

3.1. *Criteri per la scelta dei siti di studio*

Per quanto concerne la scelta dei siti di studio si è operata secondo i seguenti principi:

- 1) Sono stati scelti tratti di canale facilmente raggiungibili con automobile per facilitare la logistica delle campagne di misurazioni.
- 2) Si è cercato di scegliere tratti di canale il più possibile rettilinei per poter più facilmente calcolare le portate dopo aver eseguito le misure con mulinelli idrometrici e con Acoustic Doppler Profiler.
- 3) Si sono scelti tratti di canale con vegetazione ripariale non eccessivamente rigogliosa per facilitare le campagne di misura con GEM-2 e TDR.
- 4) I tratti di canale sono anche stati scelti in base alla disponibilità, sia a monte sia a valle degli stessi, di ponti o attraversamenti sul canale tali da facilitare le operazioni di misurazione con mulinelli idrometrici. Un vantaggio collaterale dell'utilizzo di queste costruzioni è derivato dal fatto che il fondo del canale sotto agli attraversamenti, essendo artificiale, solitamente presenta una geometria regolare che facilita notevolmente la messa in posizione dei Doppler Profiler.

Originariamente il progetto “Linee guida per la valutazione delle perdite dei canali irrigui” prevedeva l'analisi di cinque canali appartenenti ai seguenti consorzi:

1. Consorzio irriguo Balera di Osasco
2. Coutenza dei canali ex-demaniali della pianura di Cuneo.
3. Consorzio irriguo Rogge Tortonesi
4. Consorzio irriguo del Canale Caluso
5. Consorzio irriguo della Val Vermenagna



Da un sopralluogo in campo si è constatato di come i canali di Caluso (Consorzio irriguo Canale Caluso) e Boves (Consorzio irriguo della Val Vermenagna) presentassero flussi ad elevata turbolenza con variazioni di portata repentine anche in un arco temporale di pochi minuti.

Le eventuali perdite rilevate nei canali di Caluso e di Boves sarebbero state pertanto indistinguibili dal margine di errore degli strumenti.

Si è pertanto deciso fosse più conveniente allocare le risorse destinate ai dei due canali verso uno studio più dettagliato dei canali rimanenti.



3.1.1. Osasco – Consorzio irriguo Balera di Osasco

Il tratto di canale oggetto di studio è stato individuato in località Chisonetto (Osasco).

La campagna di misura è stata suddivisa in due fasi: una con acqua corrente nel canale effettuata in data 21 aprile 2011 e una senz'acqua nel canale effettuata in data 2 maggio 2011.

La vegetazione arborea presente sulle sponde del tratto di canale in esame è costituita prevalentemente da *Robinia pseudoacacia* (L.), *Sambucus nigra* (L.) e *Fraxinus excelsior* (L.)

Lungo il tratto di canale oggetto di studio non sono presenti bocchette o altre derivazioni che sottraggono acqua dal canale. E' stata rilevata la presenza di una bocchetta laterale alcuni metri a monte dell'inizio dell'allineamento (per permettere l'irrigazione del campo di mais adiacente canale) ma è sempre stata chiusa durante le campagne di misura e non ha inficiato le misurazioni di portata. Sul medesimo tratto non sono presenti ulteriori ingressi d'acqua.

Per quanto concerne le misure di portata sono state individuate due sezioni lungo il canale: su di esse sono state realizzate le campagne di misura con due Acoustic Doppler Profiler e con due mulinelli idrometrici. Le sezioni sorgono a una distanza di 460 m l'una dall'altra.

La sezione di monte è stata individuata 160 metri circa a monte del tratto oggetto di studio.

La sezione di valle è stata individuata in corrispondenza di un tratto di canale con fondo e pareti in calcestruzzo 200 metri a valle del tratto oggetto di studio: in questo caso si è scelto di effettuare le misure in quel punto poiché la sezione rettangolare favoriva il rilievo della sezione bagnata.

Sono stati installati due Acoustic Doppler Profiler Isco 6700 nelle sezioni citate in precedenza per quantificare le eventuali differenze di portata (e di conseguenza le perdite) tra la sezione di monte e quella di valle. Il sensore ISCO 6700 ha permesso di rilevare l'altezza del pelo libero dell'acqua e la velocità della corrente ogni minuto. Le misurazioni con Doppler Profilerà sono durate sei ore.



Lungo il tratto di canale oggetto di studio sono stati individuati due allineamenti lunghi 100 metri, uno in destra e uno in sinistra idrografica e paralleli alla corrente: gli allineamenti sono composti da undici stazioni, distanziate 10 metri l'una dall'altra (Tavola 3.1.a).

Le stazioni sono state denominate con lettere in ordine alfabetico crescente seguendo la direzione della corrente.

Sono stati prelevati campioni di suolo in corrispondenza delle stazioni denominate con le lettere A, C, E, G, I e K su entrambe le sponde del canale. Sono inoltre stati prelevati campioni di suolo per ognuna delle stazioni presenti all'interno del canale (eccetto la stazione A perché in quel tratto il canale era ancora allagato). In tutto sono stati prelevati trentuno campioni di suolo.

Sono state realizzate prove d'infiltrazione con infiltrometri ad anello semplice per determinare la conducibilità idraulica del suolo. Sono state effettuate prove d'infiltrazione nelle stazioni A, C, E, G, I e K su entrambe le sponde del canale. Sono state realizzate prove d'infiltrazione anche in corrispondenza delle stazioni A, B, C e K sul fondo del canale.

Sono state realizzate misure TDR con apparecchiatura Tektronix 1502c in corrispondenza di tutte le stazioni precedentemente citate. Per ciascuna stazione sono state effettuate misurazioni a una distanza di 1, 2 e 3 metri dalla sponda del canale, con sonde di lunghezza 75 cm infisse verticalmente.

In occasione della seconda giornata sono state eseguite misure TDR anche con sonde da 15 cm per incorporare l'acqua caduta tramite le piogge dei giorni precedenti da quella presente in profondità rilevata dalle sonde da 75 cm.

La misura del contenuto idrico effettuata mediante TDR è stata appaiata alla misura della conducibilità elettrica eseguita tramite apparecchiatura EM (nella fattispecie il GEM-2 della Geophex). Gli allineamenti di misure EM, denominati linee, sono stati realizzati parallelamente al corso del canale. Le tre linee sono state così distribuite: la prima linea è stata rilevata sull'argine del canale (alla distanza di 1 metro circa dall'acqua), la seconda linea è stata realizzata ai piedi dell'argine in terra e la terza è stata rilevata a 1.5 metri di distanza dalla precedente verso l'interno del campo.



Il GEM-2 della Geophex permette di effettuare fino a nove misurazioni su diverse lunghezze d'onda in contemporanea: per il tratto di canale oggetto di studio è stato scelto di eseguire misurazioni con frequenze di 5, 10 e 20 kHz. Il GEM-2 è stato impostato per fare una misurazione (su tutte e tre le frequenze prestabilite) ogni 1.3 metri.

Per quanto concerne le misure TDR, all'interno del canale, con alcune difficoltà sono stati realizzati due allineamenti, anch'essi costituiti da undici stazioni. Un allineamento è stato situato a 0,5 m dalla sponda sinistra del canale e l'altro a 0,5 m da quella destra. La prima stazione (A) di entrambi gli allineamenti era ancora ricoperta dall'acqua sebbene il canale fosse in asciutta da alcuni giorni e pertanto non vi sono state effettuate misure TDR.

All'interno del canale sono state realizzate misure di conducibilità elettrica EM lungo i medesimi allineamenti individuati per le misurazioni con sonde TDR.



3.1.2. Fossano – Coutenza dei canali ex-demaniali della pianura di Cuneo.

Il tratto di canale oggetto di studio è stato individuato in località Murazzo (Fossano). La campagna di misura è stata suddivisa in due fasi: una con acqua corrente nel canale e una con il canale in asciutta. Le misure relative a quest'ultima fase non sono state eseguite in assenza di acqua sul fondo del canale, poiché nonostante la chiusura delle paratoie dell'opera di presa, nel canale è rimasto un flusso d'acqua di altezza pari a una ventina di centimetri. Questo flusso è probabilmente dovuto al fatto che il canale intercetta le acque provenienti dalla falda superficiale del pendio sovrastante. Testimoni locali affermano che la presenza di acque provenienti dal pendio è in realtà un fenomeno nuovo, tipico degli ultimi due anni. Si è comunque scelto di eseguire la seconda campagna di misure nonostante la presenza di alcuni centimetri d'acqua nel canale.



Figura n°1: Tratto di canale oggetto di studio. Nella foto è rappresentata la sponda in destra idrografica.



La prima campagna di misura (con acqua) è stata effettuata nelle date 20 e 27 aprile 2011, la seconda campagna, quella teoricamente senz'acqua, è stata realizzata in data 5 maggio 2011.

La vegetazione arborea presente sulle sponde del tratto di canale oggetto di esame è costituita prevalentemente da *Robinia pseudoacacia* (L.), *Sambucus nigra* (L.) e *Fraxinus excelsior* (L.)

Lungo il tratto di canale oggetto di studio non sono presenti bocchette o altre derivazioni che sottraggono acqua dal canale. E' stata rilevata la presenza di una bocchetta laterale alcuni metri a monte dell'allineamento - per permettere l'irrigazione del frutteto di kiwi (*Actinidia deliciosa* A.Chev.) che sorge lungo il canale - ma è sempre stata chiusa durante le campagne di misura e non ha inficiato la realizzazione delle misurazioni di portata. Lungo il tratto oggetto di studio non sono presenti ulteriori ingressi d'acqua.

Per quanto concerne le misure di portata sono state individuate due sezioni trasversali lungo il canale: su queste sezioni sono state realizzate le campagne di misura con due Acoustic Doppler Profiler e con due mulinelli idrometrici. Le due sezioni sorgono a una distanza di 300 m l'una dall'altra.

Sono state realizzate fotografie con termo camera in ciascuna stazione dell'allineamento.

La sezione di monte è situata in corrispondenza di un ponte interpodereale situato 100 metri circa a monte del tratto oggetto di studio: si è scelto di effettuare delle misure in questo in corrispondenza del ponte perché la sezione di canale rettangolare in cemento sottostante favoriva la misurazione della sezione bagnata.

La sezione di valle è stata individuata in corrispondenza di un ponte stradale situato circa 100 metri a valle del tratto oggetto di studio: anche in questo caso si è scelto di effettuare le misure in punto corrispondenza del ponte poiché la sezione rettangolare sottostante favoriva l'utilizzo del mulinello e perché le differenze di velocità attraverso la sezione trasversale erano minime poiché il tratto di canale era rettilineo.

Sono stati installati due Acoustic Doppler Profiler Isco 6700 nelle sezioni citate in precedenza per quantificare le eventuali differenze di portata tra le sezioni di monte e valle (e di conseguenza le relative perdite). Il sensore Isco 6700 ha permesso di rilevare l'altezza del pelo libero dell'acqua e



la velocità della medesima compiendo una misura al minuto. La durata delle misurazioni con Doppler Profiler è stata di sei ore.

Lungo il tratto di canale oggetto di studio è stato individuato un allineamento, parallelo alla corrente, della lunghezza di 100 metri situato sulla destra idrografica del canale: l'allineamento è composto di undici stazioni, distanziate 10 metri l'una dall'altra (Tavola 3.1.b).

Le stazioni sono state denominate con lettere in ordine alfabetico crescente seguendo la direzione della corrente. Sono stati prelevati campioni di suolo in corrispondenza delle stazioni denominate con le lettere A, C, E, G, I e K per un totale di sei campioni.

Nelle stazioni A, C, E; G, I e K sono state realizzate prove di infiltrazione con infiltrometri ad anello semplice per determinare la conducibilità idraulica del suolo. .

Per ciascuna stazione sono state realizzate due prove d'infiltrazione: una immediatamente sull'argine del canale in terra (a 1 metro circa dall'acqua) e una ai piedi dell'argine (a una distanza di circa 3 metri dalla precedente) onde valutare la variazione di conducibilità idraulica lungo l'argine.

Sono state realizzate misure TDR con apparecchiatura Tektronix 1502c in corrispondenza di tutte le stazioni precedentemente citate. Per ciascuna stazione sono state effettuate misurazioni a una distanza di 1, 2 e 3 metri dalla sponda del canale, con sonde di lunghezza 75 cm infisse verticalmente.

La misura del contenuto idrico rilevata mediante TDR è stata appaiata alla misura della conducibilità elettrica eseguita tramite apparecchiatura EM (nella fattispecie il GEM-2 della Geopex). Sono state realizzate misurazioni di conducibilità elettrica lungo linee parallele al corso del canale. Le tre linee sono state così distribuite: la prima è stata rilevata sull'argine del canale (a 1 metro circa di distanza dall'acqua), la seconda è stata realizzata ai piedi dell'argine in terra e la terza è stata rilevata a 1.5 metri di distanza dalla precedente verso l'interno del campo.

Il GEM-2 della Geopex permette di eseguire fino a nove misurazioni su diverse lunghezze d'onda in contemporanea: per il tratto di canale oggetto di studio è stato scelto di effettuare misurazioni con frequenze di 5, 10 e 20 kHz. Il GEM-2 è stato impostato per compiere una misurazione (su tutte e tre le frequenze prestabilite) ogni 1.3 metri.



Per quanto concerne le misure TDR all'interno del canale, con alcune difficoltà, sono stati realizzati tre allineamenti, anch'essi costituiti da undici stazioni. I tre allineamenti sono stati così distribuiti: uno sulla sinistra idrografica del canale, uno sulla destra idrografica e uno in centro. In corrispondenza di ciascuna sonda TDR è stata misurata l'altezza del pelo libero dell'acqua al fine di scorporare l'acqua sul fondo del canale dalle misure di contenuto idrico.

All'interno del canale sono state realizzate misure di conducibilità elettrica EM lungo i medesimi allineamenti individuali per le misurazioni con sonde TDR.



3.1.3. Tortona – Consorzio irriguo Rogge Tortonesi

Il tratto di canale oggetto di studio è situato sul territorio comunale di Rivalta Scrivia, ad alcune centinaia di metri di distanza dalla cascina Carcassola.

Per la campagna di misura tortonese, vista l'impossibilità da parte del consorzio di mettere in asciutta il canale, si è scelto di eseguire tre cicli di misurazioni a distanza di due mesi l'uno dall'altro, caratterizzati da una diversa altezza d'acqua all'interno del canale. La prima campagna di misura è stata realizzata in data 26 aprile 2011, con un'altezza d'acqua nel canale di circa 15 cm.

Durante Giugno è stato costruito uno sbarramento temporaneo sul fiume Scrivia che permette di derivare all'interno del canale una maggiore portata, alzando pertanto il livello del pelo libero dell'acqua.



Figura n°2: Nell'immagine è rappresentato il tratto di canale oggetto di studio. La foto è stata scattata da valle e raffigura la sinistra idrografica del canale nella parte destra della fotografia.



In seguito alla costruzione della diga sullo Scrivia si è deciso di eseguire la seconda campagna di misurazioni in data 24 giugno 2011. L'altezza d'acqua all'interno del canale in quella data era di 30 cm circa.

La terza campagna di misurazioni, con il canale in secca, è stata eseguita in data 14 Settembre.

Sul tratto di canale oggetto di studio non sono presenti bocchette per l'irrigazione o altre derivazioni che sottraggano acqua: l'irrigazione dei campi circostanti (coltivati prevalentemente a mais e grano) avviene mediante l'ausilio di pompe che pescano direttamente dal canale. Non sono presenti ulteriori ingressi d'acqua. Il fondo del canale giace a una quota di circa 2 metri inferiore al piano di campagna.

La vegetazione arborea presente sulle sponde del tratto di canale in esame è costituita prevalentemente da *Quercus robur* (L.), *Robinia pseudoacacia* (L.), *Prunus avium* (L.) e *Sambucus nigra* (L.).

Sono state individuate due sezioni trasversali lungo il canale, che sorgono a una distanza di 500 m l'una dall'altra. Su queste sezioni sono state realizzate le campagne di misure con Doppler Profiler e con mulinelli idrometrici. Sono stati installati due Acoustic Doppler Profiler Isco 6700 nelle sezioni citate in precedenza per quantificare le eventuali differenze di portata (e di conseguenza le perdite) tra la sezione di monte e quella di valle. Il sensore Isco 6700 ha permesso di rilevare l'altezza del pelo libero dell'acqua e la sua velocità. Il Doppler Profiler è stato impostato affinché eseguisse misurazioni ogni minuto. La sezione di monte è stata situata circa 400 metri a monte degli allineamenti, mentre la sezione di valle è stata situata in corrispondenza del termine degli allineamenti. Le misurazioni con Doppler Profiler sono durate sei ore.

Lungo il canale sono stati individuati due allineamenti di 100 metri di lunghezza (paralleli alla corrente): ciascun allineamento comprende undici stazioni, situate a una distanza di 10 metri l'una dall'altra (Tavola 3.1.c). Le stazioni sono state denominate con lettere in ordine alfabetico crescente seguendo la direzione della corrente.

Per quanto concerne l'allineamento in destra idrografica, sono state realizzate misure TDR con apparecchiatura Tektronix 1502c a una distanza di 1 metro dalla sponda del canale per ciascuna delle undici stazioni con sonde lunghe 75 cm infisse verticalmente.



Per quanto concerne l'allineamento in sinistra idrografica, in corrispondenza di ciascuna stazione sono state realizzate misure TDR a una distanza di 1, 2 e 3 metri di distanza dalla sponda del canale. Non è stato possibile installare le sonde TDR lunghe 75 cm nelle prime due stazioni (A e B) a causa dell'elevata pietrosità del suolo.

Sono state realizzate fotografie con termo camera in ciascuna stazione dei due allineamenti.

La misura del contenuto idrico TDR è stata appaiata alla misura della conducibilità elettrica eseguita tramite apparecchiatura EM (nella fattispecie il GEM-2 della Geophex). Sono state realizzate misure lungo linee parallele al corso del canale su entrambe le sponde. Nella fattispecie sono state effettuate misurazioni a 1, 2,5 e 4 metri dalla sponda del canale.

Il GEM-2 della Geophex permette di eseguire fino a nove misurazioni su diverse lunghezze d'onda in contemporanea: per il tratto di canale oggetto di studio è stato scelto di effettuare misurazioni con frequenze di 5, 10 e 20 kHz. Il GEM-2 è stato impostato per effettuare una misurazione (su tutte e tre le frequenze prestabilite) ogni 1.3 metri.

La sezione di monte è situata in corrispondenza del ponte interpoderele adiacente alla cascina Carcassola: l'ubicazione della stazione di misura delle portate a monte è stata scelta in corrispondenza del ponte perché la sezione di canale rettangolare in calcestruzzo favoriva la misura della sezione bagnata.

La sezione di valle è stata invece individuata in corrispondenza dell'ultima stazione (K) degli allineamenti laterali. Le due sezioni sorgono a una distanza di 500 m l'una dall'altra.

Sono stati prelevati campioni di suolo su entrambe le sponde nelle stazioni denominate con le lettere A, C, E, G I e K per un totale di dodici campioni.



3.2. Metodologie e protocolli di misura

3.2.1. TDR (*Time Domain Reflectometry*)

Il contenuto idrico del suolo θ è generalmente definito come rapporto tra massa di acqua presente e massa di suolo secco o come volume d'acqua presente nell'unità di volume del suolo. Nella maggior parte delle applicazioni è conveniente tuttavia definire il contenuto idrico del suolo su basi volumetriche esprimendolo attraverso il rapporto dimensionale volume di acqua/volume di suolo.

Più in dettaglio possiamo dire che l'umidità è legata alla forza di capillarità, il che determina il cosiddetto "potenziale matriciale". Tale potenziale, identificabile anche come "suzione" o "tensione", è in diretta dipendenza dalla struttura e dimensione dei pori, e aumenta al diminuire del contenuto idrico del suolo. In base a tale potenziale, l'acqua può essere distinta in gravitazionale, capillare e legata. Per il rilievo di tale umidità è stata sfruttata la tecnica della "riflettometria nel dominio del tempo" (TDR).

L'uso della strumentazione TDR permette, in breve di conoscere l'umidità del suolo valutando il tempo che impiega un impulso elettromagnetico a percorrere interamente un conduttore (sonda) posto nel suolo stesso.

Questo metodo consente di rilevare la permittività apparente del suolo (rapporto tra la permittività elettrica assoluta e quella del vuoto), da porre in relazione all'umidità, in quanto essa è fortemente sensibile alla frazione d'acqua presente, attraverso la misura della velocità di propagazione di un segnale elettromagnetico convogliato in una linea di trasmissione.

La permittività relativa del suolo è messa in relazione al suo contenuto idrico volumetrico mediante formule empiriche o fisicamente basate (Topp et al., 1980; Roth et al., 1990; Hook e Livingston, 1995).

La misura è stata effettuata installando nel terreno tre conduttori metallici paralleli di lunghezza nota e inviando in essi, mediante un'apparecchiatura Tektronix 1502c, un impulso di tensione di circa un volt, caratterizzato da un ripido fronte di risalita.

Il segnale, che si propaga con una velocità che dipende dalle proprietà dielettriche del suolo, giunto al termine della linea, si riflette e ritorna verso l'apparecchiatura, la quale provvede alla sua registrazione, consentendo la misura del tempo di transito nella linea, e quindi della sua velocità di propagazione.



Per consentire le misure in campo sono state utilizzate sonde di nostra fattura, costituite da due conduttori cilindrici paralleli in acciaio inossidabile, intervallati l'un l'altro da 7 cm, fissati a un distanziatore di nylon avente la forma di parallelepipedo e connessi all'apparecchiatura da un cavo coassiale con impedenza di 50 Ω

Le registrazioni effettuate con l'apparecchiatura TDR forniscono le variazioni nel tempo della somma dell'impulso di tensione emesso e delle sue riflessioni e consentono di esplorare l'intero percorso del segnale, fornendo informazioni su eventuali discontinuità.

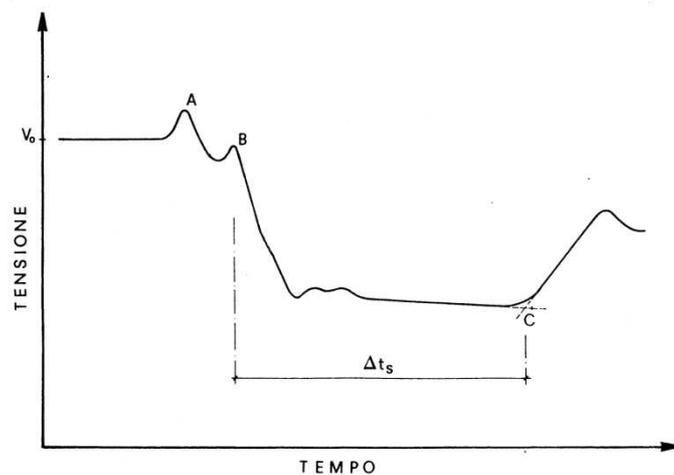


Figura n.3: Tipica registrazione effettuata con apparecchiatura TDR in suolo umido.

Il punto v_0 rappresenta il segnale in uscita. Il punto A corrisponde a eventuali riflessioni di modesta entità generate dal distanziatore delle aste. Il punto B corrisponde all'ingresso del segnale nel suolo, dove, per variazione del dielettrico, una notevole parte è riflessa e torna all'apparecchiatura, determinando la rigida riduzione della tensione registrata; la restante parte del segnale prosegue nel suolo guidata dalle aste metalliche e quando giunge al termine, è riflessa e torna indietro.

Il punto C identifica invece l'incremento di tensione che si verifica nel momento in cui il segnale riflesso giunge all'apparecchiatura. La sua individuazione spesso è difficile in quanto la risalita della tensione non è mai netta, ma in pratica è distribuita in un intervallo di tempo che può essere molto breve (in questi casi avremmo una risalita netta) o più lungo (con una risalita della curva più graduale).

Un'individuazione più sicura del punto C può essere ottenuta mediante l'intersezione delle tangenti al diagramma nel tratto ascendente e in quello precedente. L'intervallo tra B e C (Δt_s) fornisce il tempo impiegato dall'impulso a percorrere la linea di trasmissione infissa nel suolo e tornare indietro. La velocità di propagazione nel suolo è inversamente proporzionale al suo contenuto idrico



volumetrico. In realtà per essere precisi occorre pensare che questo tipo di strumento non misura propriamente la velocità di propagazione del segnale, bensì le cadute di tensione del segnale stesso. Il suolo rappresenta il dielettrico entro il quale il segnale si disperde, mentre i conduttori rappresentano solo una guida per il segnale. Ecco perché, in presenza di un suolo con elevato contenuto idrico, una parte consistente del segnale si disperde nel mezzo e la risalita di tensione registrata dallo strumento nel momento in cui il segnale torna indietro avverrà “più tardi” rispetto a una situazione di suolo asciutto, in cui invece il segnale non si disperde nel mezzo e la riflessione avverrà prima, determinando un intervallo minore.

L'intervallo di tempo così misurato è utilizzato nella relazione seguente per determinare la permittività apparente (K):

$$K = ((\Delta t * c) / 2L)^2 \quad (2.1)$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto e L la lunghezza della sonda. Il fattore moltiplicativo 2 si rende necessario quando Δt è ottenuto con un metodo riflettometrico in cui il segnale percorre due volte la lunghezza della sonda prima di essere rilevato dall'apparecchiatura. In realtà in alcune apparecchiature TDR il punto C non corrisponde all'incremento di tensione che si registra quando il segnale torna all'apparecchiatura, bensì all'incremento che si registra quando il segnale giunge al termine della sonda e inizia a tornare indietro. Pertanto nella determinazione di K si è diviso il valore di Δt per la semplice lunghezza della sonda L .

Successivamente tale parametro ci permette di calcolare il volume di acqua a partire, ad esempio, da una “relazione universale” di origine empirica, costituita da un polinomio di terzo grado (Topp et al., 1980):

$$\theta = (-530 + 292K - 5.5K^2 + 0.043K^3) * 10^{-4} \quad (2.2)$$

Tale relazione, anche se non descrive scientificamente l'effettiva relazione tra permittività e contenuto idrico volumetrico, ha contribuito efficacemente alla diffusione di questa tecnica in quanto non richiede alcuna calibrazione né alcun campionamento e la sua validità copre tutto il campo dei contenuti idrici che si riscontrano nelle principali applicazioni pratiche. Essa fornisce inoltre valori più che accettabili specie quando è necessario rilevare le variazioni nel tempo dei contenuti idrici in un profilo di suolo.

La misura dell'umidità è stata effettuata con una singola sonda piantata verticalmente nel terreno in modo da ottenere un valore medio dell'umidità lungo tutto il profilo. Questa procedura è la più



semplice e di immediata applicazione, ma può comportare alterazioni nella misura in quanto, infiggendo verticalmente le aste nel suolo, si possono attivare vie di deflusso preferenziali per l'acqua o, in suoli rigonfiabili, si può innescare il fenomeno delle fessurazioni.

L'utilizzo del TDR si è mostrato particolarmente vantaggioso in campo in quanto le misure sono indipendenti dalla geometria delle sonde, dalla temperatura del suolo e da altri eventuali parametri quali salinità o magnetismo.

Le caratteristiche tecniche dell'apparecchio sono le seguenti:

- campo di misura: 0-100% di umidità;
- errore massimo assoluto: 2%;
- temperature di esercizio: 0-45 °C;
- display LCD retroilluminato;
- lo schermo fornisce informazioni sulle misure effettuate dallo strumento e sulle sue condizioni;
- lo schermo indica il fattore di velocità di propagazione regolabile (V_p);
- presenza di filtro digitale per ridurre i disturbi del segnale;
- robusto, portatile e progettato per applicazioni in campo;

Caratteristiche fisiche e tecniche del segnale:

- *tipo di segnale*: gradino di tensione con fronte rapido;
- *ampiezza del segnale* : 300 mV nominali con impedenza di 50 Ω in uscita;
- *fonte di energia* : batteria interna da 12 V;
- *linea AC* : 115/130 V oppure circa 220 V;
- *Dimensioni*:

altezza:17 cm;



larghezza: 30 cm;

profondità: 48 cm;

peso netto: 10 Kg



Figura n.4 : Apparecchiatura TDR Tektronix 1502c.

3.2.2. Prove di Infiltrazione



Le prove d'infiltrazione sono state eseguite servendosi di un semplice test di campo elaborato da Haverkamp (1998) che permette di valutare il comportamento idrodinamico degli orizzonti con pochi strumenti poco costosi e facilmente reperibili. Tale tecnica, denominata “ test del cilindro unico “, necessita di un infiltrometro ricavato da un semplice tubo in PVC (di 10 cm di diametro e 15 cm di altezza) che sarà graduato internamente con una tacca ogni centimetro.

Tale cilindro ha le seguenti dimensioni:

larghezza = 10.4 cm;

altezza = 15 cm;

area = 83.32043 cm²

volume = 98.17 cm³

Le letture sulla scala graduata sono state effettuate a intervalli di tempo appropriati a descrivere la curva d'infiltrazione. Le prove sono durate al massimo 50 minuti.

Una volta scelta una zona rappresentativa, e dopo avere rimosso, dove presente, il manto vegetale, il cilindro viene infisso nel suolo per 2 cm di profondità, facendo attenzione a perturbare il meno possibile la superficie e al tempo stesso impedire la fuoriuscita di acqua per risalita esternamente al cilindro.

Successivamente si porrà sul fondo una sottile rete di plastica (diametro 10 cm) per evitare la formazione di una sospensione nel versare l'acqua che potrebbe formare una crosta superficiale durante l'infiltrazione alterando il rilievo.

Si versa poi nel cilindro 10 cm di acqua il più rapidamente possibile, ma con l'accorgimento di utilizzare un cucchiaino piegato o una mano per smorzare l'energia di caduta.

Contemporaneamente è fatto partire il cronometro e sono annotati tutti i tempi di passaggio dell'acqua da una tacca all'altra.

3.2.3. IL sensore GEM-2 della Geophex



Il GEM-2 della Geophex è un sensore EM digitale portatile e multifrequenza. Il GEM-2 opera in un range di frequenze che varia dai 300 Hz ai 96 kHz, e può trasmettere un'onda elettromagnetica contenente differenti frequenze. L'unità è in grado di trasmettere o di ricevere qualsiasi onda elettromagnetica sintetizzata digitalmente attraverso una tecnica di modulazione della larghezza d'impulso. Il suo software interno permette a un operatore di coprire 0.4 ha di terreno all'ora con linee distanziate di 1.5 metri.



Figura n°5: Il GEM-2 della Geophex

Lungo la linea di misurazioni, la densità di rilievo è all'incirca di un dato ogni 15 cm, risultanti in oltre 20000 dati puntuali per 0.4 ha per ora. La portabilità, la velocità di misurazione e la densità di dati ottenuti sono tutti requisiti importanti per l'analisi geofisica di siti caratterizzati da problematiche ambientali.

Il sensore GEM-2 funziona in multifrequenza perché inizialmente è stato sviluppato per rintracciare oggetti o discontinuità nel suolo. L'idea di utilizzare frequenze multiple deriva dal concetto secondo il quale, la profondità di esplorazione sia inversamente proporzionale alla frequenza: un segnale a bassa frequenza viaggia più in profondità attraverso un suolo conduttibile, e pertanto riesce a rilevare strutture e oggetti presenti in profondità, mentre un segnale ad alta frequenza può attraversare soltanto una breve distanza e pertanto rilevare strutture superficiali con maggiore precisione. Pertanto operando su una finestra composta di diverse frequenze, è possibile rilevare un singolo oggetto a diverse profondità.



Tradizionalmente i dati EM rappresentano una “conducibilità apparente” immaginando che gli orizzonti di suolo sotto il sensore siano rappresentati da uno spazio omogeneo e isotropico. Molto spesso questa ipotesi non è verificata, pertanto diventa difficile individuare con precisione la profondità d’indagine. Siccome la profondità d’indagine è funzione della frequenza cui opera lo strumento, ma da essa non è definita in modo univoco, si consiglia di operare sempre alla medesima frequenza qualora le campagne di misura EM debbano essere confrontabili. Ciò presuppone che, qualora siano impiegati strumenti a singola frequenza, si debba scegliere e impiegare un unico modello per tutte le campagne di misura che debbano fornire dati direttamente confrontabili. Rispetto alle tecniche geofisiche concorrenti, il metodo EM presenta vantaggi significativi per la caratterizzazione di orizzonti pedologici o rocciosi superficiali. A differenza dei radar sismici o a penetrazione del terreno che dipendono da pesanti vincoli logistici e un utilizzo intensivo di manodopera in campo, gli strumenti EM richiedono un solo operatore e non toccano terra (non sono invasivi).

3.2.4 Acoustic Doppler Profiler



Un *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP) è un sensore sonar in grado di produrre misurazioni delle velocità di corrente per determinate profondità.

Gli ADCP sono strumenti piuttosto versatili e possono essere configurati in diverse modalità secondo gli scopi prefissati: possono essere posizionati in fiumi e canali per misurazioni continue delle portate, possono essere montati sul fondo d'imbarcazioni per l'analisi delle correnti sottomarine oceaniche e lacustri e possono infine essere posizionati sui fondali marini vicini alle coste per misurazioni a lungo termine delle maree marine.

Secondo il campo di applicazione, gli ADCP possono usare una vasta gamma di trasduttori, solitamente composti in ceramica. Questi trasduttori sono posizionati in maniera tale che gli impulsi sonori emessi viaggino attraverso l'acqua in direzioni differenti ma note.

Quando l'onda sonora viene riflessa, subisce un'alterazione di frequenza, secondo un fenomeno noto con il nome di Effetto Doppler, a causa della velocità relativa dell'acqua.

L'impulso sonoro viene riflesso al trasduttore quando incontra degli oggetti: esso può pertanto fornire indicazioni sulla velocità di questi oggetti e della corrente (se gli oggetti si muovono al suo interno).

Ci sono alcuni fattori da cui dipende l'accuratezza, risoluzione e range delle misurazioni. I più importanti sono: l'assorbimento e la dispersione del segnale, la velocità del suono nell'acqua, l'ampiezza d'onda dell'impulso sonoro, la frequenza, la dimensione del trasduttore e la forza del segnale riflesso verso lo strumento.

Le seguenti considerazioni riguarderanno il Modulo Area-Velocità 750 della ISCO. Due di questi moduli sono stati utilizzati per le campagne di misura di questo progetto. Il sensore rileva la velocità media di un liquido indifferentemente se esso si muove da monte verso valle o viceversa.

Il sensore, equipaggiato con un trasduttore di pressione interno, misura anche l'altezza del pelo libero dell'acqua.

La conversione dai dati misurati dallo strumento alle portate effettive richiede tre parametri: l'altezza del pelo libero dell'acqua, la velocità della corrente e la geometria della sezione trasversale in cui avviene la campagna di misurazioni.



Il sensore ISCO 750 misura l'altezza del pelo libero e la velocità della corrente. La geometria del canale può essere inserita in diversi modi: il metodo più semplice consiste nell'utilizzare l'unità di *Flow Conversion* che è fornita insieme al software dello strumento. Nell'unità di *Flow Conversion* sono elencate diverse modalità di conversione per arrivare direttamente ai valori di portata: l'equazione di Manning, la conversione *Level to Flow Rate Data Points* e le modalità di conversione *Weir* e *Flume* (briglia e derivazione) che tengono conto dei casi in cui il sensore sia posizionato su una struttura artificiale. Tutti questi metodi hanno in comune il fatto di aver bisogno di dati sulla pendenza, scabrezza, ampiezza e forma del canale.

Per quanto concerne le campagne di misurazione realizzate in questo progetto, si è scelto di non utilizzare questi metodi proposti di conversione. E' stato ritenuto più opportuno coniugare le misure di velocità e altezza di pelo libero rilevate dallo strumento con le misurazioni della geometria della sezione trasversale del canale in una fase di elaborazione successiva alle campagne di misurazione, al fine di ottenere valutazioni delle portate più precise e verificare ad ogni passo i risultati ottenuti.

Il trasduttore differenziale di pressione interno allo strumento misura l'altezza del pelo libero. Il trasduttore è un piccolo disco piezo-resistivo che rileva la pressione trasmessa su di un diaframma di acciaio inossidabile. La faccia esterna del diaframma è esposta alla corrente attraverso le aperture presenti sul retro del sensore. La faccia interna è esposta, o referenziata, all'atmosfera attraverso il tubo interno che corre lungo il cavo dello strumento.

La differenza tra le pressioni esercitate sulle due facce del diaframma è la pressione idrostatica. Il trasduttore converte la pressione idrostatica in segnali analogici. In seguito i segnali sono inviati al modulo ISCO 750.

Poiché la pressione è proporzionale al livello della corrente, il modulo può convertire il segnale analogico in un'altezza di pelo libero.

Il sensore Area-Velocità dell'ISCO 750 misura la velocità media della corrente utilizzando onde ultrasoniche e l'effetto Doppler. L'effetto Doppler afferma che la frequenza di un'onda che passa da un oggetto a un altro è funzione alle velocità con cui si muovono entrambi gli oggetti. Se i due oggetti si avvicinano l'uno all'altro, la frequenza aumenta; se essi si allontanano l'uno dall'altro, la frequenza si riduce.



Il sensore Area-Velocità contiene un paio di trasduttori ultrasonici. Un trasduttore trasmette l'onda ultrasonica. Mentre l'onda trasmessa viaggia attraverso l'acqua, bollicine e particelle trasportate dalla corrente riflettono l'onda indietro verso il sensore Area-Velocità. Il secondo trasduttore riceve quest'onda riflessa. Il modulo compara le frequenze delle due onde. Un aumento o una diminuzione della frequenza dell'onda riflessa indicano rispettivamente una corrente che scorre verso il sensore o in direzione opposta.

Le dimensioni del canale e le altezze del pelo libero possono variare in differenti punti anche lungo un canale con pendenza regolare. E' importante effettuare le misurazioni della geometria del canale nello stesso punto in cui il sensore Area-Velocità rileva la velocità e l'altezza. L'onda ultrasonica è trasmessa con una geometria a forma di cono dinanzi alla parte frontale del sensore. Le misurazioni della geometria del canale andrebbero prese in un punto all'interno di questo cono ultrasonico. Poiché il cono non può essere visto, di regola si effettuano le misurazioni dinanzi al sensore lungo una linea al centro del canale a una distanza uguale all'altezza del pelo libero.

Per esempio, se l'altezza di pelo libero è di 30 cm, è necessario effettuare le misurazioni della geometria 30 cm a monte del sensore. Se la corrente in quel punto è turbolenta, bisogna prendere in considerazione l'ipotesi di spostare lo strumento.

Non bisogna misurare la geometria del canale proprio sulla verticale del sensore poiché il suo volume potrebbe provocare un piccolo salto o aumento localizzato dell'altezza di pelo libero. Ad altezze del pelo libero ridotte con velocità elevate questo salto può causare differenze di portata piuttosto rilevanti.

4. Risultati

4.1 Metodo *Inflow Outflow* per la determinazione delle perdite irrigue

4.1.1. *Acoustic Doppler Profiler*

Il modulo ISCO 750 è stato utilizzato per effettuare misurazioni, con tecnica *Acoustic Doppler Profiler*, sia dell'altezza di pelo libero che della velocità dell'acqua nelle sezioni precedentemente individuate lungo i tratti di canale oggetto di studio.



Le misurazioni sono state effettuate con una frequenza di un rilievo al minuto. I dati ottenuti sono stati successivamente mediati su un intervallo di tempo di 10 minuti.

Si è rivelata problematica l'analisi dei dati provenienti da alcune sezioni caratterizzate da basse velocità, come quella di monte a Tortona situata in un tratto del canale a pendenza quasi nulla. In alcuni casi la velocità raggiungeva valori inferiori al limite minimo del *range* di misura dello strumento e pertanto non rilevabili. I valori di velocità non rilevabili dallo strumento (registrate come NaN, *Not a Number*) sono stati eliminati nella fase di *post processing* dei dati acquisiti.

Osasco

Sezione di monte

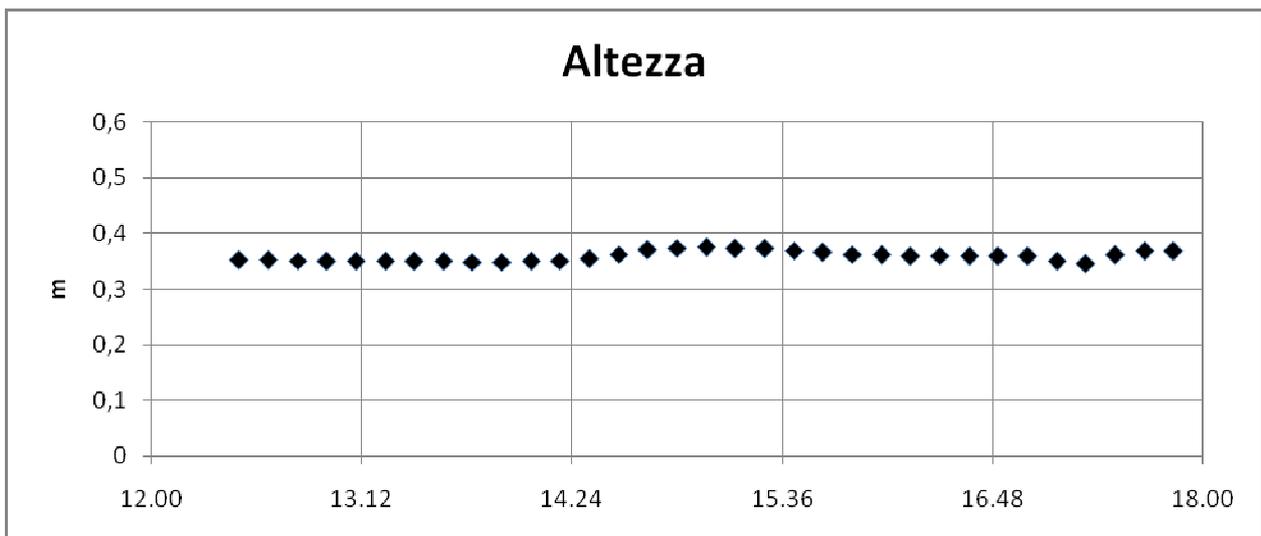


Figura n°6: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di monte del sito di Osasco.

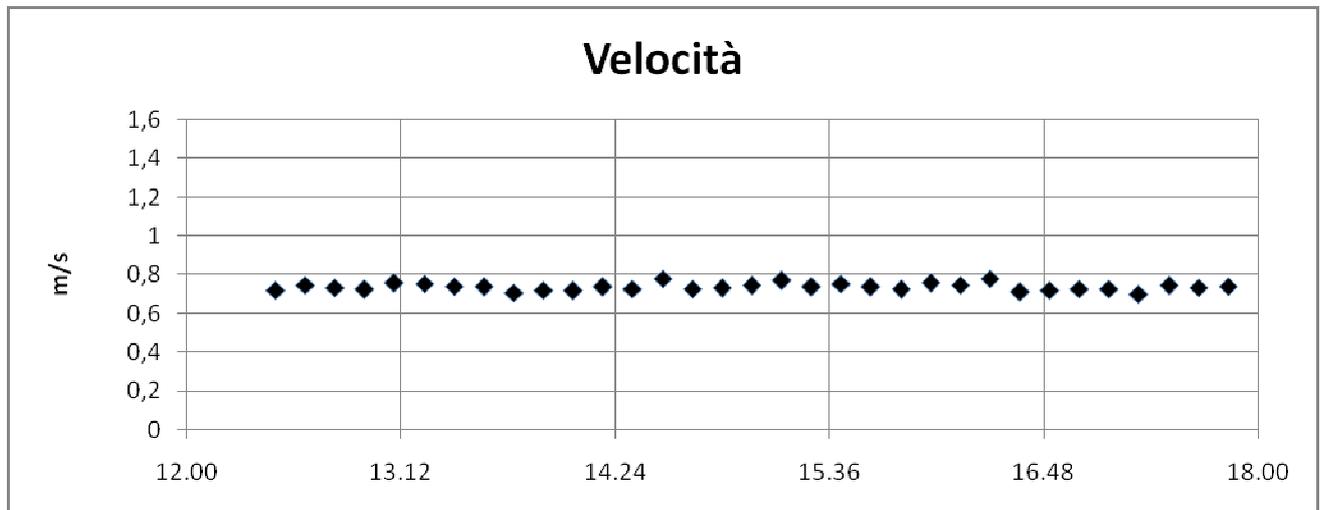


Figura n°7: Velocità dell'acqua nella sezione di monte del sito di Osasco.

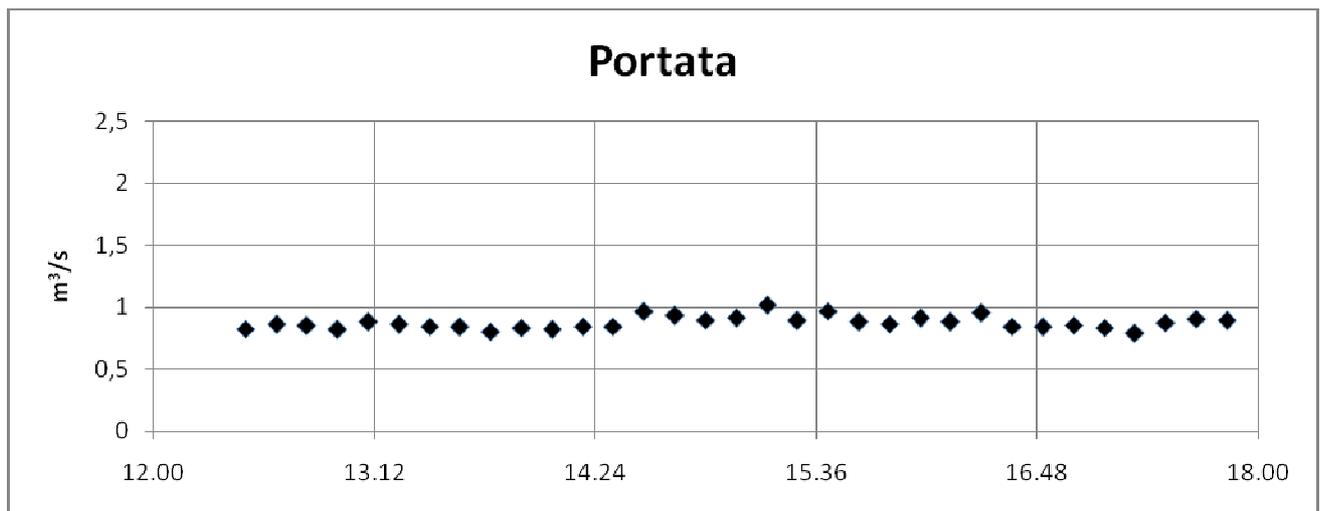


Figura n°8: Portata nella sezione di monte del sito di Osasco.



Sezione di valle

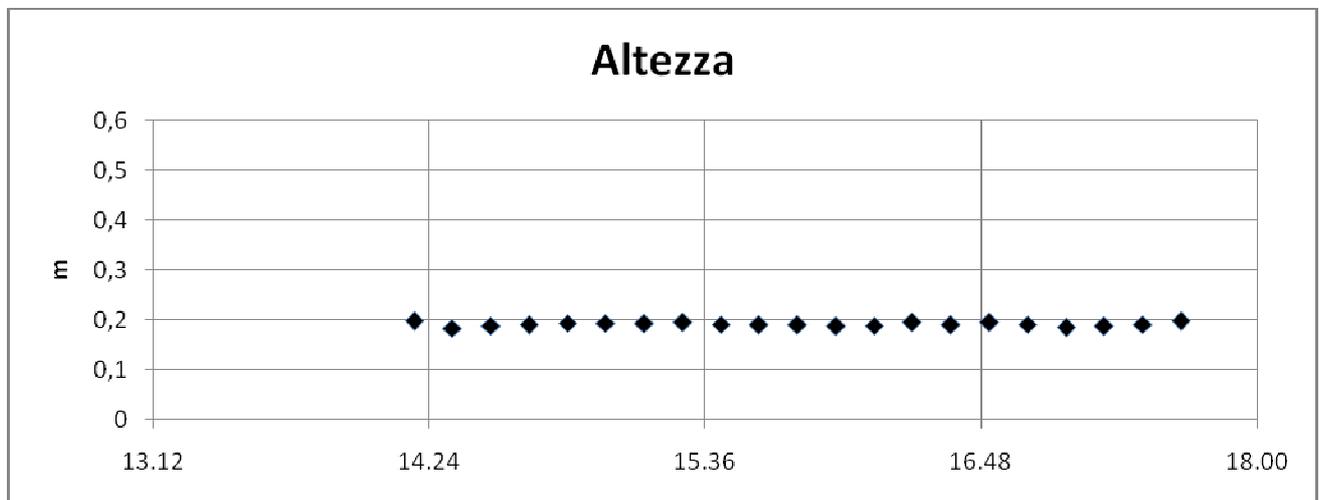


Figura n°9: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di valle del sito Osasco.

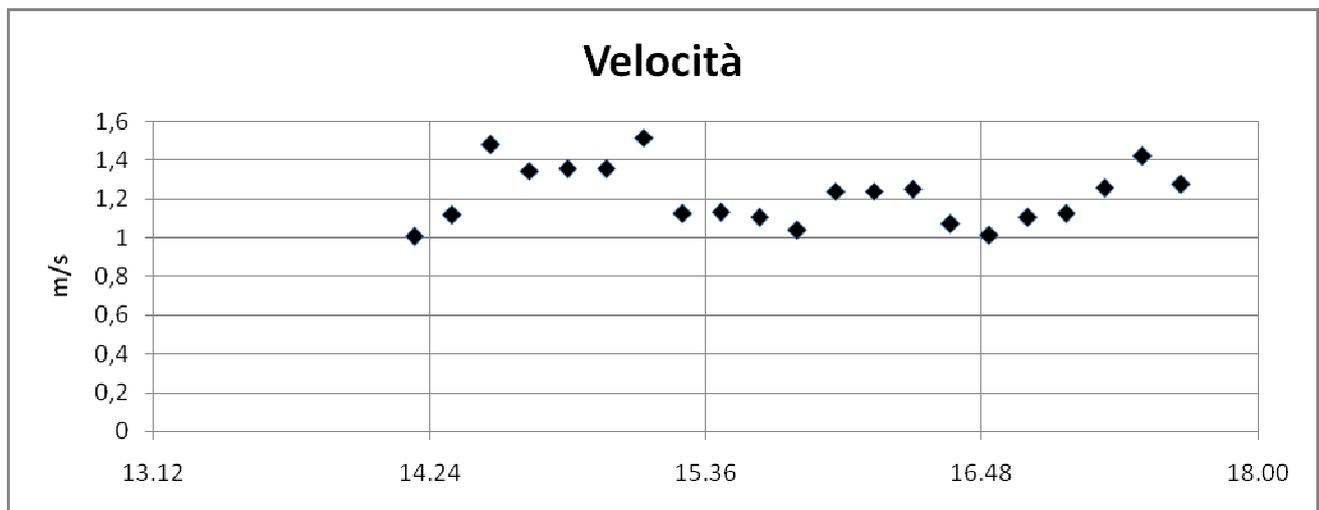


Figura n°10: Velocità dell'acqua nella sezione di valle del sito di Osasco.

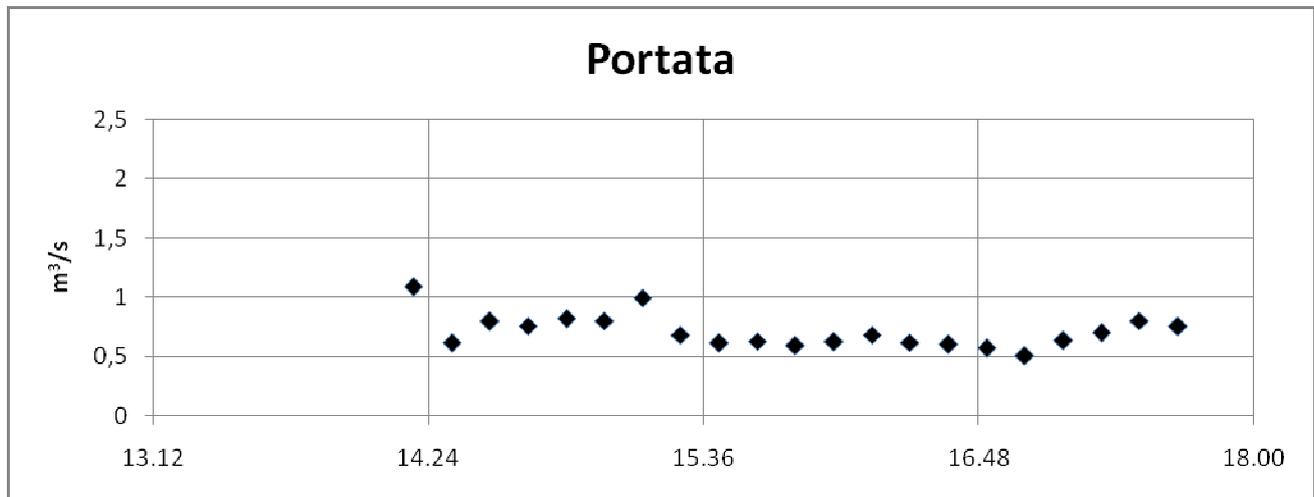


Figura n°11: Portata nella sezione di valle del sito di Osasco.

Confronto tra le portate

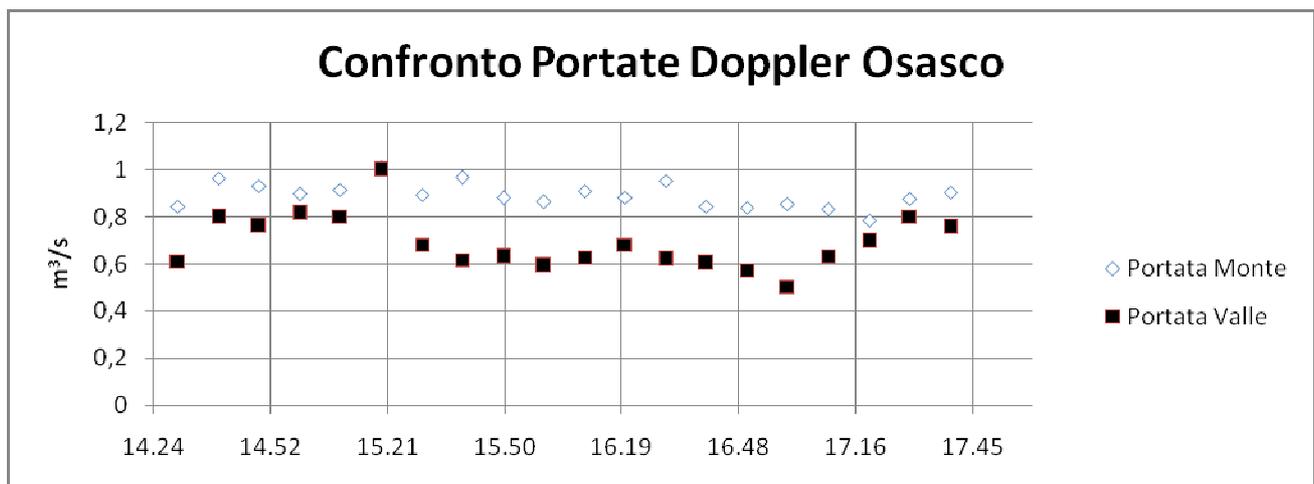


Figura n°12: Confronto portate nel sito di Osasco.

Dall'analisi dei valori medi di portata calcolati su intervalli di dieci minuti risulta una perdita di $0.203 \text{ m}^3/\text{s}$ sul tratto oggetto di studio, pari al 23% del volume iniziale della portata nella sezione di monte. Il metodo *Inflow-Outflow* non permette di individuare l'esatta ubicazione delle perdite, che potrebbero essere di entità elevata ma localizzate oppure di entità minore e distribuite lungo l'intero tratto di canale indagato. Osservazioni dell'area oggetto di studio hanno permesso di individuare ristagni di acqua proveniente dall'argine del canale in molti punti nel campo situato sulla sinistra idrografica. L'ampia diffusione dei ristagni idrici sul bordo del campo suggerisce perdite diffuse lungo il tratto di canale in esame.



Fossano

Sezione di monte

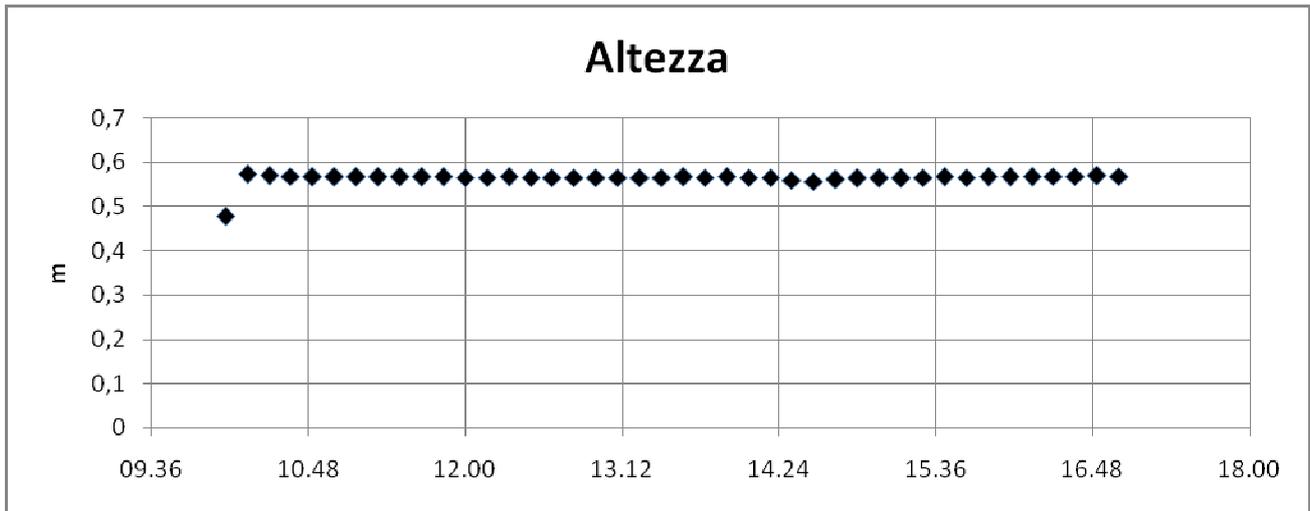


Figura n°13: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di monte del sito di Fossano.

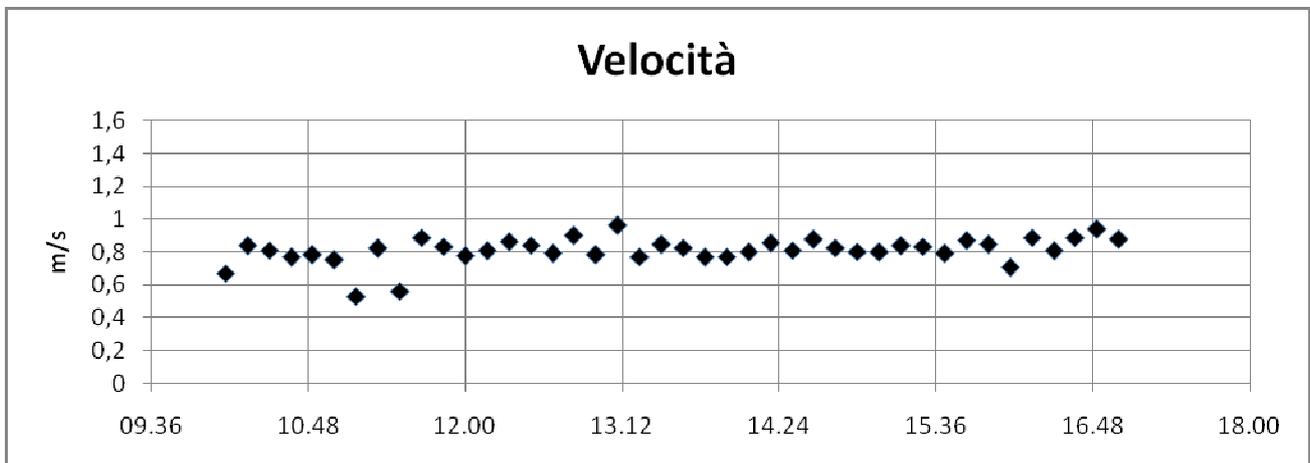


Figura n°14: Velocità dell'acqua nella sezione di monte del sito di Fossano.

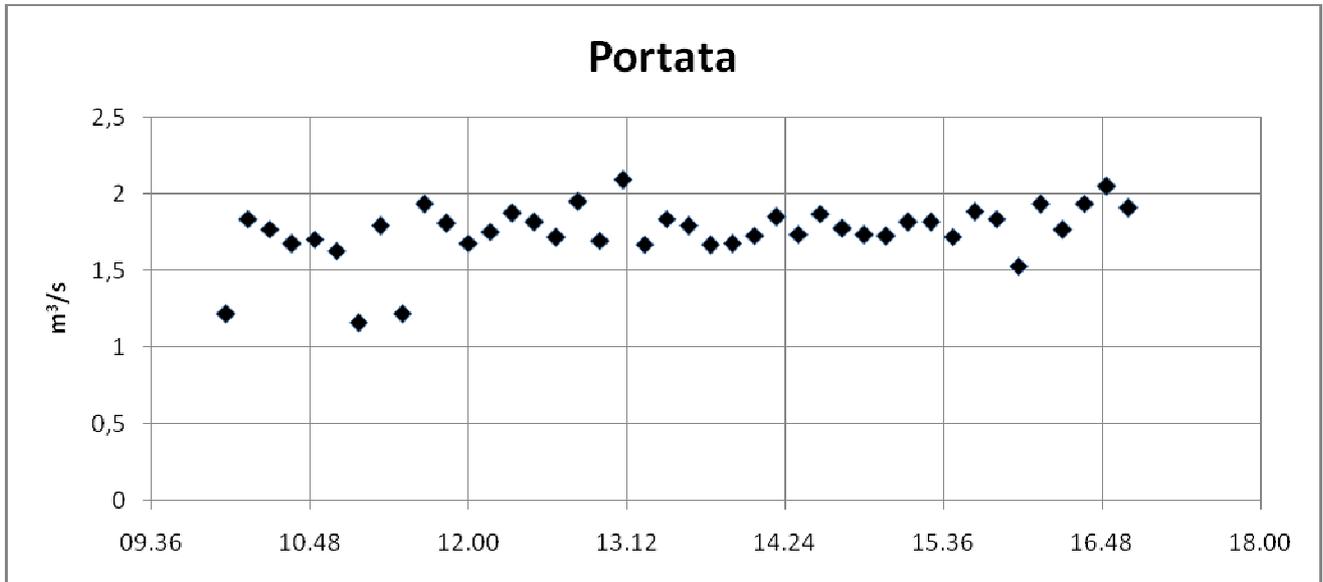


Figura n°15: Portata nella sezione di monte del sito di Fossano.

Sezione di valle

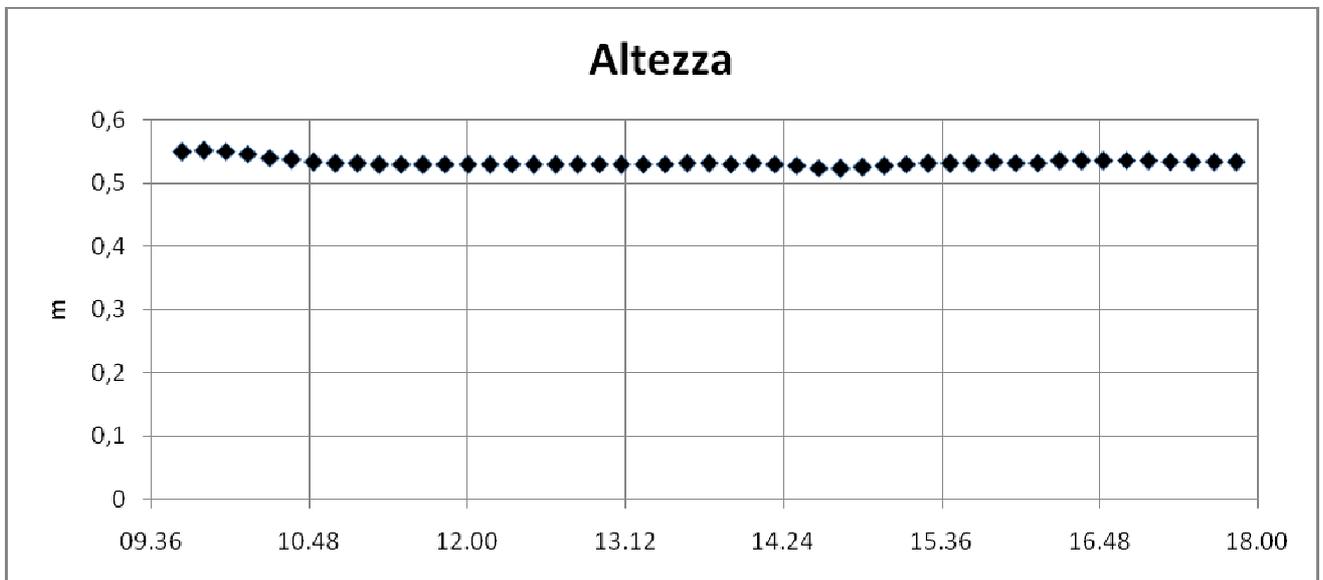


Figura n°16: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di valle del sito di Fossano.

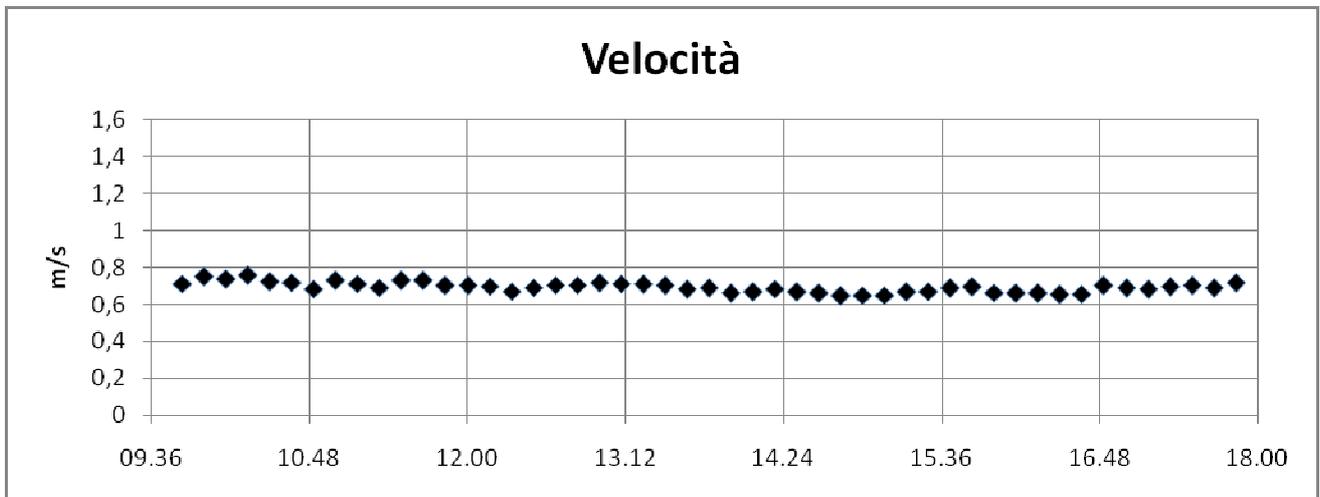


Figura n°17: Velocità dell'acqua nella sezione di valle del sito di Fossano.

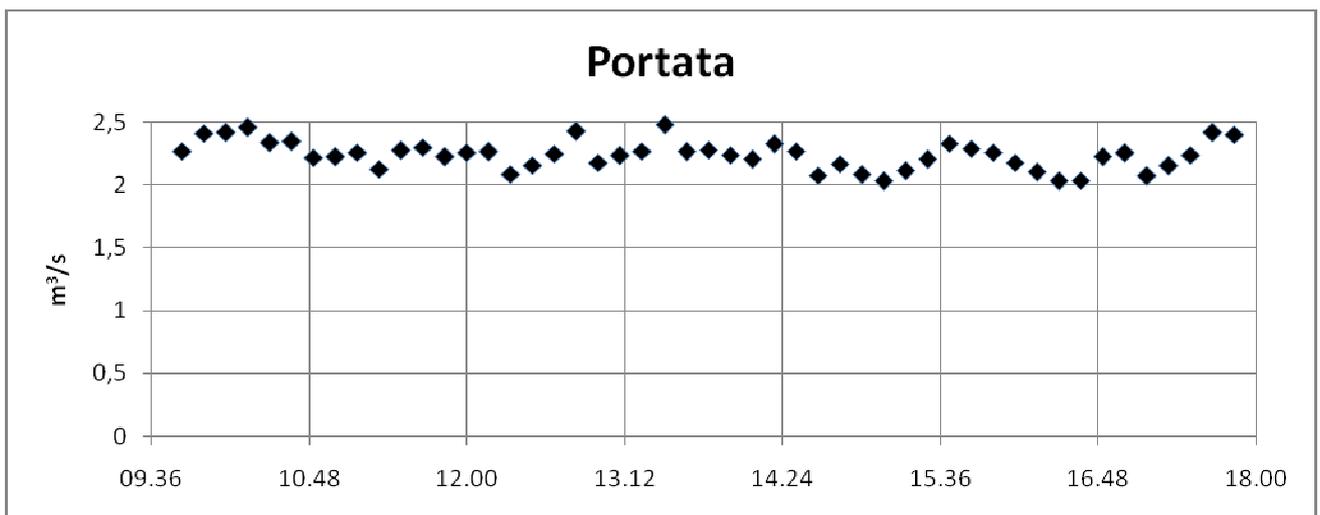


Figura n°18: Portata nella sezione di valle del sito di Fossano.



Confronto tra le portate

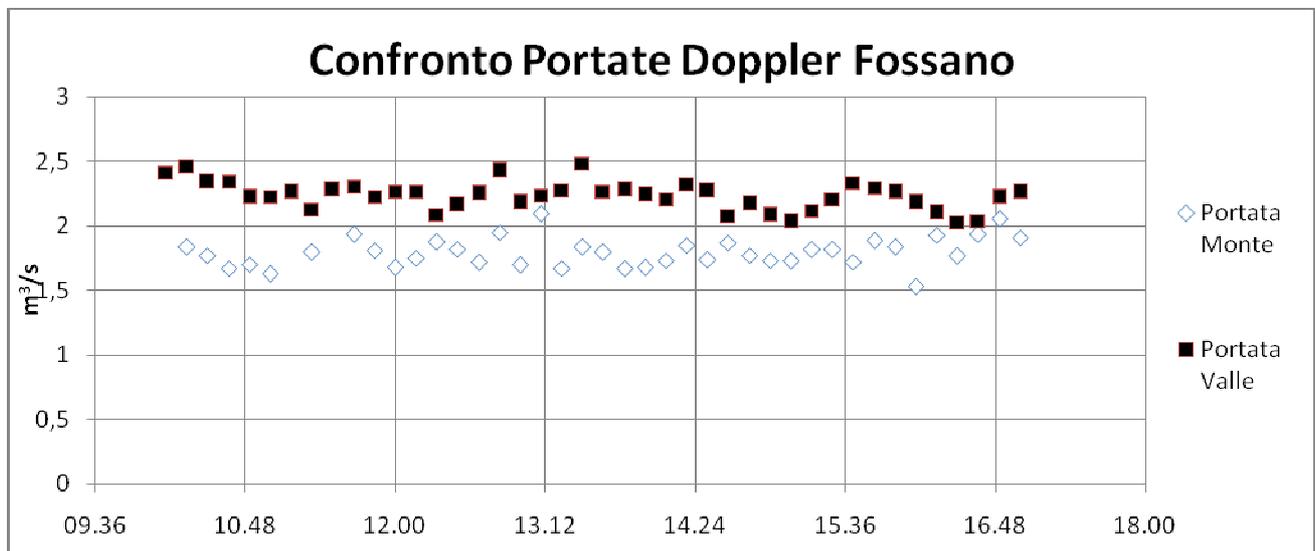


Figura n°19: Confronto portate nel sito di Fossano.

Dall'analisi della portata media calcolata su intervalli di dieci minuti risulta un incremento di 0,433 m³/s, ovvero nella sezione di valle si è registrato un incremento di portata pari al 25% di quella misurata nella sezione di monte. Ciò è probabilmente dovuto, come già enunciato in precedenza, al fatto che il canale, scorrendo sul fianco di una collina, intercetta le acque provenienti dalle falde superficiali del pendio sovrastante. Tale fatto è stato suffragato da rilievi visivi in concomitanza con la campagna di misura in “asciutta”.



Tortona

Sezione di monte

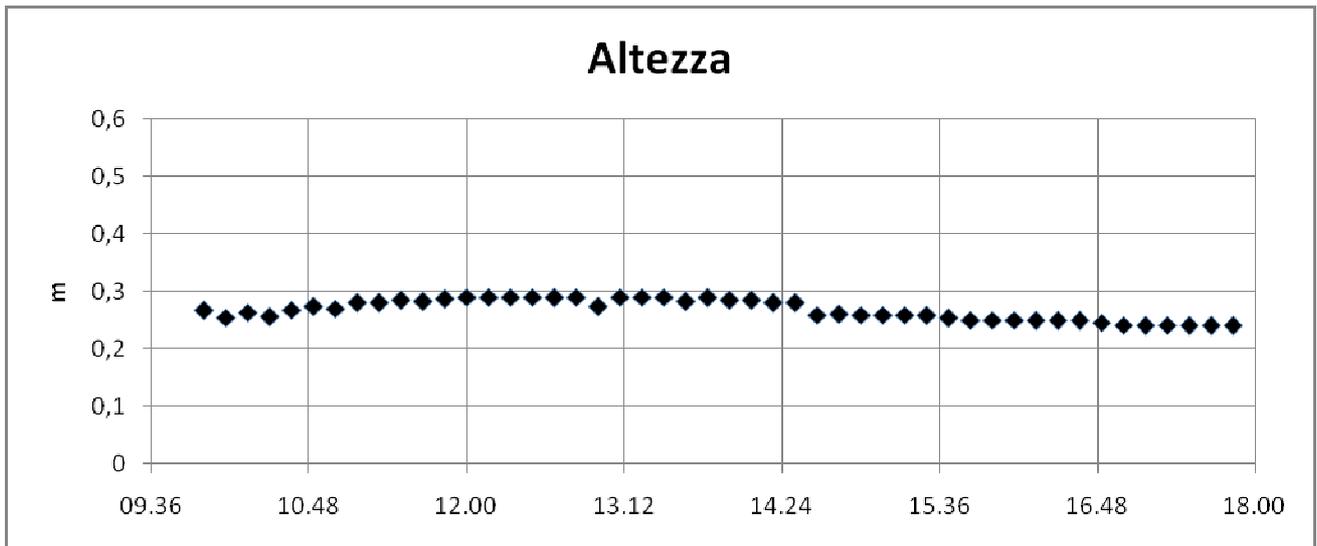


Figura n°20: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di monte del sito di Tortona.

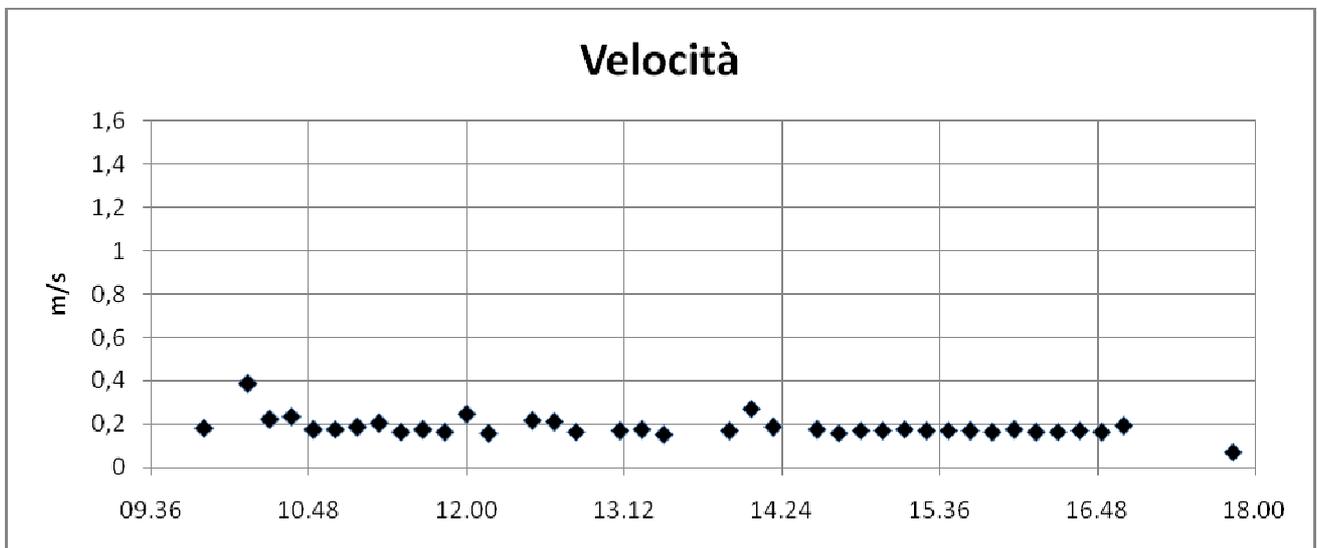


Figura n°21: Velocità dell'acqua nella sezione di monte del sito di Tortona

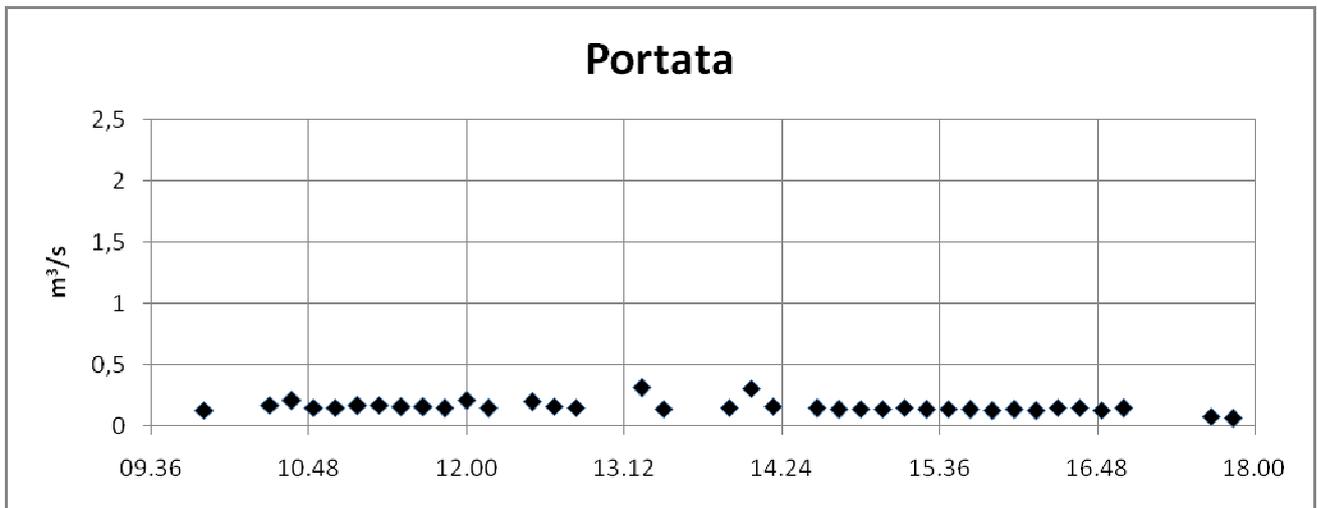


Figura n°22: Portata nella sezione di monte del sito di Tortona.

Sezione di valle

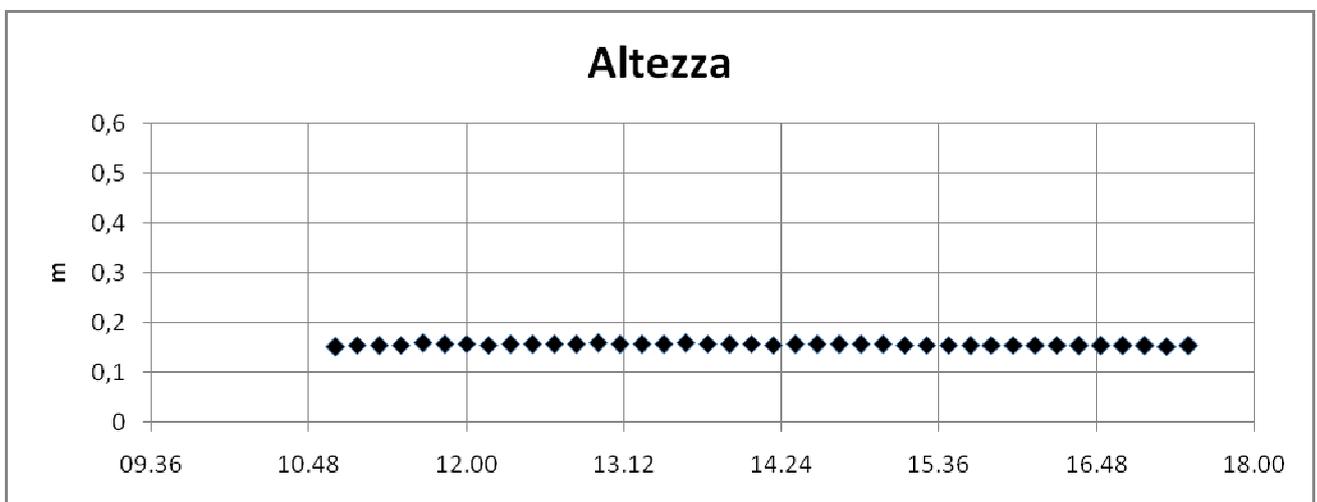


Figura n°23: Altezza del pelo libero dell'acqua nella sezione di valle del sito di Tortona.

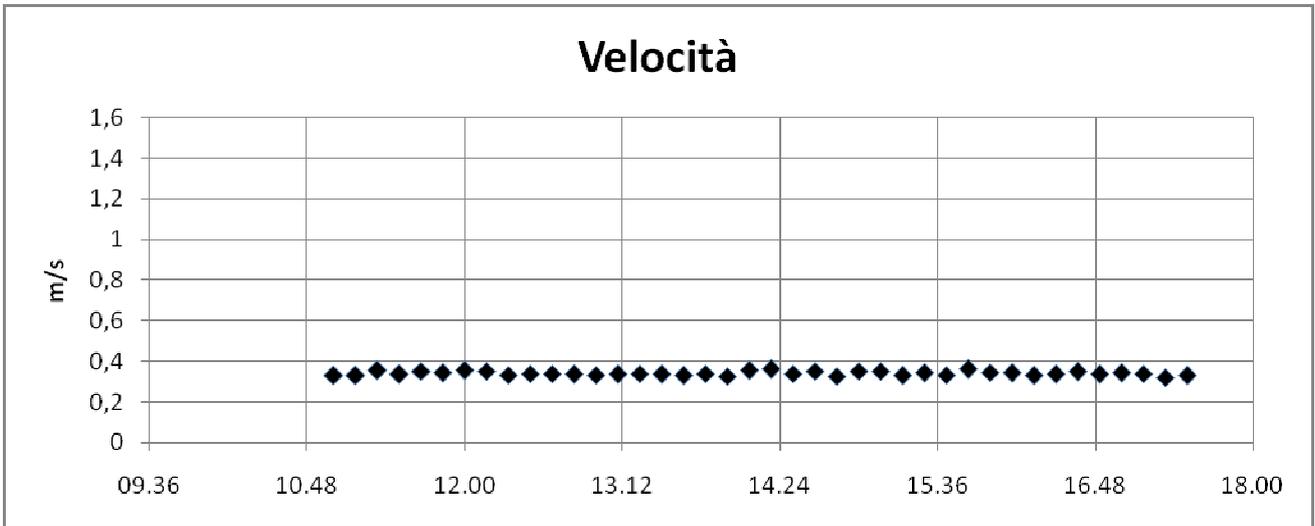


Figura n°24: Velocità dell'acqua nella sezione di valle del sito di Tortona.

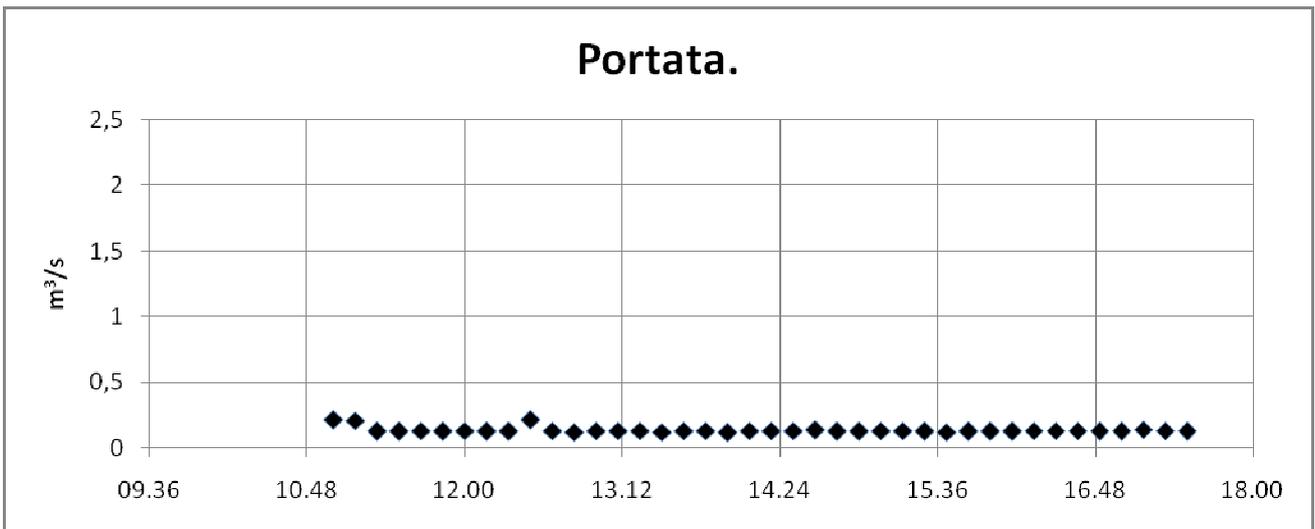


Figura n°25: Portata nella sezione di valle del sito di Tortona.



Confronto tra le portate

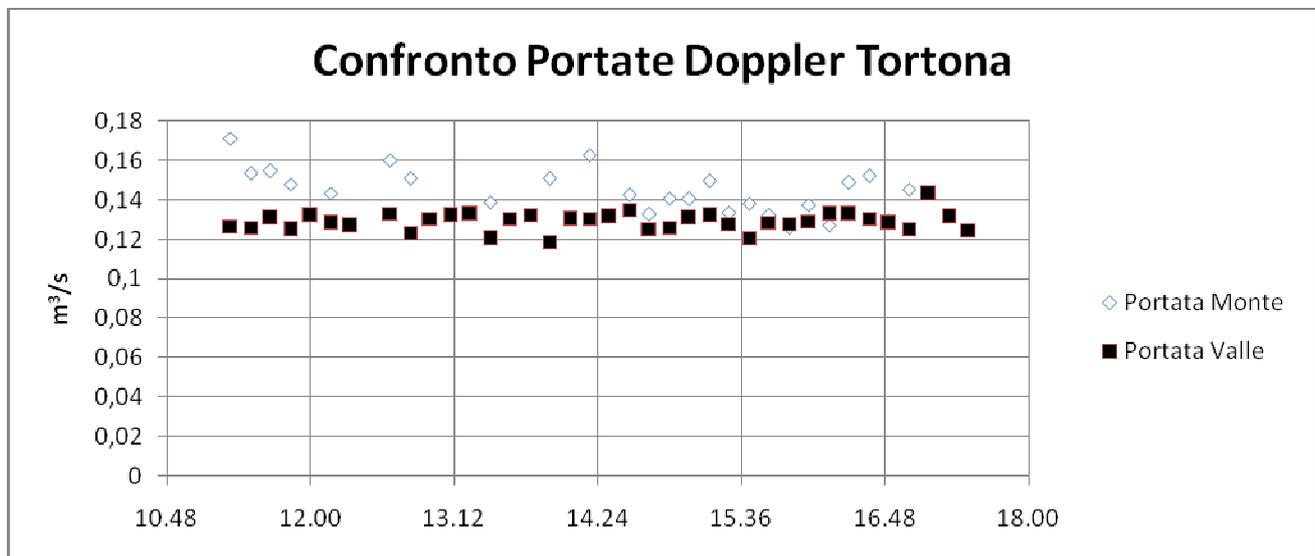


Figura n°26: Confronto Portate nel sito di Tortona.

Dall'analisi dei valori medi di portata, calcolati su intervalli di dieci minuti, risulta una perdita di $0.017 \text{ m}^3/\text{s}$ lungo tratto oggetto di studio, pari al 11% della portata misurata nella sezione di monte. Il metodo Inflow-Outflow non consente di individuare l'esatta ubicazione delle perdite nel tratto di canale in esame. Le perdite potrebbero essere di tipo distribuito o localizzato. Testimonianze di agricoltori e tecnici operanti sul territorio imputano le perdite dei canali alla presenza delle nutrie che, in questo caso, determinerebbero perdite localizzate scavando cunicoli negli argini. L'analisi visiva del tratto di canale in esame non portò all'individuazione di cunicoli nelle sponde, pertanto i risultati ottenuti indicano la probabile presenza di perdite diffuse.

4.1.2. Misurazioni con mulinelli idrometrici



L'utilizzo dei mulinelli idrometrici (in campagne di misura effettuate in altre date rispetto al *Doppler Profiler*) ha permesso di determinare perdite dell'ordine del 15% a nel sito Osasco e perdite dell'ordine del 22% nel sito di Tortona. Per quanto riguarda il tratto di Fossano è stato rilevato che la portata di valle risulta del 11% maggiore rispetto a quella di monte.

Per la campagna di misurazione sono stati utilizzati due mulinelli idrometrici SIAP.

I due mulinelli sono stati tarati mediante una campagna di misura indipendente effettuata ad Almese (TO) il 24 Aprile 2011.

Le misurazioni con mulinello idrometrico sono state effettuate nelle sezioni trasversali individuate lungo i canali oggetto di studio. Le sezioni trasversali oggetto di studio sono indicate negli allegati A, B e C.

Le misurazioni con mulinello idrometrico sono state eseguite ad un'altezza di 8 cm dal fondo del canale. Per ciascuna sezione sono state effettuate misurazioni ad una distanza di 10 cm l'una dall'altra.

Le misurazioni sono state effettuate sia calando lo strumento da un ponte o attraversamento (sezioni di monte e di valle di Fossano) sia entrando nel canale stesso (sezioni di monte e di valle di Osasco e Tortona).

Le misure nel canale sono state effettuate cercando di mantenere la maggiore distanza possibile tra lo strumento e il corpo del rivelatore (piedi e gambe) in modo da minimizzare l'influenza di quest'ultimo sulle misurazioni. Prima di ciascuna misurazione è stata effettuata una prova di stabilità della corrente, ovvero si sono effettuate misurazioni continuative di velocità per un intervallo di tempo di 30 minuti onde poter accertare la stazionarietà della corrente.

La portata è stata calcolata secondo la formula:

$$Q = VA$$

Dove Q è la portata espressa in m³/s, V è la velocità della corrente misurata tramite mulinello idrometrico ed espressa in m/s e A è l'area della sezione espressa in m².



Sono state effettuate tre prove per ciascun rilievo. Nelle tabelle seguenti vengono rappresentati i risultati ottenuti da ciascuna prova e il loro valore medio.

Osasco

Tabella n°1 : Misurazioni effettuate nella sezione di monte del sito di Osasco.

	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.309	0.312	0.309	0.310
Area Bagnata (m ²)	0.660	0.660	0.660	0.660
Portata (m ³ /s)	0.206	0.208	0.206	0.206

Tabella n°2: Misurazioni effettuate nella sezione di valle del sito di Osasco.

	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.703	0.705	0.709	0.705
Area Bagnata (m ²)	0.255	0.255	0.255	0.255
Portata (m ³ /s)	0.179	0.180	0.181	0.180

Dall'analisi della media dei dati misurati risulta una perdita sul tratto oggetto di studio di 0.026 m³/s, pari al 15% della portata di monte. Questi dati potrebbero sembrare in contrasto con quelli ottenuti tramite *Doppler Profiler* ma occorre tenere in considerazione il fatto che le due campagne di misura sono state effettuate in periodi differenti e con differenti altezze d'acqua nel canale. L'altezza d'acqua nel canale durante la prova con i mulinelli (8,5 cm) era praticamente dimezzata rispetto a quella presente nel canale durante le prove con *Doppler Profiler* (18 cm). Questo ha causato sia una riduzione del carico idraulico esercitato sulla superficie del canale sia una diminuzione del contorno bagnato della sezione trasversale del canale, e di conseguenza una diminuzione della superficie su cui potevano instaurarsi flussi d'acqua in uscita dal tratto di canale in esame. I dati ottenuti tramite mulinello idrometrico appaiono pertanto perfettamente coerenti con quelli ottenuti dalle misurazioni *Doppler Profiler*.



Fossano

Tabella n° 3: Misurazioni effettuate nella sezione di monte del sito di Fossano

	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.558	0.554	0.556	0.556
Area Contorno Bagnato (m ²)	3.250	3.250	3.250	3.250
Portata (m ³ /s)	1.270	1.259	1.266	1.265

Tabella n°4: Misurazioni effettuate nella sezione di valle del sito di Fossano

	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.416	0.414	0.412	0.414
Area Contorno Bagnato (m ²)	3.400	3.400	3.400	3.400
Portata (m ³ /s)	1.415	1.407	1.401	1.408

Dall'analisi della media dei dati misurati risulta un incremento di 0.144 m³/s, ovvero nella sezione di valle passa un portata maggiore del 11% rispetto a quella misurata nella sezione di monte. Questo risultato conferma l'ingresso di acqua nel canale proveniente dalla sponda in sinistra idrografica, già evidenziato dalle misure *Doppler Profiler* e confermato dai rilievi effettuati durante la campagna di misura in asciutta,

Tortona

Tabella n°5: Misurazioni effettuate nella sezione di monte del sito di Tortona.



	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.205	0.234	0.244	0.228
Area Contorno Bagnato (m ²)	0.880	0.880	0.880	0.880
Portata (m ³ /s)	0.180	0.205	0.215	0.200

Tabella n°6 Misurazioni effettuate nella sezione di valle del sito di Tortona

	Prima Misura	Seconda Misura	Terza Misura	Media
Velocità (m/s)	0.209	0.211	0.217	0.212
Area Contorno Bagnato (m ²)	0.725	0.725	0.725	0.725
Portata (m ³ /s)	0.161	0.163	0.167	0.164

Dall'analisi della media dei dati misurati risulta una perdita sul tratto oggetto di studio di 0.036 m³/s, pari al 22% della portata misurata a monte. Questi dati potrebbero sembrare discordanti rispetto a quelli ottenuti tramite *Doppler Profiler*, ma occorre tenere in considerazione il fatto che le due campagne di misura sono state effettuate in periodi differenti e con differenti altezze d'acqua nel canale. Contrariamente al caso studio di Osasco, l'altezza d'acqua nel canale durante la prova con i mulinelli (24 cm) era praticamente doppia rispetto a quella presente nel canale durante le prove con *Doppler Profiler* (13 cm). Questo ha causato un aumento sia del carico idraulico esercitato sulla superficie del canale sia del contorno bagnato della sezione trasversale del canale, con il conseguente aumento della superficie su cui potevano instaurarsi flussi d'acqua in uscita dal canale nel tratto in seame. I dati ottenuti tramite mulinello idrometrico appaiono pertanto perfettamente coerenti con quelli ottenuti dalle misurazioni *Doppler Profiler*.

4.2. *Relazione tra contenuto idrico misurato tramite TDR e Conducibilità Elettrica misurata tramite EM.*

4.2.1 Osasco

I dati ottenuti dal sito sperimentale di Osasco mostrano un sistematico aumento del valore di conducibilità elettrica quando il canale viene messo in asciutta. Si evidenzia che all'aumento del



valore di conducibilità idraulica non corrisponde alcuna modificazione del contenuto idrico misurato. Infatti, i valori di contenuto idrico misurati a canale pieno e quelli misurati in asciutta variano tra $0.13 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0.36 \text{ m}^3/\text{m}^3$. L'aumento del valore di conducibilità elettrica rilevato è di 250 mS/m per le misure effettuate alla frequenza di 5 kHz e 70 mS/m per le misure effettuate alla frequenza di 10 kHz . Risulta più difficile determinare la differenza di conducibilità dalle misure effettuate alla frequenza di 20 kHz . Infatti, a tale frequenza la differenza di conducibilità elettrica è ridotta a un massimo di 20 mS/m e in alcuni casi è trascurabile.

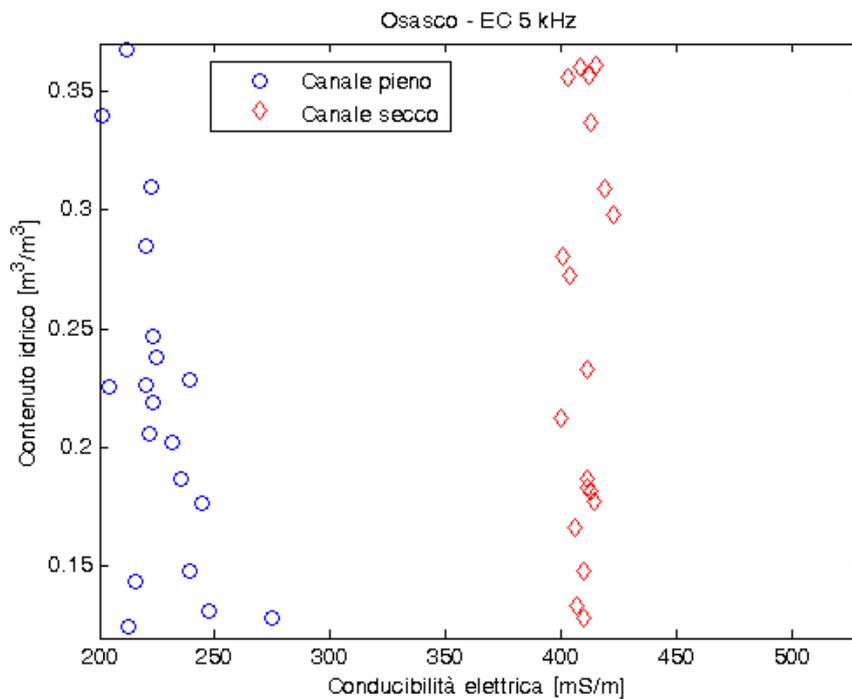


Figura n°27: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 5 kHz



La progressiva riduzione della variazione di conducibilità elettrica all'aumentare della frequenza del campo elettromagnetico indotto è attesa, in quanto il valore di conducibilità elettrica rilevato a parità di altre condizioni si riduce all'aumentare della frequenza del campo elettromagnetico indotto e le differenze tra i valori massimi e minimi rilevati si riduce. Tale fenomeno è visibile nello studio condotto da Abdu et al. (2007) in cui sono stati confrontati due strumenti che operano a frequenze pari a 9 kHz e 16 kHz.

Inoltre la frequenza cui opera lo strumento influenza la profondità d'indagine, che sarà tanto meno sensibile alla conducibilità elettrica dello strato superficiale, quanto più bassa sarà la frequenza a cui opera.

La maggior conducibilità elettrica del suolo registrata alla frequenza di 20 kHz (più sensibile alle condizioni dello strato di suolo più superficiale), anche quando il canale, era pieno potrebbe essere spiegata dalle piogge verificatesi nei giorni precedenti alla campagna di misura, che hanno comportato un aumento del contenuto idrico volumetrico nel primo orizzonte del suolo.



4.2.2 Fossano

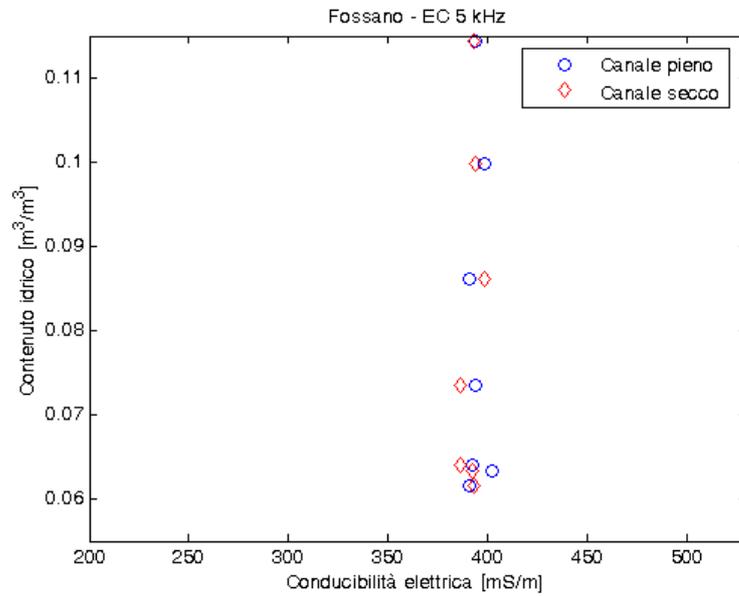


Figura n°30: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 5 kHz.

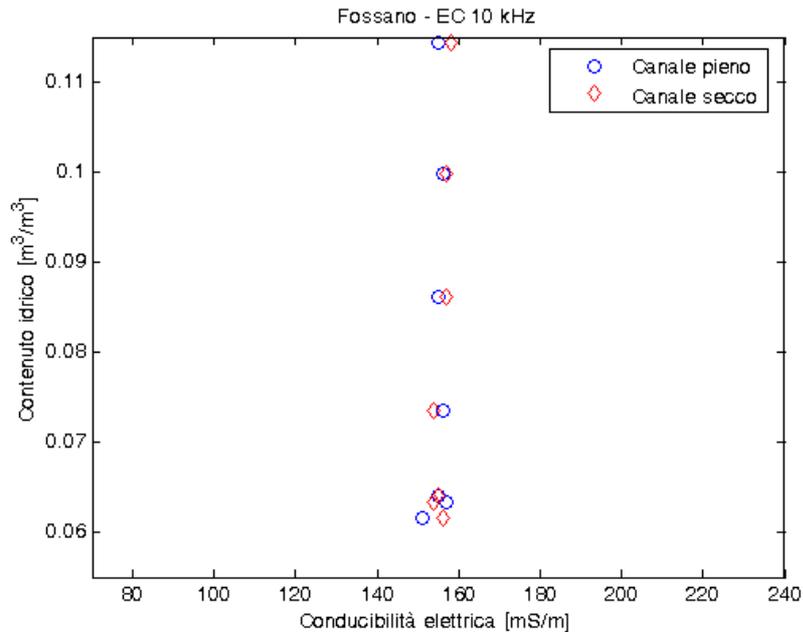


Figura n°31: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 10 kHz.

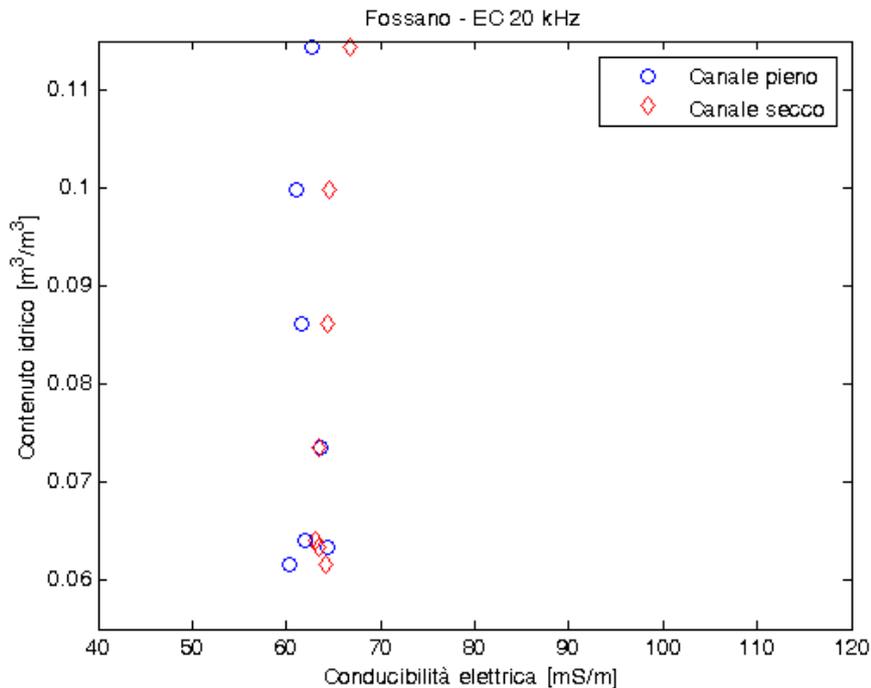


Figura n°32: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 20 kHz.

Contrariamente ai dati ottenuti dal sito sperimentale di Osasco, i dati di Fossano non mettono in evidenza un sistematico aumento del valore di conducibilità elettrica quando il canale viene messo in asciutta. I valori di contenuto idrico misurati a canale pieno e quelli misurati in presenza di una portata residua proveniente dalla falda superficiale del versante a monte sono costanti e variano tra $0.06 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0.11 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

I valori di conducibilità elettrica rilevati in presenza di altezze del pelo libero dell'acqua nel canale pari a 22 cm e 57 cm non mostrano differenze apprezzabili. Una differenza minima di conducibilità elettrica è stata rilevata nelle misure rilevate alla frequenza di 20 kHz (più sensibile alle condizioni dello strato superficiale del suolo). Tale variazione della conducibilità elettrica è dovuta alle piogge cadute nei giorni precedenti alla campagna di misura "in asciutta", che hanno lievemente innalzato il contenuto idrico del suolo in superficie.

Il mancato incremento dei valori di conducibilità elettrica potrebbe essere dovuto a uno (o entrambi) dei seguenti fattori:

- 1) il canale non presenta perdite di rilievo;



- 2) il canale presenta perdite ma non è possibile rilevarle perché l'acqua ancora presente nel canale (che viene sgrondata dal pendio) fa sì che non vi siano differenze immediatamente rilevabili di contenuto idrico e conducibilità elettrica fra canale pieno e "in asciutta".



4.2.3 Tortona

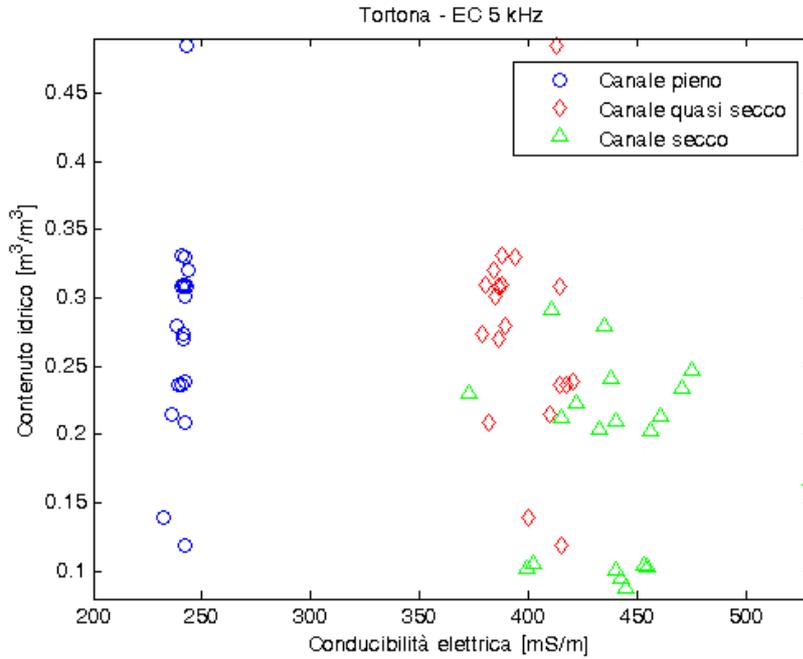


Figura n°33: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 5 kHz.

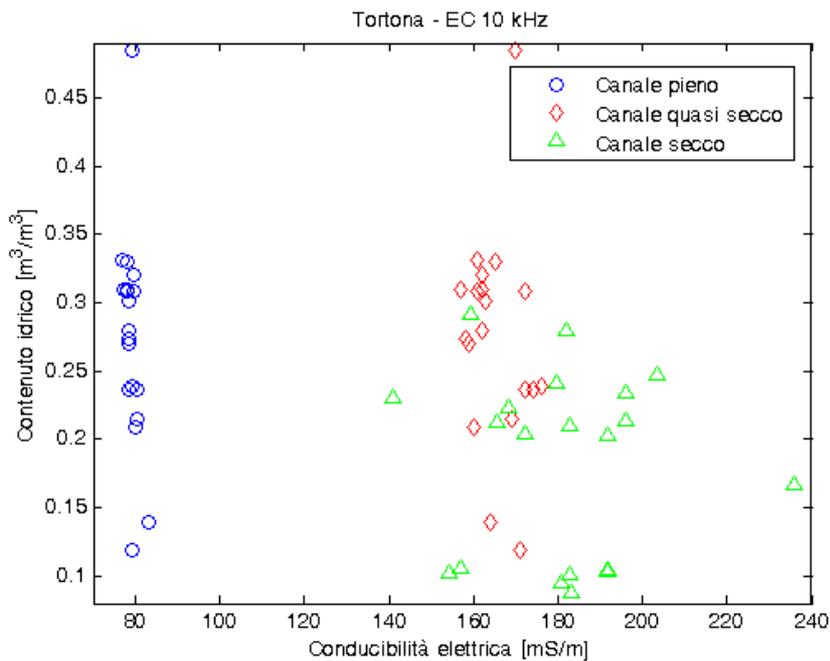


Figura n°34 Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conducibilità Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 10 kHz.

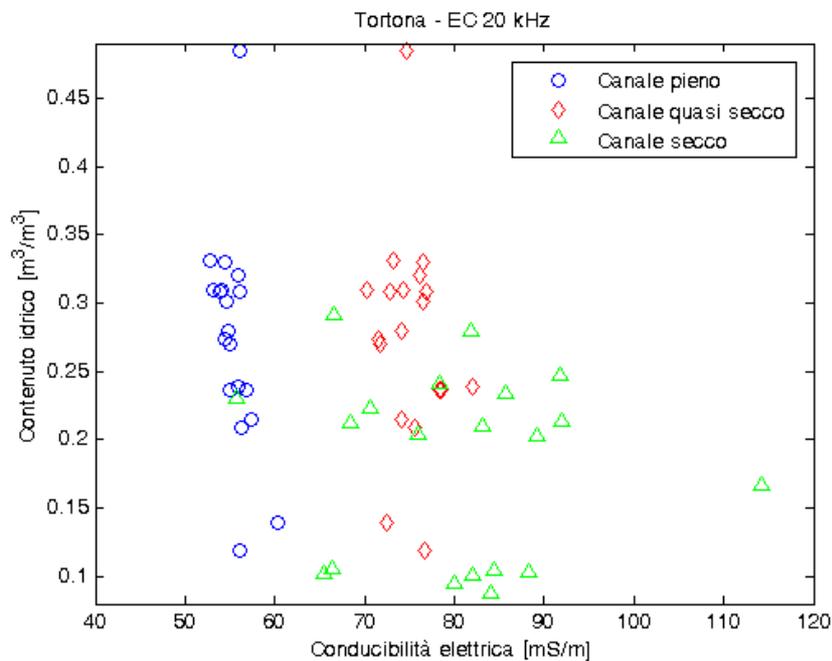


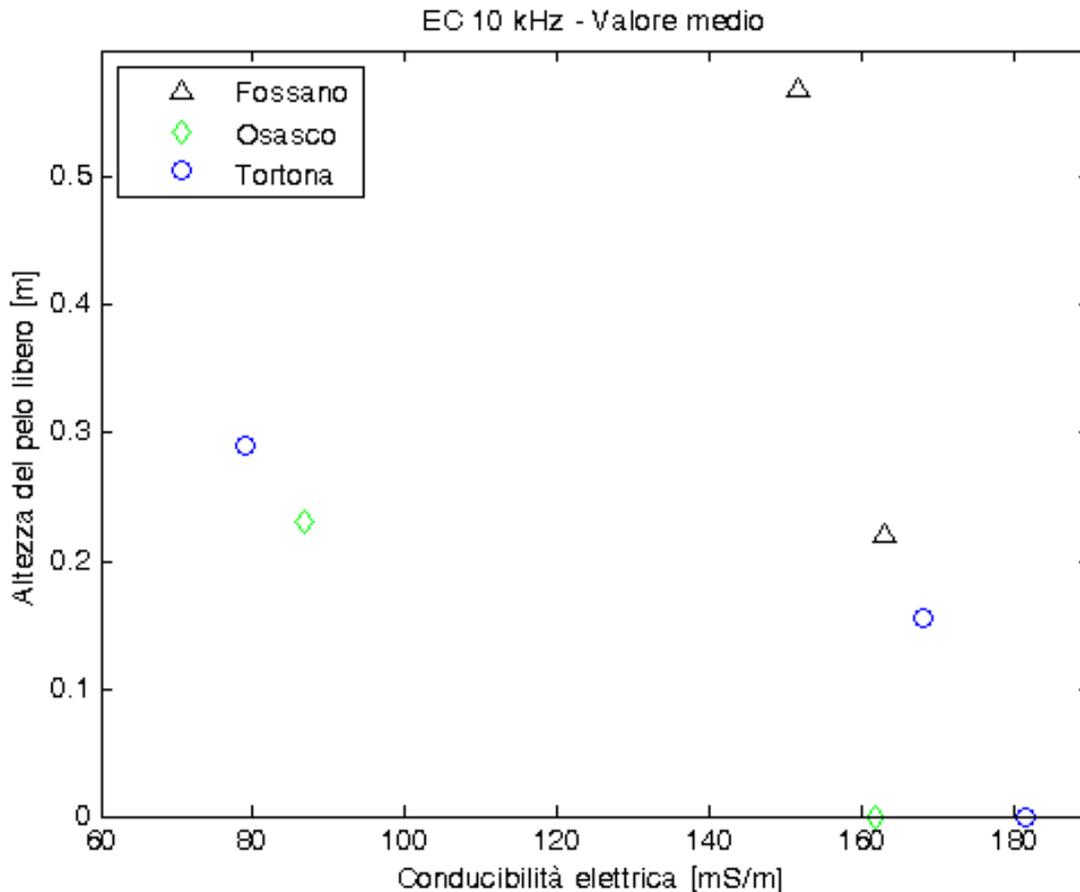
Figura n°35: Relazione tra Contenuto Idrico misurato con TDR e Conduttività Elettrica del suolo misurata con una frequenza di 20 kHz.

Analogamente ai dati ottenuti dal sito sperimentale di Osasco, i dati raccolti a Tortona mettono in evidenza un sistematico aumento del valore di conducibilità elettrica quando si riduce l'altezza del pelo libero dell'acqua nel canale. Si evidenzia che all'aumento del valore di conducibilità idraulica non corrisponde alcuna modificazione del contenuto idrico misurato. Infatti, i valori di contenuto idrico misurati a canale pieno e quelli misurati in asciutta variano tra $0.10 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e $0.50 \text{ m}^3/\text{m}^3$. L'aumento del valore di conducibilità elettrica rilevato è di 130 mS/m per le misure effettuate alla frequenza di 5 kHz , 80 mS/m per le misure effettuate alla frequenza di 10 kHz e 20 mS/m per le misure effettuate a 20 kHz .

La progressiva riduzione della variazione di conducibilità elettrica all'aumentare della frequenza del campo elettromagnetico indotto è attesa, in quanto il valore di conducibilità elettrica rilevato a parità di altre condizioni si riduce all'aumentare del campo elettromagnetico indotto e le differenze tra i valori massimi e minimi rilevati si riduce. Tale fenomeno è visibile nello studio condotto da Abdu et al. (2007) in cui sono stati confrontati due strumenti che operano a frequenze pari a 9 kHz e 16 kHz .



4.2.4 *Variatione della Conducibilità Elettrica in funzione dell'altezza di pelo libero nel canale.*



F

figura n°36 : Rapporto tra la conducibilità elettrica e l'altezza di pelo libero dell'acqua.

In Figura n°27 sono rappresentati i valori di conducibilità elettrica medi in funzione delle altezze del pelo libero dell'acqua all'interno dei canali. Nei siti di Osasco e di Tortona è possibile ravvisare un aumento della conducibilità elettrica al diminuire dell'altezza d'acqua (e di conseguenza del carico idraulico), mentre viceversa essa diminuisce all'aumentare del carico. I dati di Fossano mostrano un comportamento diverso: non si registrano differenze significative di conducibilità elettrica pur con due carichi idraulici molto differenti. Questo conferma l'ipotesi avanzata in precedenza, ovvero che il tratto di canale di Fossano oggetto di studio non presenti perdite idriche di rilievo.

I dati ottenuti dalla relazione tra contenuto idrico e conducibilità elettrica nei siti in esame parrebbero in contrasto con quanto afferma la letteratura scientifica. Secondo Abdu et al. (2008)



infatti, a un aumento di contenuto idrico nel suolo farebbe seguito un aumento della conducibilità elettrica del medesimo.

Quest'apparente contraddizione può essere spiegata mediante i recenti studi di Akhtar et al. (2011) i quali affermano che, a parità di contenuto idrico, un flusso d'acqua nel suolo possa causare un abbassamento della conducibilità elettrica.

Come mostrano i valori di contenuto idrico misurati tramite il TDR, non vi sono differenze significative tra dati misurati prima della messa in asciutta del canale e quelli misurati a distanza di una settimana: è pertanto possibile affermare che i suoli adiacenti al canale abbiano mantenuto valori di contenuto idrico omogenei durante la settimana intercorsa tra le due prove.

La presenza di flussi di acqua in uscita dai canali di Osasco e di Tortona, peraltro osservata dalle misurazioni effettuate con il Doppler Profiler Doppler Profiler e i mulinelli idrometrici, spiegherebbe pertanto questo abbassamento della conducibilità idraulica.

Per quanto concerne il canale di Fossano, i dati ottenuti dalla relazione tra contenuto idrico e conducibilità elettrica non mettono in evidenza cambiamenti né nei valori di contenuto idrico né in quelli di conducibilità elettrica.

Questo potrebbe essere dovuto ai seguenti fattori:

- 1) il tratto di canale oggetto di studio non presenta perdite di rilievo;
- 2) esiste un flusso in uscita ma non è stato possibile rilevarlo poiché la presenza di alcuni centimetri d'acqua nel canale durante la prova "in asciutta" ha causato la permanenza di un carico idraulico sulla superficie del canale.

Alcuni rilievi effettuati parallelamente alle misure di conducibilità elettrica fanno propendere maggiormente per la prima ipotesi piuttosto che per la seconda:

- A) i contenuti idrici rilevati tramite il TDR a Fossano sono molto più bassi rispetto a quelli di Osasco e Tortona. Questo non sarebbe di per sé sufficiente per suffragare l'assenza di perdite se non collegato al punto seguente;



- B) durante la campagna di misurazioni di Fossano, è stata effettuata una riparazione sul tratto di acquedotto municipale che corre lungo il canale. Una pala meccanica ha provveduto a aprire uno scavo della profondità di 1.5 metri ai piedi dell'argine per raggiungere agevolmente la tubazione che necessitava di essere riparata. Un esame visivo svolto durante queste operazioni ha confermato l'assenza d'infiltrazioni di acqua provenienti dall'argine soprastante.
- C) Le venute d'acqua provenienti dal pendio sovrastante il canale causavano la permanenza sulla superficie del canale di una ventina di centimetri d'acqua: un canale con un fondo maggiormente permeabile avrebbe permesso la rapida infiltrazione dell'acqua intercettata dal canale.

Dato quest'insieme di fattori, è possibile affermare che probabilmente sul tratto di canale oggetto di studio situato sul territorio di Fossano non sono presenti perdite idriche di rilievo.



4.3. Prove di infiltrazione

I grafici di seguito riportati rappresentano l'altezza d'acqua infiltrata nel tempo utilizzando un infiltrometro ad anello semplice.

Per le prove d'infiltrazione sono stati usati cilindri con un diametro di 10.4 cm, pertanto a ogni prova è stato infiltrato nel suolo un volume d'acqua pari a 850 cm³.

Le conducibilità idrauliche saranno calcolate non appena saranno disponibili i dati provenienti dall'analisi granulometrica dei campioni di suolo prelevati nelle varie stazioni (l'analisi chimico-fisica dei campioni di suolo è già in corso presso il Laboratorio Agrochimico Regionale).

4.3.1. Osasco

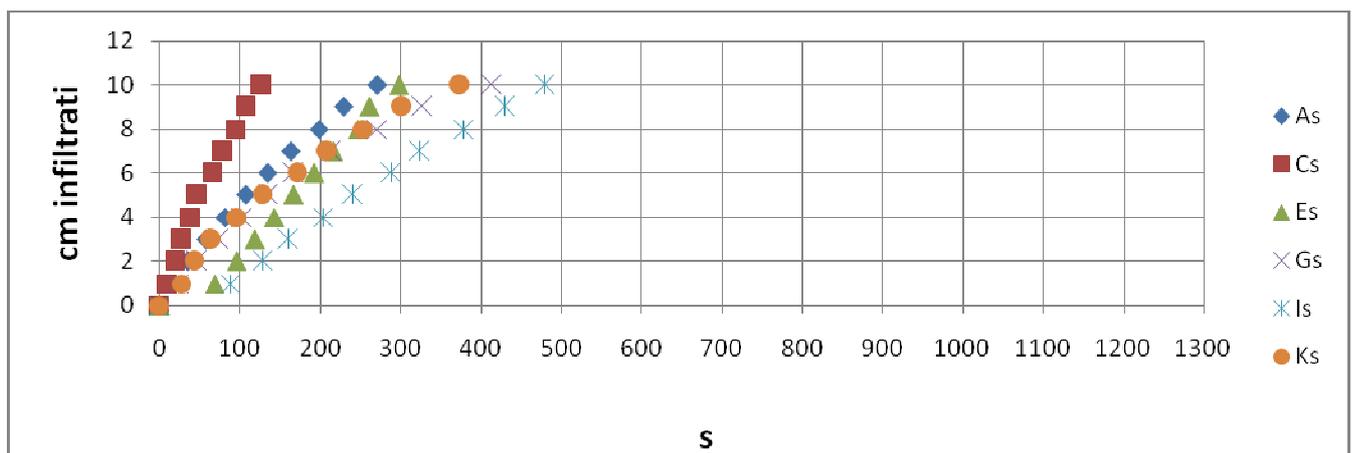


Figura n°37: Infiltrazioni effettuate in sinistra idrografica nel sito di Osasco.

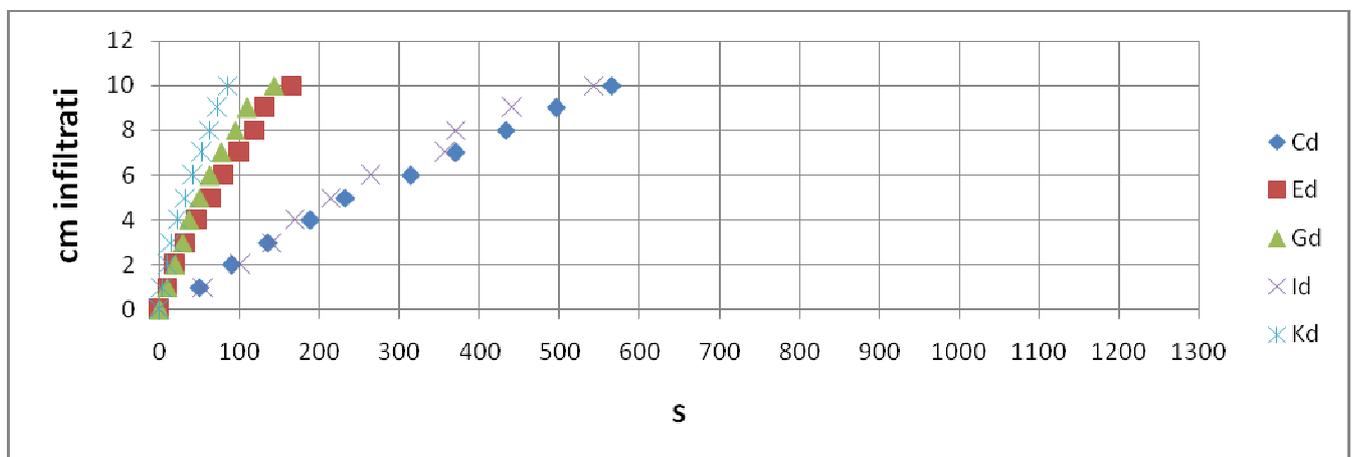


Figura n°38: Infiltrazioni effettuate in destra idrografica nel sito di Osasco.



Dall'analisi dell'andamento delle curve d'infiltrazione cumulata appare evidente un'omogeneità di fondo tra le velocità d'infiltrazione misurate sulla sponda destra e tra quelle misurate sulla sponda sinistra del canale.

4.3.2. Fossano

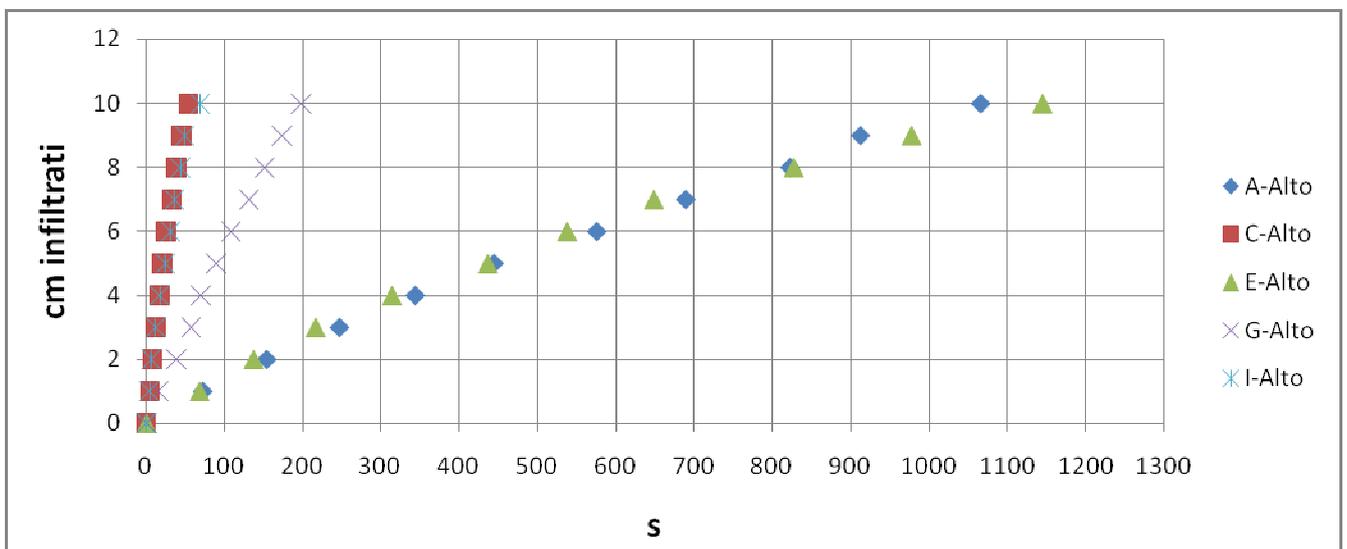


Figura n°39: Prove d'infiltrazione effettuate nella parte "Alta" (argine del canale).

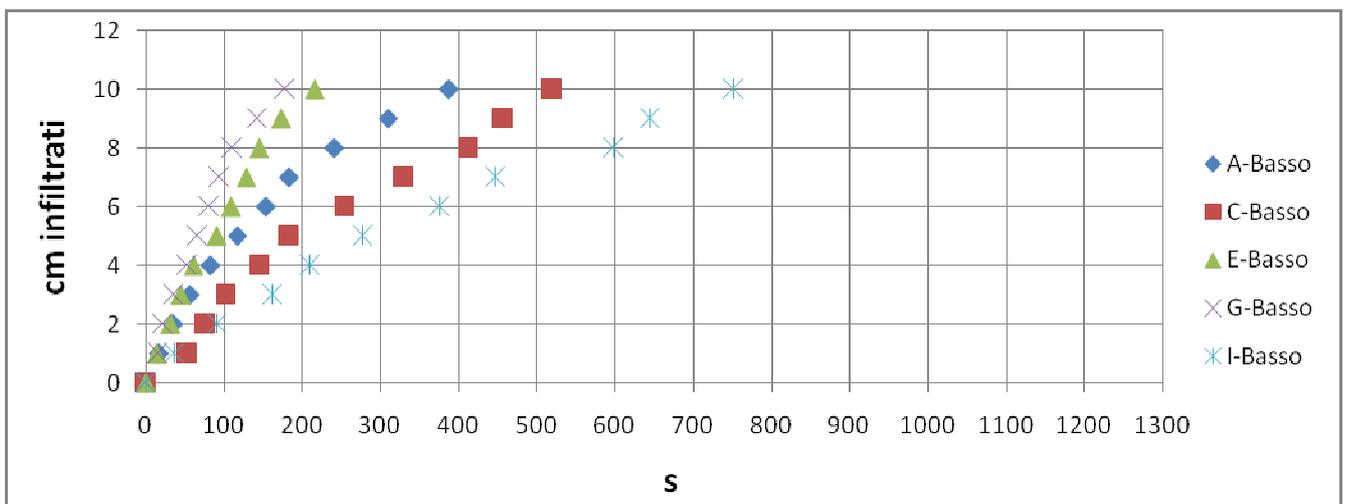


Figura n°40: Prove d'infiltrazione eseguite nella parte "Bassa" (piede dell'argine).



Dall'analisi dell'andamento delle curve d'infiltrazione cumulata appare evidente come le prove effettuate nella parte bassa (Figura n°40), a ridosso del campo coltivato e quindi interessata da lavorazioni del suolo, presentino mediamente velocità d'infiltrazione più elevate (in particolare nelle stazioni G ed E).

Le prove effettuate sulla sommità dell'argine nelle stazioni I e C (Figura n°39) evidenziano invece velocità d'infiltrazione molto più basse sia nei confronti delle prove effettuate nella parte bassa dell'argine sia nei confronti delle altre prove effettuate sulla sommità.

Durante l'ultima settimana del mese d'Agosto verrà effettuata una campagna di prove di infiltrazione nel sito di Tortona analoga a quelle già effettuate nei siti di Osasco e di Fossano.



4.4. *Mappatura della conducibilità Idraulica*

4.4.1. *Osasco*

Mappatura con acqua nel canale

Dalla mappatura della conducibilità elettrica del sito di Osasco con canale pieno emergono chiaramente delle aree caratterizzate da valori della conducibilità elettrica maggiori nel primo metro di distanza dall'argine del canale. La conducibilità elettrica, e di conseguenza il contenuto idrico, pare diminuire man mano che si allontana dall'argine del canale.

I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 440 e i 380 mS/m per la fase con canale pieno a 5 kHz;
- compresi tra i 170 e i 160 mS/m per la fase con canale pieno a 10 kHz.
- compresi tra i 50 e i 70 mS/m per la fase con canale pieno a 20 kHz.

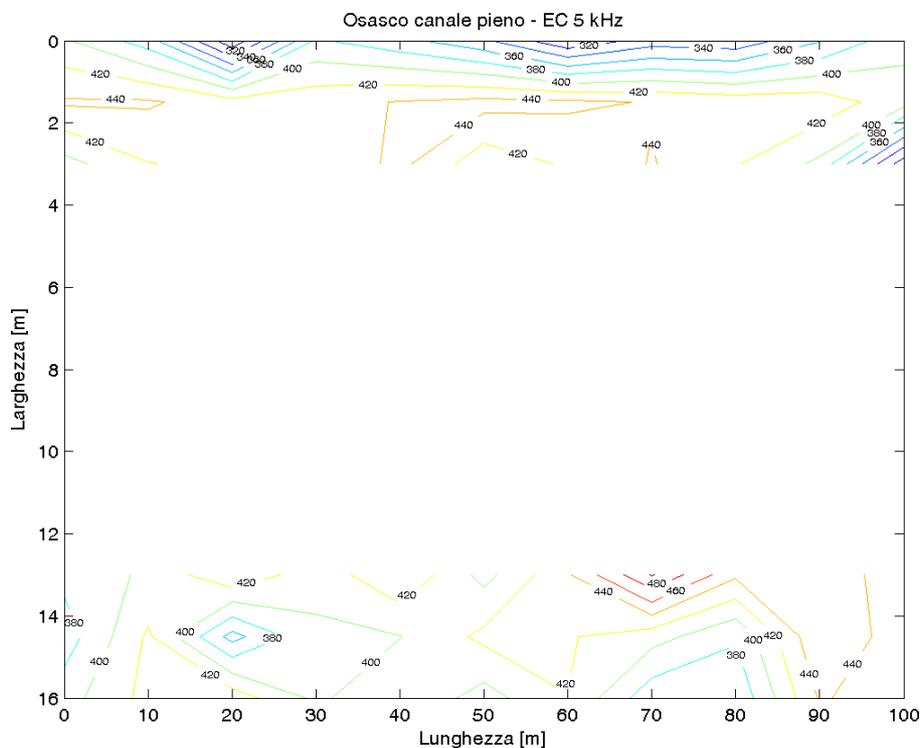




Figura n°41: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 5 kHz nel sito di Osasco con la presenza di acqua nel canale.

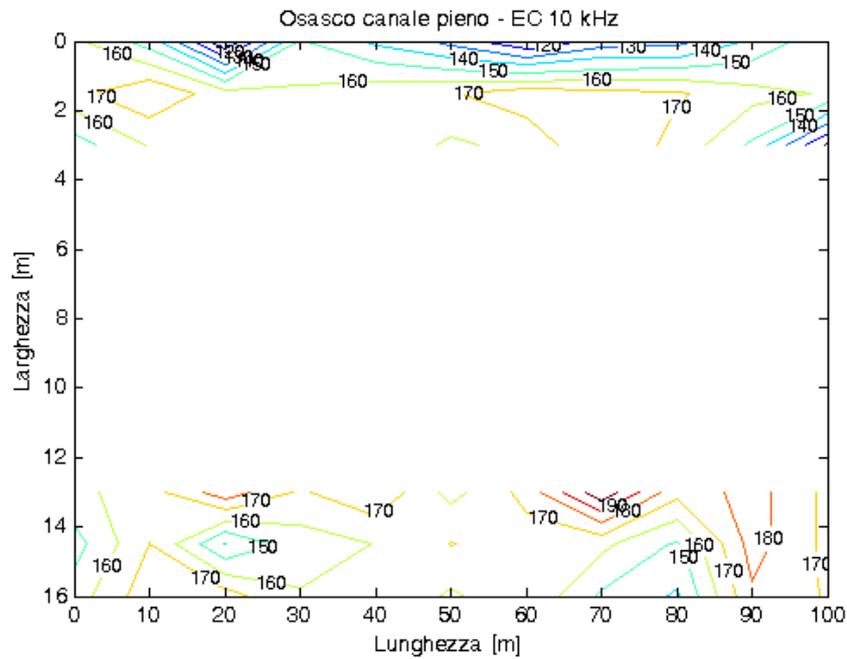


Figura n°42: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 20 kHz nel sito di Osasco con la presenza di acqua nel canale.

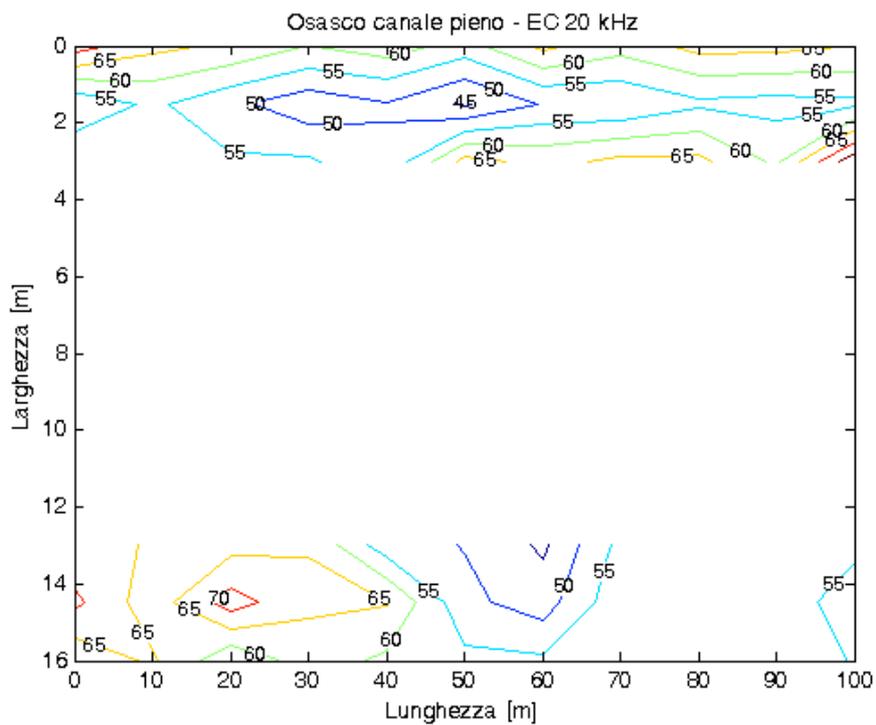




Figura n°43: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 20 kHz nel sito di Osasco con la presenza di acqua nel canale.

Mappatura in asciutta

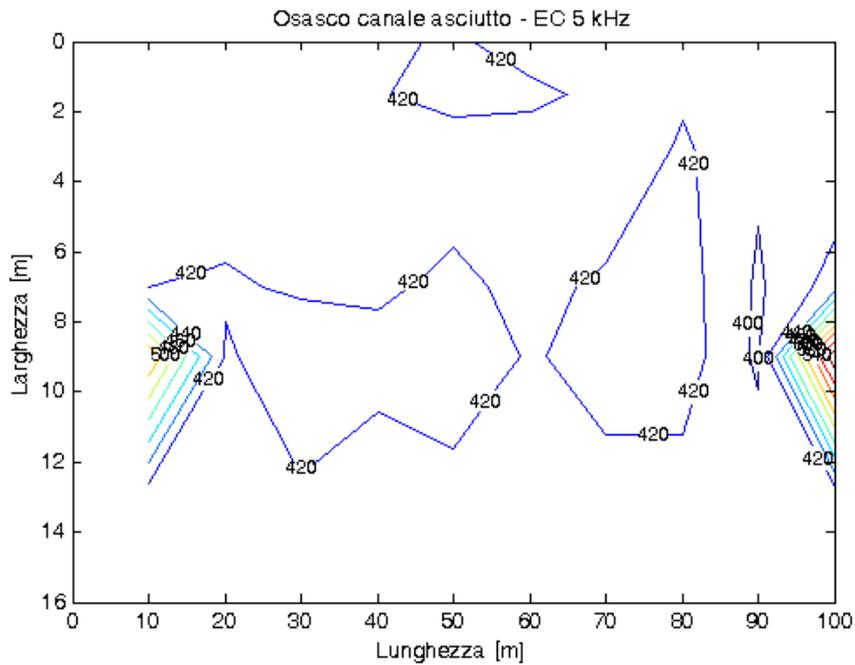


Figura n°44: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 5 kHz nel sito di Osasco con il canale in asciutta.

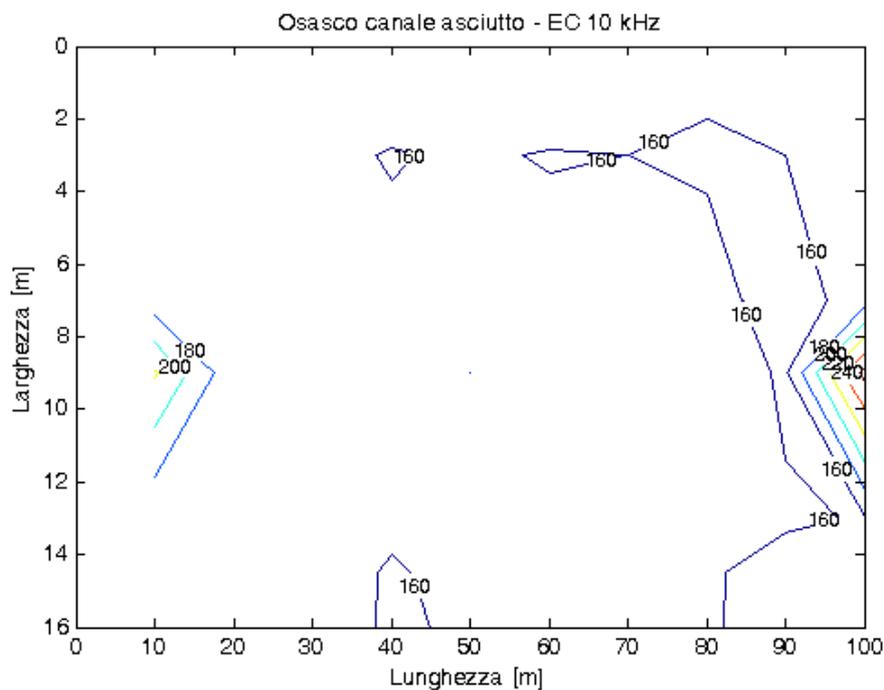




Figura n°45: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 10 kHz nel sito di Osasco con il canale in asciutta.

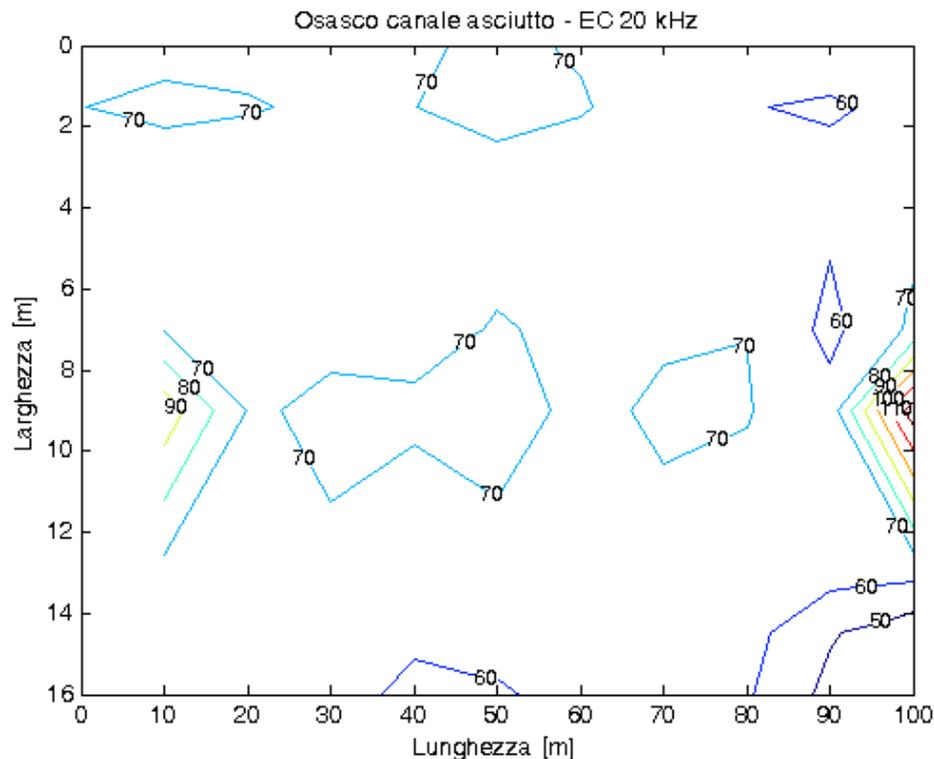


Figura n°46: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 10 kHz nel sito di Osasco con il canale in asciutta.

Dalla mappatura della conducibilità elettrica nella campagna di misurazioni in asciutta nel sito di Osasco emergono delle aree caratterizzate da maggiore conducibilità elettrica. Queste aree sono situate in corrispondenza delle stazioni A e K. Tali aree anche a cinque giorni dalla messa in asciutta, erano comunque caratterizzate dalla presenza di un ristagno idrico superficiale. In tal caso, le aree con più alta conducibilità elettrica potrebbero essere le aree caratterizzate da una minor perdita.

I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 500 e i 400 mS/m per la fase con canale asciutto a 5 kHz;
- compresi tra i 200 e i 160 mS/m per la fase con canale asciutto a 10 kHz;
- compresi tra i 50 e i 100 mS/m per la fase con canale asciutto a 20 kHz.



4.4.2. Fossano

Mappatura con acqua nel canale

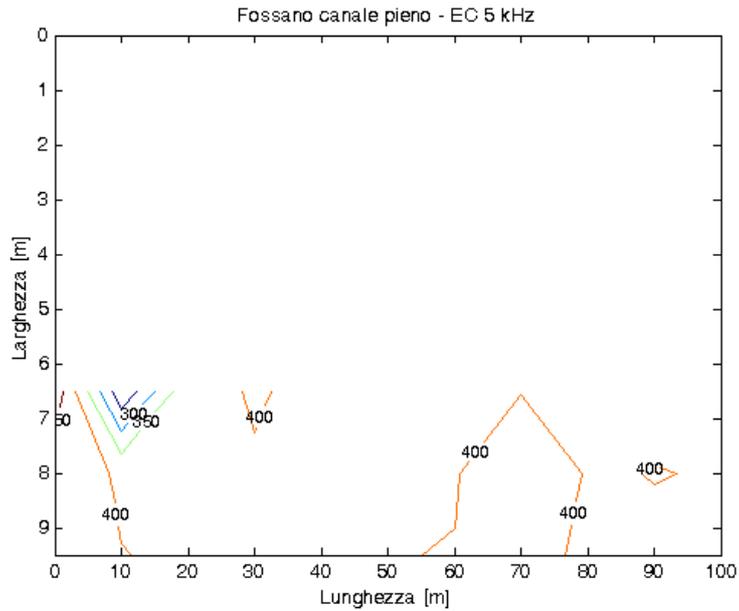


Figura n°47: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 5 kHz con canale pieno nel sito di Fossano.

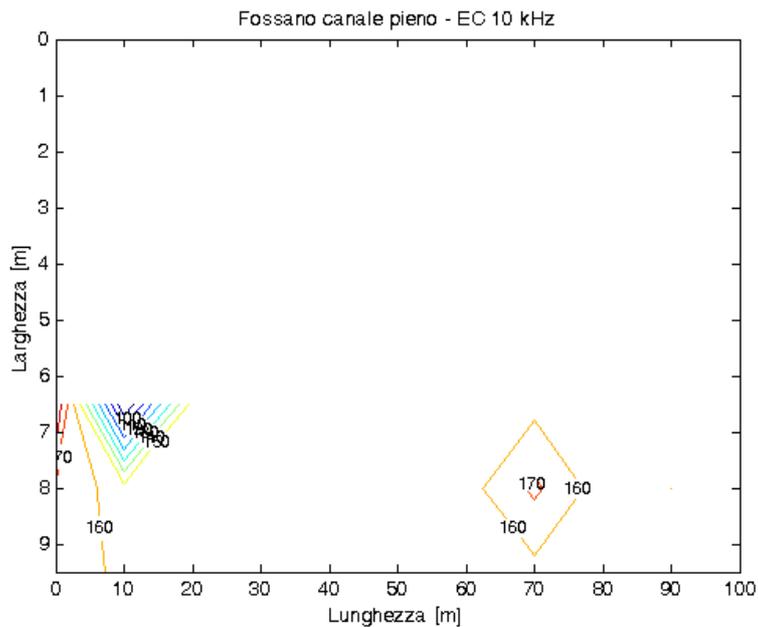


Figura n°48: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 10 kHz con canale pieno nel sito di Fossano.

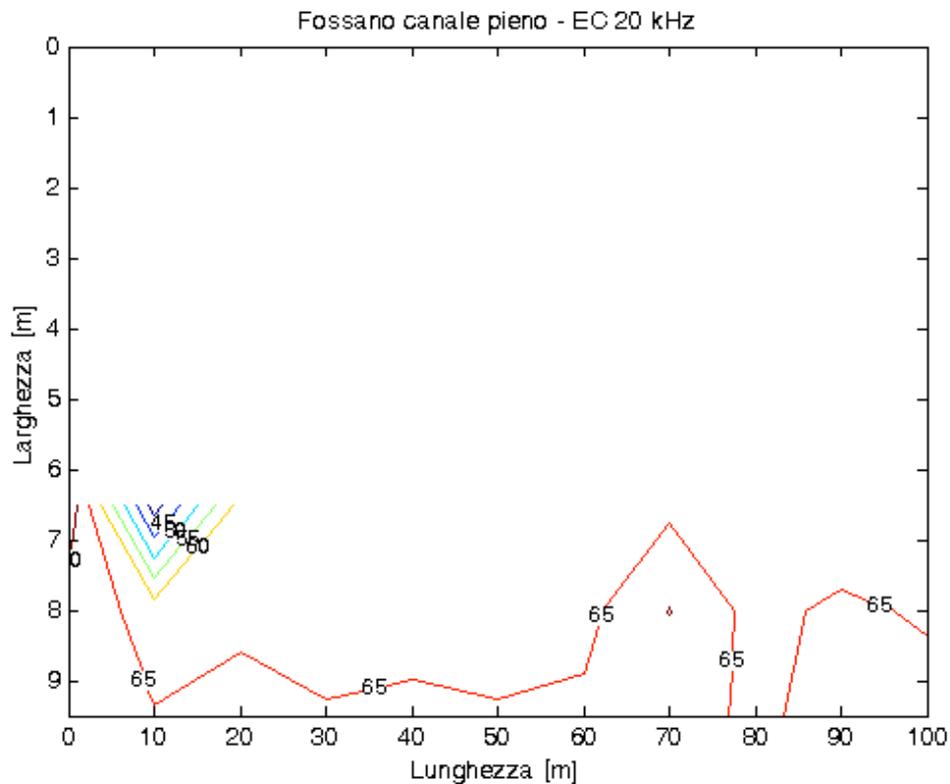


Figura n°49: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 20 kHz con canale pieno nel sito di Fossano.

Dalla campagna di misurazioni della conducibilità elettrica con canale pieno emerge la presenza di aree caratterizzate da conducibilità elettrica (e di conseguenza contenuto idrico) maggiore in corrispondenza delle stazioni A e B (ovvero a 10 e 20 metri dall'inizio del transetto).

Questo aumento però potrebbe essere dovuto alla presenza di un canale d'irrigazione sotterraneo in calcestruzzo che passa in quella sezione.

I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 400 e i 300 mS/m per la fase con canale pieno a 5 kHz;
- compresi tra i 170 e i 100 mS/m per la fase con canale pieno a 10 kHz.
- compresi tra i 45 e i 65 mS/m per la fase con canale pieno a 20 kHz.



Mappatura in asciutta

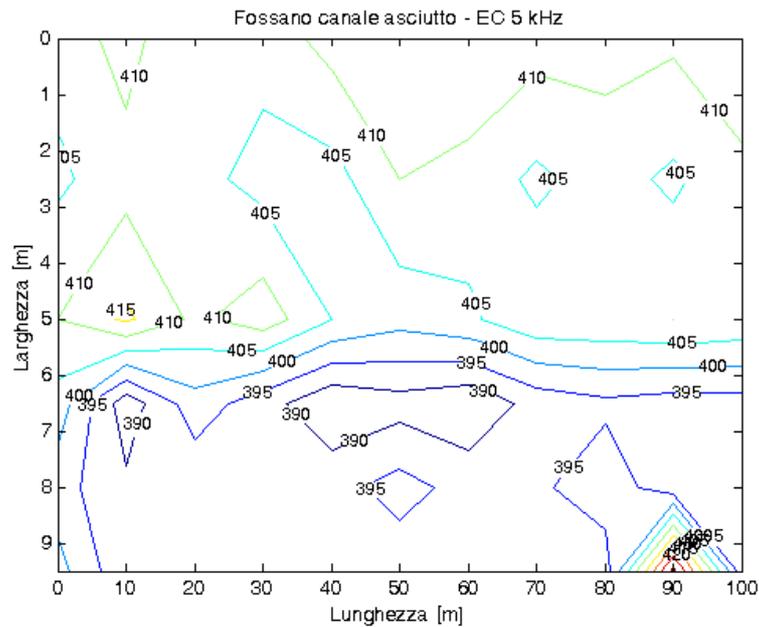


Figura n°50: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 5 kHz con canale con poca acqua nel sito di Fossano.

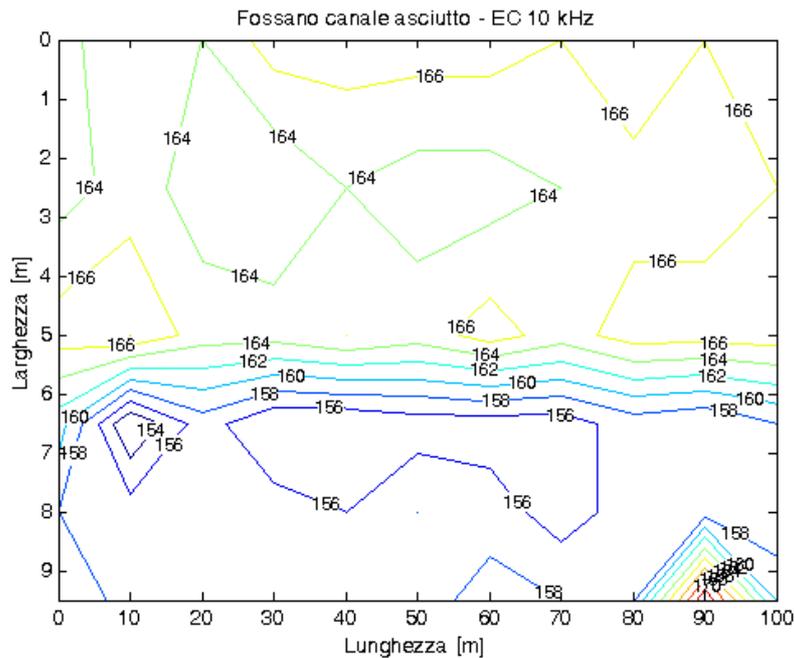




Figura n°51: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 10 kHz con canale con poca acqua nel sito di Fossano.

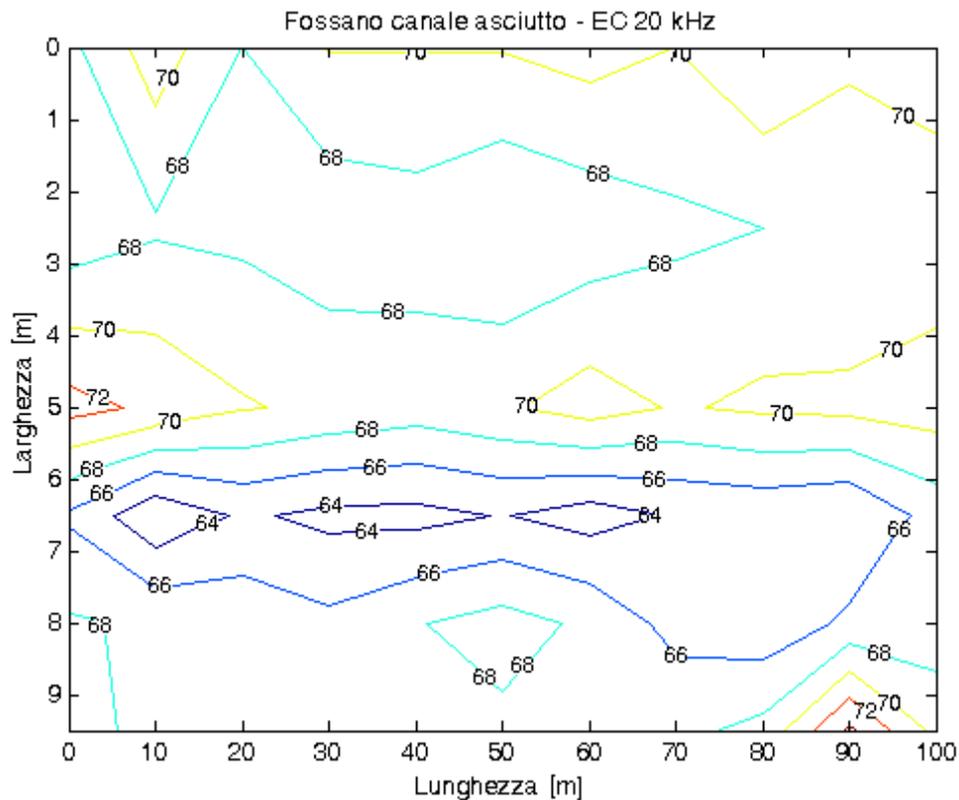


Figura n°52: Mappatura della conducibilità elettrica rilevata a 20 kHz con canale con poca acqua nel sito di Fossano.

Dalla mappatura della conducibilità elettrica nel sito di Fossano emergono delle aree caratterizzate da maggiore conducibilità elettrica nella campagna di misurazioni in asciutta. Queste aree sono situate in corrispondenza delle ultime due stazioni, I e K. La zona a conducibilità elettrica più elevata è situata alla base dell'argine ed è stata cusata da un aumento di contenuto idrico del suolo derivante dall'intervento di riparazione della condotta dell'acquedotto.

I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 420 e i 390 mS/m per la fase con canale asciutto a 5 kHz;
- compresi tra i 170 e i 156 mS/m per la fase con canale asciutto a 10 kHz;



- compresi tra i 68 e i 72 mS/m per la fase con canale asciutto a 20 kHz.

4.4.3. Tortona

Mappatura con altezza del pelo libero dell'acqua minore

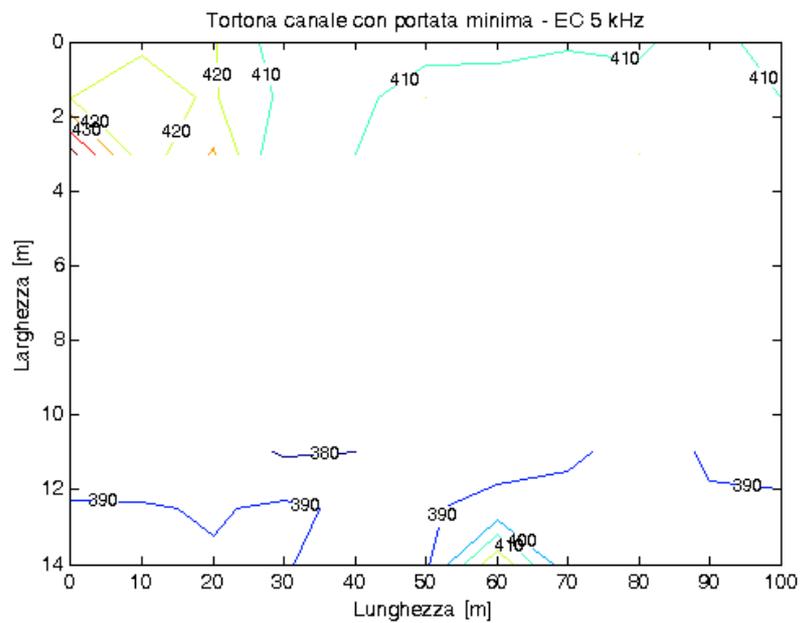


Figura n°53: Mappatura della conducibilità elettrica a 5 kHz nel sito di Tortona con il canale con una portata minima.

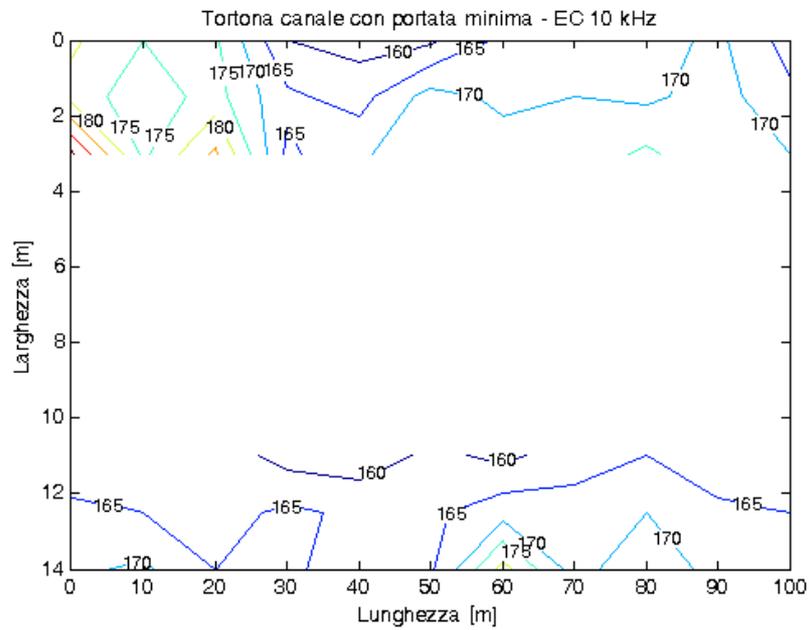


Figura n°54: Mappatura della conducibilità elettrica a 10 kHz nel sito di Tortona con il canale con una portata minima.

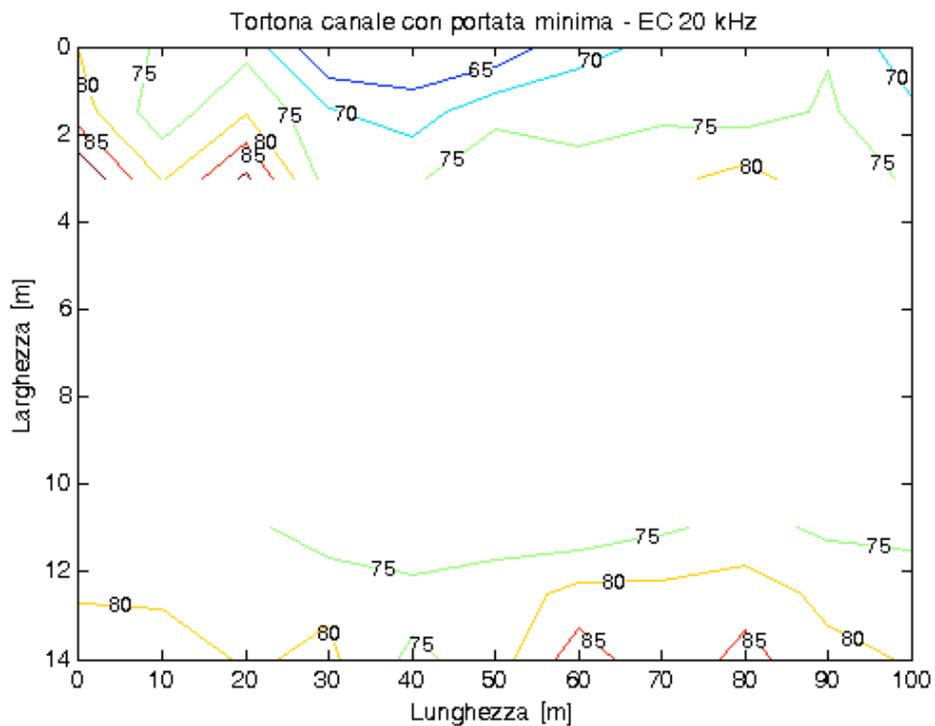


Figura n°55: Mappatura della conducibilità elettrica a 20 kHz nel sito di Tortona con il canale con una portata minima.



Dalla mappatura della conducibilità elettrica nel sito di Tortona con una portata minima non emergono aree caratterizzate da valori anomali di conducibilità elettrica.

I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 430 e i 380 mS/m per la fase con poca acqua a 5 kHz;
- compresi tra i 180 e i 160 mS/m per la fase con poca acqua a 10 kHz.
- compresi tra i 65 e i 85 mS/m per la fase con poca acqua a 20 kHz.

Mappatura con altezza del pelo libero dell'acqua maggiore

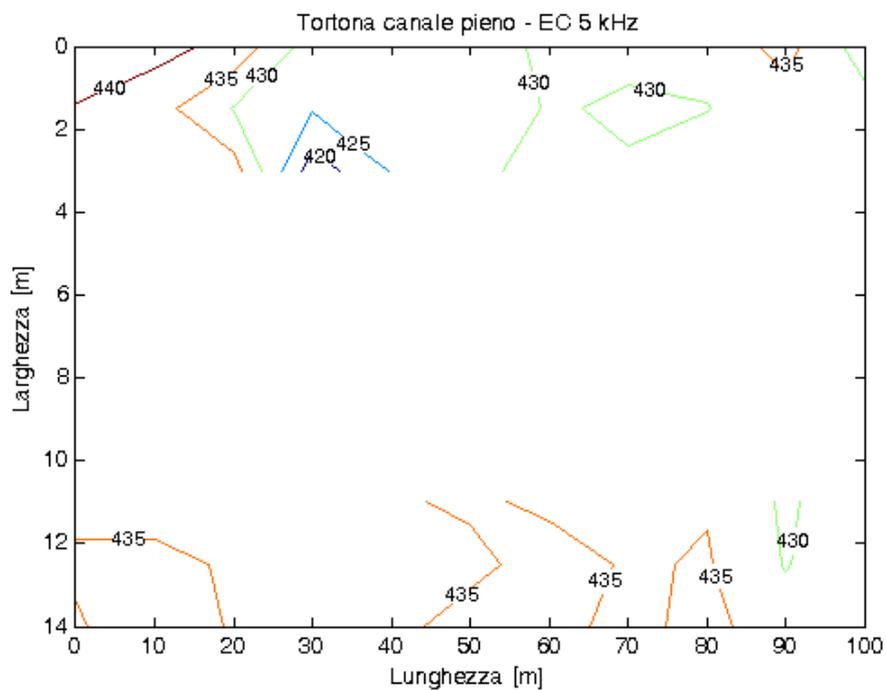




Figura n°56: Mappatura della conducibilità elettrica a 5 kHz nel sito di Tortona con il canale pieno.

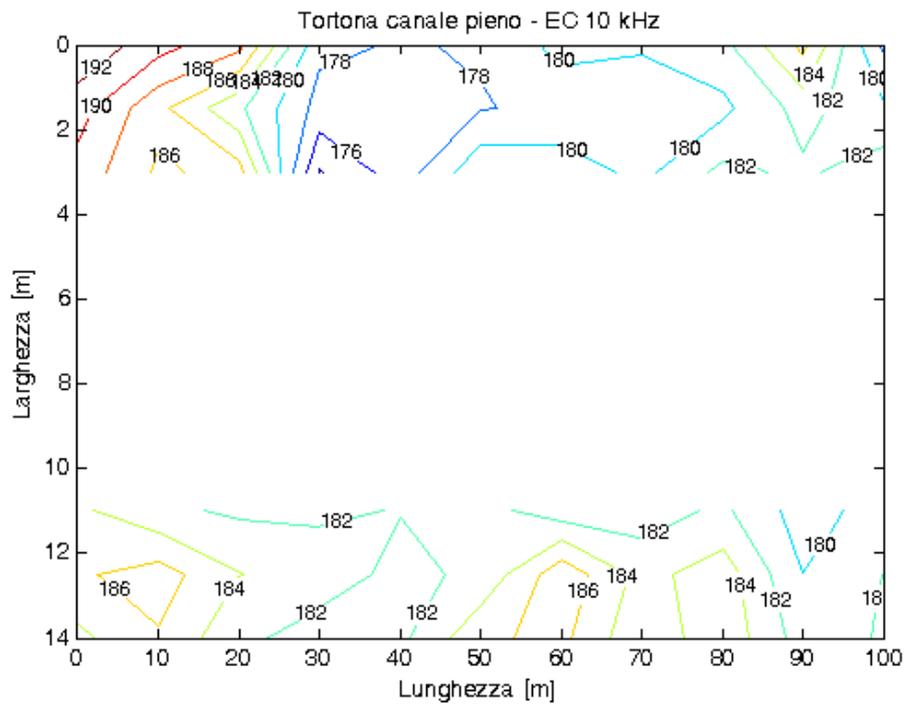


Figura n°57: Mappatura della conducibilità elettrica a 10 kHz nel sito di Tortona con il canale pieno.

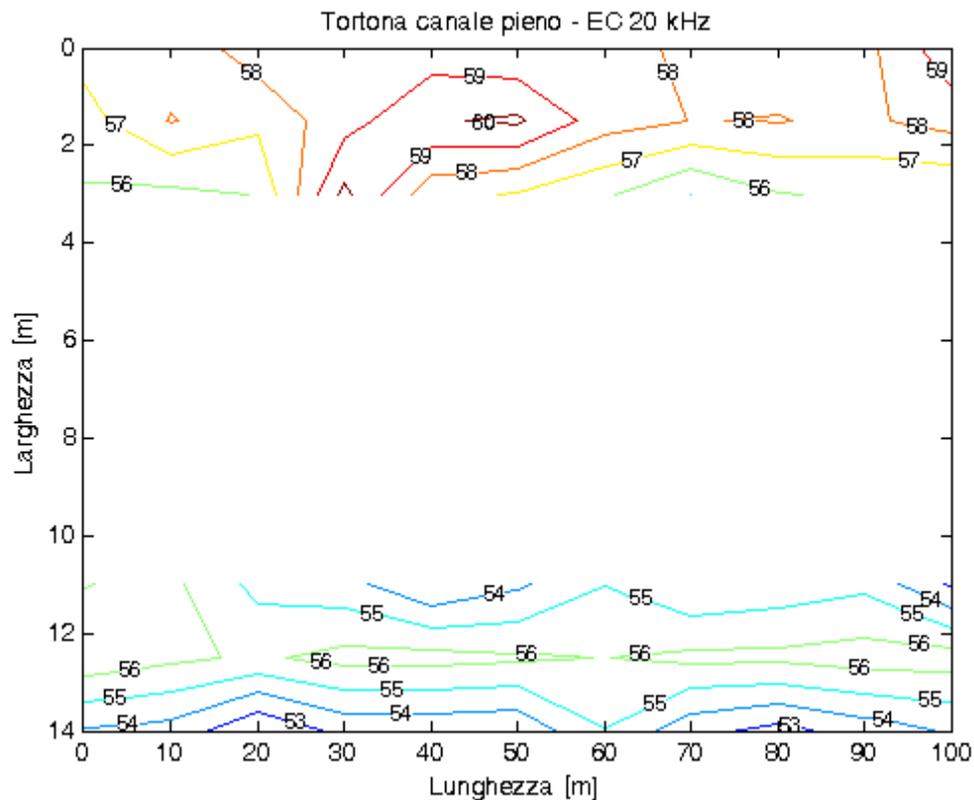


Figura n°58: Mappatura della conducibilità elettrica a 20 kHz nel sito di Tortona con il canale pieno.

Dalla mappatura della conducibilità elettrica del sito di Tortona non emergono criticità di rilievo. I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 440 e i 430 mS/m per la fase con canale pieno a 5 kHz;
- compresi tra i 192 e i 178 mS/m per la fase con canale pieno a 10 kHz.
- compresi tra i 53 e i 59 mS/m per la fase con canale pieno a 20 kHz.



Mappatura in asciutta

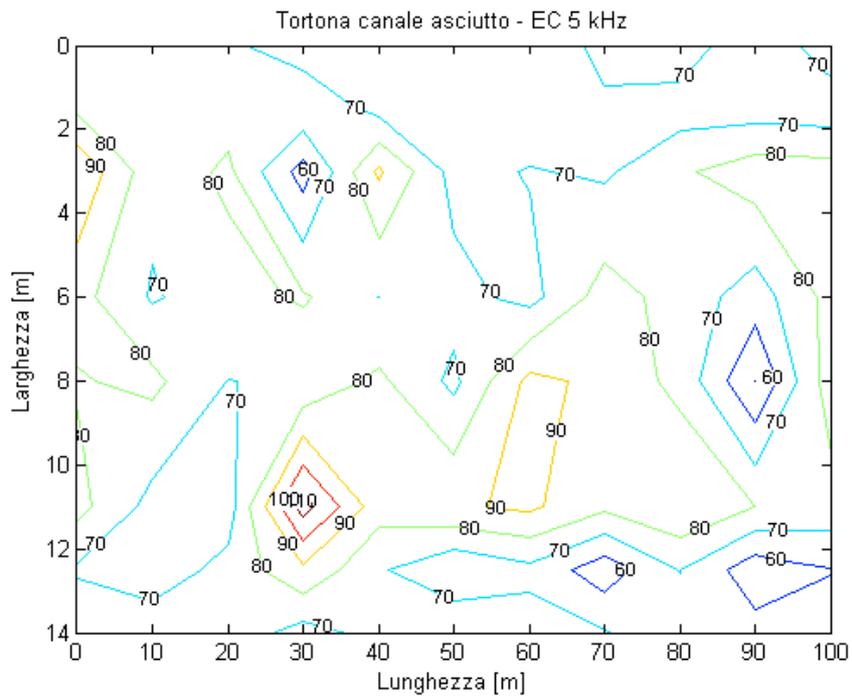


Figura n°59: Mappatura della conducibilità elettrica a 5 kHz nel sito di Tortona con il canale in asciutta

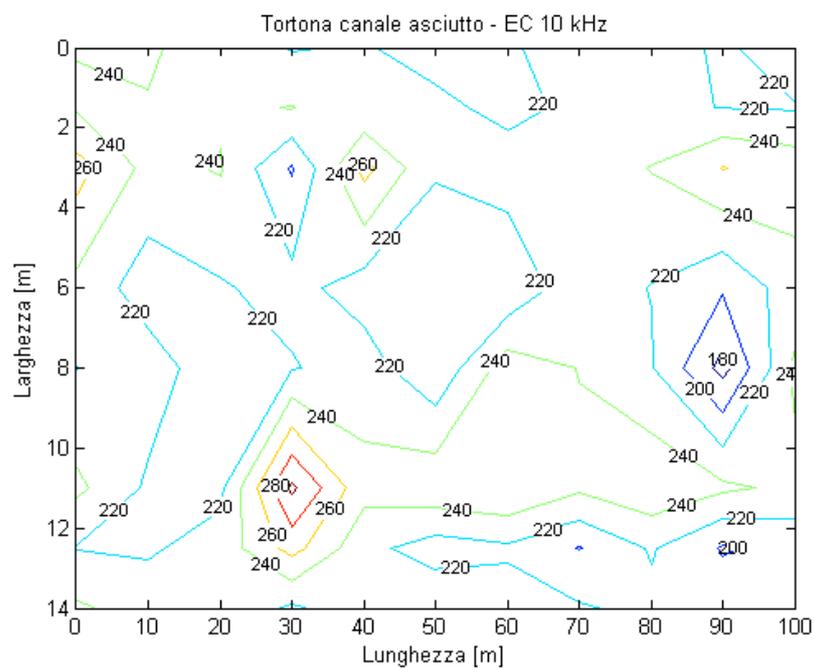




Figura n°60: Mappatura della conducibilità elettrica a 10 kHz nel sito di Tortona con il canale in asciutta

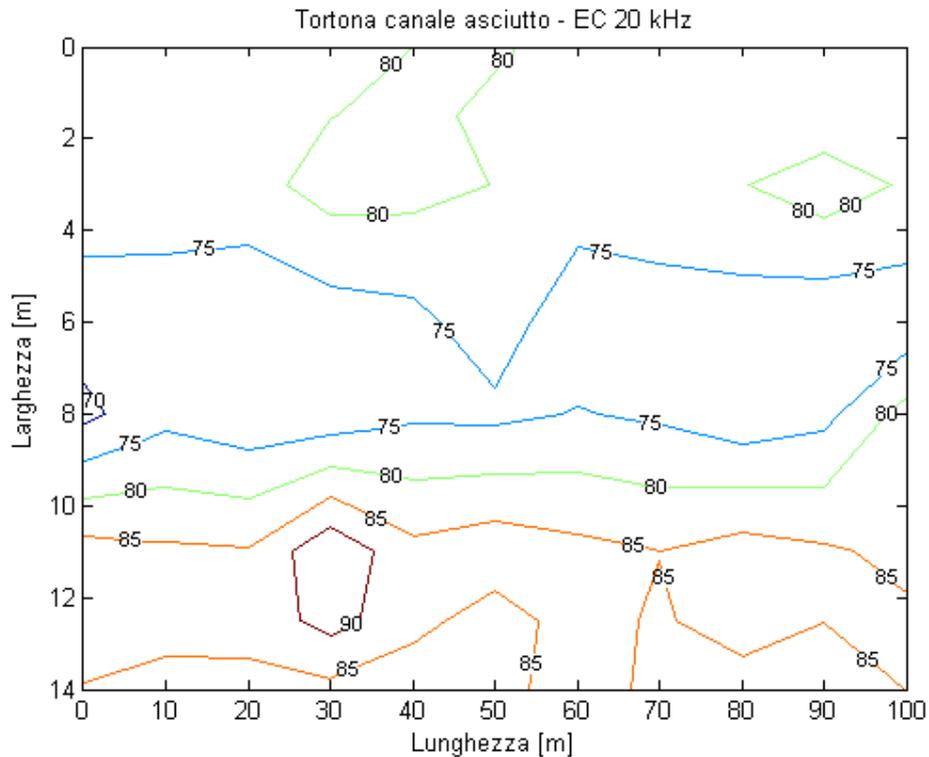


Figura n°61: Mappatura della conducibilità elettrica a 20 kHz nel sito di Tortona con il canale in asciutta

Dalla mappatura della conducibilità elettrica del sito di Tortona non emergono criticità di rilievo. I valori di conducibilità elettrica mostrano i seguenti andamenti:

- compresi tra i 100 e i 60 mS/m per la fase con canale pieno a 5 kHz;
- compresi tra i 280 e i 240 mS/m per la fase con canale pieno a 10 kHz.
- compresi tra i 85 e i 75 mS/m per la fase con canale pieno a 20 kHz.



5. Conclusioni

L'analisi comparativa delle diverse tecniche atte a determinare le eventuali perdite irrigue sui tratti di canale oggetto di studio ha prodotto risultati d'interesse applicativo, soprattutto poiché ha fornito diverse indicazioni su fattibilità, rapidità di esecuzione e rapporto costi-benefici offerti dai diversi metodi.

Le condizioni di applicabilità delle seguenti metodologie verranno affrontate in dettaglio nell'Appendice A – Applicabilità e limiti e nelle schede presenti in coda a questo capitolo.

La determinazione delle perdite irrigue è una tematica piuttosto complessa: per affrontarla è stato necessario un approccio che tenesse conto di discipline piuttosto differenti tra loro (fisica del suolo, idrologia dei corpi superficiali, termografia e geofisica, solo per citare quelle che hanno esercitato una maggiore influenza).

Alcune delle metodologie analizzate andranno sicuramente perfezionate in futuro con studi ulteriori che tengano conto dei futuri progressi scientifici e tecnologici.

Per quanto concerne le eventuali tecniche utilizzabili da operatori sul territorio (e che pertanto rispondano positivamente ai necessari requisiti di facilità di esecuzione, rapidità e basso rapporto costi-benefici), due metodologie si sono chiaramente distinte: il metodo *Inflow-Outflow* e l'utilizzo di apparecchiature EM coniugate alla tecnica della riflettometria nel tempo, per il monitoraggio del contenuto idrico del suolo.

I vantaggi offerti da tali tecnologie, rispetto ad altre come il *ponding test*, sono di essere poco invasive e di non richiedere tempi lunghi per l'esecuzione delle misurazioni in campo.

L'*Inflow-Outflow* si è dimostrato il metodo per la determinazione della presenza e dell'entità delle perdite più facile da applicare e di più veloce esecuzione. Un aspetto positivo di questo metodo è rappresentato dal fatto che le misurazioni di portata necessarie possono essere eseguite con tipologie di strumenti differenti (in questo caso mulinelli idrometrici e *Acoustic Doppler Profiler*).

Qualora si scegliesse di verificare la presenza di perdite irrigue utilizzando il metodo *Inflow-Outflow* si consiglia l'utilizzo incrociato dei due strumenti perché i dati ottenuti si validerebbero vicendevolmente.



Dall'analisi dei dati ottenuti dall'applicazione del metodo *Inflow-outflow* per i tratti di canale oggetto di studio, emerge che:

- 1) sono state rilevate perdite idriche nei tratti di canale di Osasco e Fossano; le perdite del canale di Osasco sono comprese tra un minimo di 15% (dato rilevato tramite mulinelli idrometrici) e un massimo di 23% (dato rilevato tramite *Acoustic Doppler Profiler*), le perdite del canale di Tortona sono comprese tra un minimo di 11 % (dato rilevato tramite *Acoustic Doppler Profiler*) e un massimo del 22% (dato rilevato tramite mulinelli idrometrici);
- 2) il bilancio idrico nel tratto di canale di Fossano mostra un incremento da monte verso valle che va da un minimo dell'11% (dato rilevato tramite mulinelli idrometrici) a un massimo dell'25 % (dato rilevato tramite *Acoustic Doppler Profiler*); ciò è spiegabile con la presenza della pianura sovrastante in sponda sinistra, che può contribuire in misura maggiore delle perdite in sponda destra;

Per quanto concerne l'applicazione del metodo *Inflow-Outflow* per la determinazione di perdite da canali irrigui è possibile fare le seguenti raccomandazioni:

- 1) sebbene si usino due strumenti differenti tra di loro quali il mulinello idrometrico e il *Doppler Profiler*, è necessario realizzare le campagne di misurazione nelle medesime sezioni;
- 2) occorre eseguire le misure di velocità della corrente in tratti di canali i più rettilinei possibili, in modo da rendere affidabile il calcolo delle portate, soprattutto per quanto concerne le misurazioni effettuate con i mulinelli idrometrici;
- 3) dove possibile servirsi di ponti o attraversamenti come punti in cui situare le sezioni di rilievo: da un lato renderanno più facile l'utilizzo dei mulinelli (calarli dall'alto è più semplice e impedisce che le misurazioni possano essere falsate dalla presenza di una persona in piedi nel canale accanto al mulinello) e dall'altro permettono, grazie ai contorni regolari in calcestruzzo che solitamente si trovano sotto di essi, un rilievo più preciso dei parametri caratteristici della sezione trasversale, che rendono più semplice e preciso il calcolo delle portate sia con mulinelli che con *Doppler Profiler*;



- 4) sarebbe auspicabile la realizzazione di campagne di misura ripetute nell'arco della medesima stagione, in modo da poter verificare l'andamento delle eventuali perdite nel tempo e di come esse possano variare in funzione delle variazioni di portata e di carico idraulico;
- 5) quando si effettuano le misure con mulinello idrometrico è necessario eseguire più ripetizioni della medesima misura per poi calcolare una media: questo renderà minore l'influenza sui risultati di eventuali errori casuali durante le misurazioni.

Un'altra tecnica che ha fornito risultati incoraggianti consiste nell'utilizzo combinato di EM e TDR. Tale tecnica per il momento non fornisce indicazioni quantitative esatte sul tenore delle perdite (anche se sono in corso studi a riguardo nel laboratorio della sezione di Idraulica del DEIAFA) ma ha il vantaggio di fornire indicazioni piuttosto speditive sulla presenza o meno di eventuali perdite. Infatti la misura consiste nel cammino di un operatore con lo strumento lungo la sponda o lungo il fondo in asciutta del canale.

La misura si basa sul fatto che, a parità di contenuto idrico, l'instaurarsi di un flusso d'acqua nel suolo può causare un abbassamento della conducibilità elettrica. La presenza di tale abbassamento appare legata alla presenza di valori di contenuti idrici costanti nel tempo: onde poter apprezzare questa diminuzione si consiglia di svolgere la campagna di misurazione in asciutta in un intervallo che va da un minimo di tre a un massimo di sette giorni dalla messa in asciutta del canale.

Le misurazioni di contenuto idrico del suolo, svolte con TDR, inoltre svolgono una duplice funzione: da una parte sono funzionali all'utilizzo dell'EM perché permettono di verificare la presenza di un contenuto idrico costante sia nella campagna di misurazione con acqua nel canale sia nella campagna di misurazione in asciutta; dall'altra la valutazione quantitativa del contenuto idrico sulle sponde del canale è sicuramente un fattore importante da tenere in considerazione perché, soprattutto su suoli caratterizzati da basse conducibilità idrauliche (suoli argillosi) e da basse percentuali di scheletro essa può fornire indicazioni importanti sulla presenza o meno di perdite d'acqua in corso (in particolar modo, se le misurazioni TDR sono effettuate a distanze regolari, esse possono permettere di rilevare perdite localizzate).



Un aspetto da tenere assolutamente in considerazione, nel pianificare campagne di misurazione EM per determinare la presenza di perdite lungo canali irrigui, è la necessità di utilizzare per un'intera campagna di misurazione un medesimo strumento.

Diversi prodotti presenti sul mercato, oltre il GEM-2 della Geophex impiegato nel presente studio, permettono la misurazione della conducibilità elettrica degli orizzonti superficiali del suolo con efficienza e precisione comparabili (per esempio l'EM-31 e l'EM-38 della Geonics il Dualem-1s della Dualem.com o la serie CMD della GF Instruments). Tuttavia, sebbene la tendenza generale ricavabile dalle misurazioni sia la medesima, ciascuno di questi strumenti opera ad una frequenza diversa e presenta una sua taratura specifica per la determinazione della conducibilità elettrica. Utilizzare strumenti differenti per determinare la conducibilità elettrica di un medesimo sito potrebbero perciò portare alla creazione di *dataset* non confrontabili tra loro.

Fatte presenti queste considerazioni, per l'utilizzo dell'EM per la determinazione delle perdite da canali irrigui si consiglia di usare modalità simili a quelle utilizzate nella sperimentazione qui riportate: predisposizione di allineamenti lungo gli argini dei canali a distanze ravvicinate (dove possibile effettuare misurazioni su entrambe le sponde); creazione di allineamenti per misure EM anche sul fondo del canale durante la campagna di misura in asciutta e utilizzo di sensori in grado di eseguire misurazioni con almeno due profondità d'indagine diverse, una delle quali permetta di isolare gli effetti dovuti alle variazioni di contenuto idrico superficiale dei suoli (per la determinazione delle profondità d'indagine si rimanda al libretto di istruzioni che accompagna ciascuno strumento).

Nei casi in cui sia possibile, è consigliato l'appaiamento del TDR alle misurazioni con EM. Si consiglia di effettuare le misure TDR a distanze regolari lungo gli allineamenti utilizzati per l'EM (è molto importante che le sonde TDR siano rimosse dal suolo prima di ogni rilievo con uno strumento EM poiché la loro presenza potrebbe influenzare le misurazioni di conducibilità elettrica).

L'appaiamento di misure TDR e EM permette di apprezzare la diminuzione di conducibilità elettrica che s'instaura quando, a parità dei contenuti idrici, viene meno il flusso attraverso il suolo (la perdita effettiva del canale).



Il vantaggio principale dell'EM sul metodo *Inflow-Outflow* è dato dalla possibilità di rilevare eventuali perdite localizzate lungo le sponde dei canali cercando le zone che presentano, a parità di altre condizioni, un abbassamento della conducibilità elettrica tra i dati rilevati prima della messa in asciutta e quelli successivi. L'EM permette anche di stabilire se le perdite hanno luogo allo stesso modo da entrambe le sponde del canale nel caso si voglia procedere all'impermeabilizzazione di una sola sponda.



6. Appendice A – Applicabilità e limiti.

Nel seguente capitolo verranno fornite indicazioni di natura sia economica che operativa agli enti che in futuro saranno interessati a realizzare valutazioni sulle perdite dei canali irrigui.

La tecnica che sicuramente si è dimostrata più promettente, soprattutto in funzione di campagne di misura su vasta scala, è quella EM (*Electrical Conductivity Meter*). L'abbassamento di conducibilità elettrica in presenza di flussi d'acqua nel suolo è un indicatore piuttosto preciso della presenza o meno di perdite da parte dei canali irrigui.

I vantaggi dell'EM sono rappresentati sia dalla sua facilità di utilizzo, dalla velocità con cui è possibile effettuare le misurazioni e dal relativo basso costo della strumentazione (un EM della GF Instruments costa poco più di 11000 euro).

E' importante sottolineare come l'impiego dell'EM non quantifichi le perdite, ma permetta di individuarne la localizzazione: qualora si voglia avere una stima quantitativa delle perdite effettive è necessario ricorrere a tecniche, quali il metodo *Inflow-outflow*, che permettono di quantificare l'ordine di grandezza delle perdite.

Il metodo *Inflow-Outflow* è stato applicato nel presente studio mediante l'ausilio di due tecnologie ben differenti tra loro: il mulinello idrometrico e l'*Acoustic Doppler Profiler*.

Dai dati analizzati emerge come l'*Acoustic Doppler Profiler* sia uno strumento più preciso in quanto fornisce al suo utilizzatore dati di velocità delle corrente e altezza del pelo libero dell'acqua contraddistinti da maggiore risoluzione e sensibilità. E' inoltre possibile monitorare l'andamento delle portate sui tratti di canale oggetto di studio per intervalli di tempo prolungati (anche alcune ore) effettuando misurazioni con elevata frequenza.

La maggiore precisione dell'utilizzo del *Acoustic Doppler Profiler* per effettuare misure di portata ha però un costo elevato: l'acquisto di due *Doppler Profiler* prevede una spesa non inferiore ai



trentamila euro. Solo studi professionali molto grandi o strutture universitarie possono fare fronte all'ammortamento di strumenti così costosi.

Un'alternativa all'acquisto dei *Doppler Profiler* è il noleggio dei medesimi: questa eventualità andrà esaminata in dettaglio dagli enti che si occuperanno di effettuare concretamente tali studi.

Si consiglia pertanto l'utilizzo dei Doppler Profiler per la determinazione delle perdite irrigue solo qualora lo studio richiesto richieda l'analisi di molti canali o di differenti tratti del medesimo canale: per studi di modeste dimensioni è più conveniente l'utilizzo del mulinello idrometrico. Il mulinello idrometrico, al contrario dell'Acoustic Doppler Profiler, si è infatti rilevato allo stesso tempo uno strumento meno preciso ma molto più semplice da utilizzare. L'utilizzo del mulinello è pertanto consigliato per quelle campagne di misurazioni in cui si rende necessario effettuare un grande numero di misure puntuali di portata su svariate sezioni individuate lungo il canale stesso. Un altro grande pregio del mulinello idrometrico è dato dalla relativa economicità dello strumento e dalla sua diffusione: il costo di un paio di mulinelli si aggira intorno ai quattromila euro ed essi vengono già utilizzati da molti studi professionali.

L'utilizzo di infiltrometri ad anello semplice per la determinazione dei tassi di infiltrazione e dei valori di conducibilità idraulica rappresenta invece una metodologia che è allo stesso tempo semplice da utilizzare (in campo) ed economica. I dati ottenuti possono dare indicazioni molto importanti sui volumi di acqua che vengono infiltrati dalle sponde o dal fondo del canale. L'unica problematica legata alle prove di infiltrazione è legata al fatto che l'applicazione delle formule matematiche per poter determinare la conducibilità idraulica dei suoli richiede conoscenze di fisica del suolo e di calcolo numerico piuttosto avanzate.

L'utilizzo del TDR (Riflettometria del Dominio del Tempo) per la determinazione dei contenuti idrici volumetrici dei suoli circostanti i canali è una tecnica molto utile per trovare eventuali perdite localizzate: esse verranno rilevate sotto forma di un aumento localizzato del contenuto idrico del suolo. L'individuazione di tali perdite è però legata alla disposizione delle sonde in rapporto all'argine del canale: se le sonde TDR vengono installate ad una distanza troppo elevata l'una dall'altra o troppo lontane dall'argine del canale eventuali perdite localizzate potrebbero passare inosservate.



Un *modus operandi* proponibile per una campagna di rilievo delle perdite irrigue potrebbe passare attraverso i seguenti passi:

- 1) effettuare misurazioni con tecnica EM secondo i criteri esposti in precedenza in questa relazione per poter stabilire in primo luogo se esistono le perdite e, in caso di risposta affermativa quali tratti di canale siano interessati da esse;
- 2) quantificare con la tecnica *Inflow-Outflow* l'ordine di grandezza delle perdite: se si lavora su un numero ridotto di canali è preferibile per ragioni meramente economiche l'utilizzo del mulinello idrometrico, se viceversa si lavora su un numero sufficiente di canali o su differenti tratti del medesimo canale diventa conveniente l'utilizzo di un *Acoustic Doppler Profiler*;
- 3) qualora si sospettasse di trovarsi dinnanzi a perdite localizzate si consiglia di utilizzare sia il TDR sia le prove di infiltrazione per individuarle.

L'utilizzo congiunto delle suddette tecniche permette in maniera speditiva e sicura di stabilire in primo luogo l'esistenza o meno delle perdite dei canali irrigui e in seconda istanza di fornire un'indicazione numerica sulle perdite effettive.



Ringraziamenti

Ringraziamo per il sostegno e l'inestimabile collaborazione ricevuta il dottor Cesare Giordano, Tecnico del Consorzio Irriguo delle Rogge Tortonesi, l'Ingegnere Paolo Doria, Tecnico del Consorzio Balera di Osasco e il dottor Giacomo Farinasso, Tecnico della Coutenza dei Canali ex-demaniali della pianura di Cuneo.

Ringraziamo inoltre: il dottor Franco Olivero, il dottor Alessandro Angeletti, il dottor Giorgio Pelassa e il dottor Emanuele Possiedi.



Bibliografia

- Abdu, H., Robinson, D.A., Jones, S.B., 2007 Comparing Bulk Soil Electrical Conductivity Determination Using the DUALEM-1S and EM38-DD Electromagnetic Induction Instruments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71:189-196 doi:10.2136/sssaj2005.0394
- Akbar, S., 2005. Measurement of Losses from On-farm Channels and Drains. Cooperative Research Centre for Sustainable Rice Production. Yanco Agricultural Institute, Yanco.
- Alam, M.M., Bhutta, M.N., 2004. Comparative evaluation of canal seepage investigation techniques. *Agric. Water Manage.* 66, 65–76.
- Banton, O., Seguin, M.K., Cimon, M.A. 1997. Mapping Field-Scale Physical Properties of Soil with Electrical Resistivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1010-1017.
- Bodla, M.A., Hafeez, A., Tariq, M., Chohan, M.R., Aslam, M., 1998. Seepage, Equity and Economic Evaluations for Canal Lining in Fordwah Eastern Sadiqia South Project, IWASRI, Publication No. 204. IWASRI, Lahore, pp. 11–48.
- Bouwer, H., Rice, R.C., 1968. Salt penetration technique for seepage measurement, *J. Irrigat. Drain. Div., ASCE*, Vol.94, IR4, Proc. Paper 6304, December, 1968, pp 481-492.
- Brunet, P., Clément, R., Bouvier, C. Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France. [Journal of Hydrology, Volume 380, Issues 1-2](#), *Journal of Hydrology*, Volume 380, Issues 1-2, 15 January 2010, Pages 146-153
- Carr, M.D., Rehmann, C.R., 2007. Measuring the dispersion coefficient with Acoustic Doppler Current Profilers. *J. Hydrogen Energy* 133, 977–982.
- Carter, R.W., 1970. Accuracy of current meter measurement. In: *Proceedings of the International Symposium of Hydrometry*, UNESCO, September 13–19, Koblenz, Germany.
- Curtis, B., Kelly, W.K., Resistivity-Recharge Relationship-Field Study. *Journal of Hydrology* 118(1990) pag 39-63.



Dukker, P., Bhutta, M.N., Roos, P., Javed, I., 1994. Seepage Losses from Lower Gugera Branch Canal, Punjab, Pakistan. IWASRI, Publication No. 134. Lahore, pp. 24–25.

Engelbert, P.J., Hotchkiss, R.H., Kelly, W.E., 1997. Integrated remote sensing and geophysical techniques for locating canal seepage in Nebraska. *Appl. Geophys.* 38, 143–154.

Fipps, G., 2001. Potential Water Savings in Irrigated Agriculture for the Rio Grande Planning Region (Region M). Rio Grande Regional Water Plan. Final Report, December.

Garcia, C.M., Oberg, K., Garcia, M.H., 2007. ADCP measurements of gravity currents in the Chicago River, Illinois. *J. Hydrogen Energy* 133, 1356–1366.

Gordon, R.L., 1996. Acoustic Doppler Current Profiler: Principles of Operation – A Practical Primer. RD Instruments, San Diego, California.

Green W.H., and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, part I, the flow of air and water through soils. *J. Agric. Sci.*, 4(1): 1-24.

Hersch, R.W., Fairbridge, R.W. (Eds.), 1998. *Encyclopedia of Water Resources*, vol. 442. Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 777–778.

Hook and Livingston, 1995 W.R. Hook and N.J. Livingston, Errors in converting time domain reflectometry measurements of propagation velocity to estimates of soil water content, *Soil Sci. Soc. Am. J.* **59** (1995), pp. 35–41.

Hotchkiss, R.H., Wingert, C.B., Kelly, W.E., 2001. Determining irrigation canal seepage with electrical resistivity. *ASCE J. Irrig. Drain* 127, 20–26.

Kacimov, A.R., 1992. Seepage optimization for trapezoidal channel. *ASCE J. Irrig. Drain* 118, 520–526.

Kinzli K.D., Martinez, M., Oad, R., Prior, A., Gensler, D. 2010. Using an ADCP to determine canal seepage loss in an irrigation district. [Agricultural Water Management](#), [Volume 97, Issue 6](#), *Agricultural Water Management*, Volume 97, Issue 6, June 2010, Pages 801-810.

Kolupaila, S., 1964. Discussion on Accuracy of Current Meter Measurements. *J. Hydraul. Div.*, *ASAE* 90 (HY1), 352–355.



- Lawler, D.J., 1990. Seepage Losses from Earthen Farm Channels in the Campaspe West Area. VCAH Dookie Campus Internal Report, October.
- Meyer, V.I., 1975. Manual of Remote Sensing. Am. Soc. Photogrammetry, Falls Church, VA.
- Morlock, S.E., 1996. Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Rep. 95-4218, Denver.
- Nystrom, E.A., Oberg, K.A., Rehmann, C.R., 2002. Measurement of turbulence with Acoustic Doppler Current Profilers – sources of error and laboratory results. In: Proc., Hydraulic Measurements and Experimental Methods 2002 CD-ROM. ASCE, Reston, VA.
- Roth, K., R. Schulin, H. Fluehler, W. Attinger. 1990. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach. Water Resour. Res. 26:2267-2273
- Shahid, B.A., Shakir, A.S., Bodla, M.A., 1996. Review of seepage losses in unlined and lined canals inside and outside Pakistan, Pib. No. 167. IWASRI, Lahore, pp. 20–26.
- Sharma, H.D., Chawla, A.S., 1979. Canal seepage with boundary of finite depth. ASCE J. Hydrogen Energy 105, 877–897.
- Siddique, M., Pasha, F.H., Choudhry. A.M., 1993. Seepage loss measurements on Chashma Right Bank Canal. In: Proceedings of the Workshop on Canal Lining and Seepage, Lahore, pp. 197–218.
- Skogerboe, G.V., Aslam, M., Khan, M.A., Mehmood, K., Mehmood, S., Khan, A.H., 1999. Inflow–outflow Channel Losses and Canal Lining Cost-Effectiveness in the Fordwah Eastern Sadiqia (South) Project. Report No. R-85. International Water Management Institute, Lahore, June 1999, pp. 3–8.
- Smith, R.J., Turner, A.K., 1982. Measurement of Seepage from Eastern Irrigation Channels. Civil Engineering Transactions, Institute of Engineers, Australia, pp. 338–345.
- Strong, A., Barron, G., 1994. On-farm Channel Seepage, an Investigation to Quantify the Level of Channel Seepage in the Murray Valley, NSW (NSW Agriculture).
- Swamee, P.K., 1995. Optimal irrigation canal sections. ASCE J. Irrig. Drain Eng. 12, 467–469.



Swamee, P.K., Mishra, G.C., Chahar, B.R., 2000. Design of minimum seepage loss canal sections. ASCE J. Irrig. Drain 126, 28–32.

Topp, G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resour. Res. 16:574–582

Van der Leen, F., Troise, F.L., Todd, D.K., 1990. The Water Encyclopedia. Lewis, Chelsea, Michigan.

Vert. Bull. Réseau Erosion 17 : 282-296. IRD, Montpellier.

Weller, J.A., McAteer, P., 1993. Seepage Measurement Techniques and Accuracy. In: Proceedings of the Workshop on Canal Lining and Seepage, Lahore, pp. 171– 196.

Yorke, T.H., Oberg, K.A., 2002. Measuring river velocity and discharge with acoustic Doppler profilers. Flow Meas. Instrum. 13, 191–195.



DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E INGEGNERIA AGRARIA, FORESTALE E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

ALLEGATI



DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E INGEGNERIA AGRARIA, FORESTALE E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Schede Riassuntive



DETERMINAZIONE PERDITE DEI CANALI IRRIGUI

SCHEDA VALUTAZIONE METODI

Misurazione del contenuto idrico mediante tecnica TDR (Riflettometria del dominio del tempo).

FINALITA': Il metodo permette di spazializzare il contenuto idrico volumetrico dei suoli circostanti il canale.

DESCRIZIONE SINTETICA: Vengono installate delle sonde TDR di lunghezza compresa tra i 50 e i 100 cm lungo l'argine del canale. Il numero e la disposizione delle sonde dipende principalmente dalla lunghezza del tratto di canale oggetto di studio e dal grado di dettaglio richiesto.

TEMPO NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE (per 100 m): almeno 2 giornate lavorative (una giornata per le misure con canale in secca e una giornata per le misure con acqua nel canale). Se possibile sarebbe auspicabile effettuare campagne di misurazione ripetute nel tempo con differenti altezze d'acqua all'interno del canale.

TEMPO NECESSARIO PER L'ELABORAZIONE E L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE: 3 giornate lavorative

STRUMENTAZIONE NECESSARIA: Un TDR 100 della Campbell Scientific, un computer portatile dotato di porta seriale, sonde TDR di lunghezza variabile dai 75 ai 100 cm, una rotella metrica, un martello dalla testa in gomma per piantare le sonde nel terreno.

DATI NECESSARI: La tecnica TDR permette di misurare la permittività apparente di un mezzo poroso. Successivamente tale parametro ci permette di calcolare il volume di acqua a partire, ad esempio, da una "relazione universale" di origine empirica costituita da un polinomio di terzo grado come quella proposta da Topp nel 1980.

APPLICABILITA' E LIMITI: Il metodo è difficilmente applicabile su suoli contraddistinti da elevate presenze di scheletro: in queste condizioni è molto difficile l'installazione delle sonde TDR. Qualora si verificasse quest'eventualità si potrebbe propendere per l'adozione di sonde TDR più corte (30 cm).

EVENTUALI CONDIZIONI ESCLUDENTI: Elevata presenza di scheletro.

SIGNIFICATIVITA' DEL METODO: La misurazione del contenuto idrico tramite tecnica TDR permette di rilevare eventuali perdite localizzate lungo l'argine dei canali. L'utilizzo del TDR è complementare a quello dell'EM (*Electrical Conductivity Meter*) in quanto le variazioni di conducibilità elettrica causate dall'instaurarsi di flussi in uscita dal canale possono essere dimostrate solo a contenuto idrico costante.

SCALA DI LAVORO/SCALA DI RESTITUZIONE DEL DATO: Il TDR permette di ottenere valori di contenuto idrico volumetrico sia dei suoli circostanti il canale sia del fondo del canale stesso. E' consigliabile installare sonde a diverse distanze dall'argine del canale in modo



POSSIBILI MIGLIORAMENTI OPERATIVI: Ove possibile si consiglia, nell'ambito di lavori che richiedono misure ripetute nel tempo, di lasciare in loco le sonde TDR onde poter ottimizzare le campagne di misura successive alla prima (l'installazione e l'estrazione del suolo delle sonde TDR del suolo è un'attività piuttosto onerosa sia dal punto di vista fisico che del tempo richiesto).

operatori

N° DI OPERATORI NECESSARI: 3

DI CUI SPECIALIZZATI: 1

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE : Elevato.

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE : Elevato.

GRADO DI ISTRUZIONE RICHIESTO PER OPERATORI SPECIALIZZATI: Laurea in Ingegneria, Laurea in Scienze Forestali e Ambientali.

costi

COSTI DELLA STRUMENTAZIONE: Il costo di un TDR 100 della Campbell Scientific è di 5600 euro circa.

Il costo delle sonde TDR utilizzate è di 30 euro l'una. Il costo di un computer portatile con porta seriale si aggira intorno ai 1500 euro.

COSTO NEL CASO DI INCARICO ESTERNO: Per i costi della manodopera si fa riferimento al tariffario regionale e all'albo degli Agronomi e Forestali della Provincia di Torino. Il costo di un operaio specializzato è intorno ai 23,50 euro ora, mentre il costo di un Laureato in Scienze Forestali è di 56 euro ora. Partendo da questi dati è possibile stabilire un costo totale per la sola manodopera di 850 euro (200 per per i due operai e 450 per il Laureato in Scienze Forestali e Ambientali) per giornata di campagna di misura per un totale minimo di 5300 euro (visto che vengono richieste almeno due campagne di misura). Il costo dell'interpretazione delle misure, considerando tre giornate lavorative di un Laureato in Scienze Forestali e Ambientali è di circa 1200. Il costo del solo personale si aggira pertanto intorno ai 2700 euro per l'analisi con TDR di un tratto di canale di circa 100 metri.

Per quanto riguarda il costo della strumentazione starà agli enti incaricati valutare se procedere o all'acquisto o al noleggio della strumentazione in funzione del numero di campagne di misura che gli verranno commissionate.



SCHEDA VALUTAZIONE METODI

Misurazione della conducibilità elettrica tramite EM (*Electrical Conductivity Meter*).

FINALITA': La realizzazione di campagne di misura con EM permette di rilevare le perdite dei canali irrigui in quanto, secondo i recenti studi di Akhtar et al. (2011), a parità di contenuto idrico, un flusso d'acqua nel suolo causa un abbassamento della conducibilità elettrica.

DESCRIZIONE SINTETICA: Vengono effettuate strisciate parallele al canale. Si consiglia di effettuare strisciate a distanze di 1.5, 3 e 4.5 m. Devono essere eseguite almeno due campagne di misure con differenti altezze di pelo libero all'interno del canale. Qualora una delle campagne di misura sia effettuata con il canale in asciutta, essa andrebbe effettuata a pochi giorni dalla messa in asciutta: l'abbassamento della conducibilità elettrica è rilevabile solo quando il contenuto idrico dei suoli si mantiene costante.

Si consiglia di lavorare con una strumentazione EM che permetta la scansione contemporanea del suolo con onde elettromagnetiche di diversa frequenza.

TEMPO NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE: Una giornata lavorativa per campagna di misura. In una giornata di misurazioni è possibile effettuare un chilometro di misurazioni su entrambe le sponde del canale.

Si consiglia di effettuare almeno due campagne di misura contraddistinte da differenti altezze di pelo libero all'interno del canale.

TEMPO NECESSARIO PER L'ELABORAZIONE E L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE: 3 giornate lavorative.

STRUMENTAZIONE NECESSARIA: Un'apparecchiatura EM, una rotella metrica.

DATI NECESSARI: I dati di conducibilità elettrica del canale rilevati ad almeno tre frequenze d'indagine differenti (si consiglia un setup con frequenze di 5, 10 e 20 mHz).

APPLICABILITA' E LIMITI: Il metodo è difficilmente applicabile su suoli contraddistinti dalla presenza di manufatti interrati (gasdotti e acquedotti) o di rottami ferrosi in generale: la presenza di metallo nel terreno interferisce con la strumentazione.

EVENTUALI CONDIZIONI ESCLUDENTI: La metodologia non è applicabile qualora fossero presenti manufatti o infrastrutture lungo tutto il tratto di canale oggetto di studio (esempio: acquedotti).

INCERTEZZA : Le misurazioni EM potrebbero risultare sfalsate quando effettuate su terreni con manufatti o cavità sotterranei di cui non si conosce l'esistenza.

PRECISIONE : Questo metodo si limita a rilevare la presenza o meno di eventuali perdite, non stima il loro ordine di grandezza.



SIGNIFICATIVITA' DEL METODO: Il metodo è altamente significativo in quanto è possibile effettuare campagne di misura su vasta scala lungo i canali oggetto di studio. Suddividendo le aree analizzate in segmenti è possibile determinare quali siano le sezioni di canale effettivamente contraddistinte da perdite.

SCALA DI LAVORO/SCALA DI RESTITUZIONE DEL DATO: L'EM permette di settare la frequenza di misura su cui opera lo strumento. Per avere campagne di misura sufficientemente dettagliate si consiglia di utilizzare una frequenza pari o superiore a 0,5 secondi.

POSSIBILI MIGLIORAMENTI OPERATIVI: Dove possibile sarebbe auspicabile effettuare le strisciate EM su terreni il più possibile lisci e privi di asperità. L'operatore dovrebbe cercare di effettuare le strisciate a velocità costante.

operatori

N° DI OPERATORI NECESSARI: 2

DI CUI SPECIALIZZATI: 1

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE : Elevato.

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE : Elevato.

GRADO DI ISTRUZIONE RICHIESTO PER OPERATORI SPECIALIZZATI: Laurea in Ingegneria, Laurea in Scienze Forestali e Ambientali.

costi

COSTI DELLA STRUMENTAZIONE: Il costo di un CMD-1 della GF Instruments è di 10600 euro.

COSTO NEL CASO DI INCARICO ESTERNO: Per i costi della manodopera si fa riferimento al tariffario regionale e all'albo degli Agronomi e Forestali della Provincia di Torino. Il costo di un operaio specializzato è intorno ai 23,50 euro ora, mentre il costo di un Laureato in Scienze Forestali è di 56 euro ora. Partendo da questi dati è possibile stabilire un costo totale per la sola manodopera di 650 euro (190 per l'operaio e 450 per il Laureato in Scienze Forestali e Ambientali) per giornata di campagna di misura per un totale minimo di 1300 euro (visto che vengono richieste almeno due campagne di misura). Il costo dell'interpretazione delle misure, considerando tre giornate lavorative di un Laureato in Scienze Forestali e Ambientali è di circa 1200. Il costo del solo personale si aggira pertanto intorno ai 2500 euro per l'analisi con EM di un tratto di canale di circa un chilometro.

Per quanto riguarda il costo della strumentazione starà agli enti incaricati valutare se procedere o all'acquisto o al noleggio della strumentazione in funzione del numero di campagne di misura che gli verranno commissionate.



SCHEDA VALUTAZIONE METODI

Misure di portata con mulinelli idrometrici.

FINALITA': La realizzazione di misure con mulinelli idrometrici permette di ottenere una misurazione speditiva delle portate nei canali oggetto di studio. Effettuando la comparazione tra misure effettuate su due sezioni situate ad una distanza non inferiore ai 700 metri lungo il canale è possibile effettuare delle stime di massime delle eventuali perdite irrigue.

DESCRIZIONE SINTETICA: Vengono effettuate misurazioni nello stesso istante (coordinandosi a distanza tramite telefono) su due sezioni situate ad una distanza di almeno 700 metri l'una dall'altra. Successivamente si provvede al calcolo delle portate. Per ciascuna sezione è consigliabile effettuare le misurazioni a 8 cm dal fondo del canale e ad una distanza di 10 cm l'una dall'altra. Successivamente si calcola la differenza tra la portata misurata nella sezione di monte e la portata misurata nella sezione di valle.

TEMPO NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE (per 100 m): Un'ora per ciascuna campagna di misura. Durante la medesima giornata è possibile effettuare misurazioni su diversi tratti di canale.

E' consigliabile effettuare ripetute campagne di misura con differenti altezze d'acqua all'interno del canale onde avere un'idea più chiara dell'andamento delle portate (e di conseguenza delle perdite) nel tempo.

TEMPO NECESSARIO PER L'ELABORAZIONE E L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE: 3 giornate lavorative

STRUMENTAZIONE NECESSARIA: 2 mulinelli idrometrici dello stesso modello. Aste triplometriche per la misura della geometria della sezione.

DATI NECESSARI: Misure di geometria della sezione, misure di velocità e altezza di pelo libero dell'acqua ottenute tramite i mulinelli idrometrici.

APPLICABILITA' E LIMITI: Il metodo è difficilmente applicabile su canali con correnti molto turbolente.

E'auspicabile che le due sezioni siano distanti tra loro almeno 7-800 metri: in caso contrario le eventuali perdite (o guadagni) rilevate sarebbero indistinguibili dal margine di errore della strumentazione.

EVENTUALI CONDIZIONI ESCLUDENTI: Elevata turbolenza dei canali oggetto di studio. Corrente non stabile (Brusche variazioni di portata in brevi intervalli temporali).

PRECISIONE : Le misure con mulinello idrometrici sono meno precise rispetto a quelle effettuate con Acoustic Doppler Profiler ma sono più speditive.

SIGNIFICATIVITA' DEL METODO: Le misure di portata effettuate con mulinelli sono meno precise ma più speditive rispetto a quelle effettuate con Acoustic Doppler Profiler. La facilità con cui è possibile realizzare



misure con mulinello idrometrico rende l'utilizzo del mulinello conveniente soprattutto in quei casi in cui sia necessario realizzare un numero elevato di misurazioni in diverse sezioni del medesimo canale.

SCALA DI LAVORO/SCALA DI RESTITUZIONE DEL DATO: L'utilizzo dei mulinelli idrometrici è limitato

POSSIBILI MIGLIORAMENTI OPERATIVI: Dove possibile è consigliabile effettuare le misurazioni in sezioni artificiali a sezione regolare. E' inoltre consigliabile effettuare in prossimità di ciascuna sezione una prova di stabilità della corrente prima delle misure vere e proprie. La prova di stabilità consiste semplicemente in una misurazione con mulinello in un solo punto del canale della durata di 30 minuti. Ad intervalli regolari si annota la velocità della corrente: se al termine della prova non si sono ottenute differenze significative di velocità è possibile procedere con la misurazione vera e propria.

operatori

N° DI OPERATORI NECESSARI: 2

DI CUI SPECIALIZZATI: 1

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE : Medio.

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE : Medio.

GRADO DI ISTRUZIONE RICHIESTO PER OPERATORI SPECIALIZZATI: Licenza superiore.

costi

COSTI DELLA STRUMENTAZIONE: Il costo di un mulinello idrometrico si aggira mediamente intorno ai 2000 euro. Questo costo va ovviamente moltiplicato per due poiché per poter determinare le perdite vanno effettuate misurazioni nello stesso intervallo di tempo su due sezioni situate ad alcune centinaia di metri di distanza l'una dall'altra.

COSTO NEL CASO DI INCARICO ESTERNO: Per i costi della manodopera si fa riferimento al tariffario regionale e all'albo degli Agronomi e Forestali della Provincia di Torino. Il costo di un operaio specializzato è intorno ai 23,50 euro ora, mentre il costo di un Laureato in Scienze Forestali è di 56 euro ora. Partendo da questi dati è possibile stabilire un costo totale per la sola manodopera di 650 euro (190 per l'operaio e 450 per il Laureato in Scienze Forestali e Ambientali) per giornata di campagna di misura per un totale minimo di 1300 euro (visto che vengono richieste almeno due campagne di misura). Il costo dell'interpretazione delle misure, considerando tre giornate lavorative di un Laureato in Scienze Forestali e Ambientali è di circa 1200. Il costo del solo personale si aggira pertanto intorno ai 2500 euro.

Per quanto riguarda il costo della strumentazione starà agli enti incaricati valutare se procedere o all'acquisto o al noleggio della strumentazione in funzione del numero di campagne di misura che gli verranno commissionate.

DETERMINAZIONE PERDITE DEI CANALI IRRIGUI



SCHEDA VALUTAZIONE METODI

Misure di portata con Acoustic Doppler Profiler.

FINALITA': La realizzazione di misurazioni con l'ausilio di due Acoustic Doppler Profiler permette di eseguire misurazioni delle portate in due sezioni poste ad alcune centinaia di metri l'una dall'altra per periodi di tempo prolungati.

DESCRIZIONE SINTETICA: Vengono posizionati due Acoustic Doppler Profiler in due sezioni dalla geometria conosciuta. I Doppler Profiler vengono lasciati in acquisizione per alcune ore (almeno sei). In seguito si provvede al calcolo delle portate utilizzando le formule proposte dalla letteratura scientifica.

TEMPO NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE (per 100 m): Un giorno per campagna di misura. E' auspicabile realizzare più campagne di misura durante la stagione irrigua onde avere un'idea più chiara dell'andamento delle portate (e di conseguenza delle perdite) nel tempo.

TEMPO NECESSARIO PER L'ELABORAZIONE E L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE: 3 giornate lavorative

STRUMENTAZIONE NECESSARIA: 2 Acoustic Doppler Profiler, aste triplometriche per la misura della geometria della sezione del canale.

DATI NECESSARI: Misure di geometria della sezione, misure di velocità e altezza di pelo libero dell'acqua ottenute tramite Acoustic Doppler Profiler.

APPLICABILITA' E LIMITI: E'auspicabile che le due sezioni siano distanti tra loro almeno 7-800 metri: in caso contrario le eventuali perdite (o guadagni) rilevate sarebbero indistinguibili dal margine di errore della strumentazione. I Doppler Profiler solitamente possiedono un programma interno che permette di calcolare direttamente le portate: è comunque preferibile calcolare personalmente le portate usando sia i dati di velocità e di altezza di pelo libero misurati dallo strumento sia della geometria della sezione effettuate in campo dagli operatori.

EVENTUALI CONDIZIONI ESCLUDENTI: Portate troppo elevate potrebbero rendere impossibile il posizionamento della strumentazione sul fondo del canale.

PRECISIONE : Gli Acoustic Doppler Profiler della Teledyne Instruments lavorano con un margine di errore di 0.3 cm.

SIGNIFICATIVITA' DEL METODO: Le misure di portata effettuate con Acoustic Doppler Profiler sono molto più precise rispetto a quelle effettuate con mulinelli idrometrici e permettono di spazializzare le velocità della corrente in relazione alla sezione di misura (è possibile suddividere ciascuna sezione di misura in 5000 celle di area uguale: ciascuna cella sarà appaiato ad una propria velocità).

SCALA DI LAVORO/SCALA DI RESTITUZIONE DEL DATO: Un Acoustic Doppler Profiler può effettuare misurazioni di livello e velocità della corrente con frequenza molto alte (fino a 60 misurazioni al minuto).



POSSIBILI MIGLIORAMENTI OPERATIVI: Dove possibile è consigliabile posizionare lo strumento in sezioni artificiali a sezione regolare.

operatori

N° DI OPERATORI NECESSARI: 2

DI CUI SPECIALIZZATI: 2

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE : Medio.

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE : Medio.

GRADO DI ISTRUZIONE RICHIESTO PER OPERATORI SPECIALIZZATI: Licenza superiore.

costi

COSTI DELLA STRUMENTAZIONE: Il costo di un Acoustic Doppler Profiler della Teledyne Instruments è di circa 16000 euro. Questo costo va raddoppiato poiché è necessario utilizzare due Acoustic Doppler Profiler nello stesso tempo.

COSTO NEL CASO DI INCARICO ESTERNO: Per i costi della manodopera si fa riferimento al tariffario regionale e all'albo degli Agronomi e Forestali della Provincia di Torino. Il costo di un operaio specializzato è intorno ai 23,50 euro ora, mentre il costo di un Laureato in Scienze Forestali è di 56 euro ora. Partendo da questi dati è possibile stabilire un costo totale per la sola manodopera di 650 euro (190 per l'operaio e 450 per il Laureato in Scienze Forestali e Ambientali) per giornata di campagna di misura per un totale minimo di 1300 euro (visto che vengono richieste almeno due campagne di misura). Il costo dell'interpretazione delle misure, considerando tre giornate lavorative di un Laureato in Scienze Forestali e Ambientali è di circa 1200. Il costo del solo personale si aggira pertanto intorno ai 2500 euro.

Per quanto riguarda il costo della strumentazione starà agli enti incaricati valutare se procedere o all'acquisto o al noleggio della strumentazione in funzione del numero di campagne di misura che gli verranno commissionate.



Prove di infiltrazione in campo in funzione della determinazione della conducibilità idraulica dei suoli.

FINALITA': La realizzazione di prove di infiltrazione permette di determinare la conducibilità idraulica dei suoli. Tali prove andranno eseguite sia sulle sponde sia sul fondo del canale. Si consiglia di realizzare prove di infiltrazione ove possibile anche sul fondo del canale. Il numero di prove realizzate dipenderà dalla lunghezza del tratto di canale oggetto di studio, anche se si consiglia in linea di massima di realizzare almeno una prova di infiltrazione ogni 50 metri.

DESCRIZIONE SINTETICA: Una volta scelta una zona rappresentativa, e dopo avere rimosso, dove presente, il manto vegetale, il cilindro viene infisso nel suolo per 2 cm di profondità, facendo attenzione a perturbare il meno possibile la superficie e al tempo stesso impedire la fuoriuscita di acqua per risalita esternamente al cilindro.

Successivamente si porrà sul fondo una sottile rete di plastica (diametro 10 cm) per evitare la formazione di una sospensione nel versare l'acqua che potrebbe formare una crosta superficiale durante l'infiltrazione alterando il rilievo.

Si versa poi nel cilindro 10 cm di acqua il più rapidamente possibile, ma con l'accorgimento di utilizzare un cucchiaio piegato o una mano per smorzare l'energia di caduta.

Contemporaneamente è fatto partire il cronometro e sono annotati tutti i tempi di passaggio dell'acqua da una tacca all'altra.

Successivamente, tramite il modello proposto da Green e Ampt nel 1911 è possibile ottenere i valori di conducibilità idraulica a partire dalle curve di infiltrazione.

TEMPO NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE (per 100 m): Il tempo necessario per l'esecuzione delle misure dipende sia dal numero di prove di infiltrazione previsto sia dalle caratteristiche fisiche dei suoli oggetto di studio (una prova di infiltrazione su suolo sabbioso può durare pochi minuti, viceversa una prova di infiltrazione su un suolo argilloso o con molta sostanza organica può durare diverse ore).

Un numero ragionevole di prove di infiltrazione da realizzare in una giornata lavorativa si aggira intorno alle 15-20 prove.

TEMPO NECESSARIO PER L'ELABORAZIONE E L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE: 3 giornate lavorative

STRUMENTAZIONE NECESSARIA: Numero variabile di infiltro metri ad anello semplice, cronometri e righelli.

DATI NECESSARI: La curva di infiltrazione rilevata in campo permette di determinare la conducibilità idraulica dei suoli.

APPLICABILITA' E LIMITI: Il metodo è difficilmente applicabile su suoli contraddistinti da elevate presenze di scheletro.



EVENTUALI CONDIZIONI ESCLUDENTI: Elevata presenza di scheletro nel terreno. Elevata presenza di sostanza organica nel primo orizzonte del suolo che impedisce la libera infiltrazione dell'acqua presente nel cilindro.

INCERTEZZA : La precisione delle misure è in buona parte legata al livello d'attenzione che l'osservatore esercita nella prova.

SIGNIFICATIVITA' DEL METODO: Il metodo è altamente significativo in quanto è possibile ottenere, con una prova relativamente semplice da eseguire in campo, indicazioni fondamentali sulle quantità di acqua che vengono infiltrate quotidianamente nel fondo (e sulle sponde) del canale.

POSSIBILI MIGLIORAMENTI OPERATIVI: Qualora fosse possibile sarebbe auspicabile l'impiego di dispositivi elettronici automatici (sensori a infrarossi o a ultrasuoni) per rilevare la discesa dell'acqua nel cilindro in modo da eliminare o quantomeno ridurre il margine d'errore (in questo caso dovuto principalmente all'utilizzo di un rilevatore umano).

operatori

N° DI OPERATORI NECESSARI: 2

DI CUI SPECIALIZZATI: 1

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'ESECUZIONE DELLE MISURE : Basso

GRADO DI SPECIALIZZAZIONE RICHIESTO PER L'INTERPRETAZIONE DELLE MISURE : Elevato

GRADO DI ISTRUZIONE RICHIESTO PER OPERATORI SPECIALIZZATI: Licenza superiore.

costi

COSTI DELLA STRUMENTAZIONE: Il costo dei cilindri di plastica necessari per gli infiltro metri semplici è di poche decine di euro.

COSTO NEL CASO DI INCARICO ESTERNO: Per i costi della manodopera si fa riferimento al tariffario regionale e all'albo degli Agronomi e Forestali della Provincia di Torino. Il costo di un operaio specializzato è intorno ai 23,50 euro ora, mentre il costo di un Laureato in Scienze Forestali è di 56 euro ora. Partendo da questi dati è possibile stabilire un costo totale per la sola manodopera di 650 euro (190 per l'operaio e 450 per il Laureato in Scienze Forestali e Ambientali) per giornata di campagna di misura per un totale minimo di 1300 euro (visto che vengono richieste almeno due campagne di misura). Il costo dell'interpretazione delle misure, considerando tre giornate lavorative di un Laureato in Scienze Forestali e Ambientali è di circa 1200. Il costo del solo personale si aggira pertanto intorno ai 2500 euro per realizzare 10-15 prove di infiltrazione.



DIPARTIMENTO DI ECONOMIA E INGEGNERIA AGRARIA, FORESTALE E AMBIENTALE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Per quanto riguarda il costo della strumentazione starà agli enti incaricati valutare se procedere o all'acquisto o al noleggio della strumentazione in funzione del numero di campagne di misura che gli verranno commissionate.



Elenco tavole

Tavola 3.1.a - Inquadramento fotocartografico del sito (Osasco).

Tavola 3.1.b - Inquadramento foto cartografico del sito (Fossano).

Tavola 3.1.c - - Inquadramento foto cartografico del sito (Tortona).