



LIFE Project Number

**<LIFE +10 ENV/IT/000394/WARBO>**

**FINAL Report**

**Covering the project activities from 01/01/2012 to 31/12/2014**

Reporting Date

**<31/03/2015>**

LIFE+ PROJECT NAME or Acronym

**<WATER RE-BORN - Artificial Recharge: Innovative  
Technologies for the Sustainable Management of Water  
Resources>**

**Annex 62**

Name of Deliverable:

Protocollo multidisciplinare WARBO e valutazione della trasferibilità del protocollo ad altre realtà europee

Code of associated action: 4,6,7,9



# **Protocollo multidisciplinare WARBO e valutazione della trasferibilità del protocollo ad altre realtà europee**

## **1.1 Background: Ricarica artificiale della falda acquifera in adempimento della Water Framework Direttiva.**

Questo Rapporto offre una sintesi del lavoro tecnico e scientifico effettuato nell'ambito del progetto WARBO in applicazione della direttiva quadro sulle acque (WFD) attraverso l'utilizzo della ricarica artificiale degli acquiferi in aree di pianura alluvionale interessate da gravi perdite qualitative e quantitative delle risorse idriche. Le attività dimostrative di ricarica artificiale sono state applicate nell'Alta Pianura Friulana e nella Pianura Padana, due contesti estremamente diversi per orografia, permeabilità del suolo, condizioni climatiche e qualità delle risorse. I due contesti selezionati sono significativi ai fini della trasferibilità dei risultati a scala europea e in tale ottica si sviluppa il protocollo WARBO. In dettaglio il rapporto descrive le metodologie e prevede protocolli di applicazione inerenti le metodologie multidisciplinari per la caratterizzazione geologica, biologica e idrogeologica dei siti, per identificare le cause del degrado e efficacia della ricarica artificiale nel raggiungimento degli obiettivi della WFD in termini di protezione e valorizzazione delle risorse idriche e miglioramento dello stato ecologico dei corpi idrici. Le macroaree di progetto sono state scelte soprattutto per le loro criticità rispetto al depauperamento delle risorse idriche dovute principalmente all'estremizzazione del clima osservate nell'ultimo ventennio al fine di fornire con la ricarica artificiale opportune misure di mitigazione e per sviluppare la resilienza ai cambiamenti climatici in atto.

## **1.2 Ricarica artificiale nell'ambito degli adempimenti della EU Water Framework Directive & the Floods Directive**

La vita dell'uomo, la salvaguardia dell'ambiente e degli ecosistemi dipendono dalla sostenibilità idrica e purtroppo per i cambiamenti climatici, la pressione antropica e l'incremento dell'inquinamento sono sempre più estese le aree che soffrono di carenze idriche e la gestione idrica di aree interessate da desertificazione comporta perdita della biodiversità e limitazione all'accesso alle risorse essenziali. Per contrastare la perdita di risorse si hanno due strategie principali: il risparmio delle risorse e loro protezione e favorire la ricarica integrando gli impianti con la rete ecologica. Oggi non sono più sostenibili gli sprechi di risorse idriche che hanno caratterizzato il 900 e nelle strategie di gestione compatibile delle risorse che hanno nella ricarica artificiale uno dei più efficaci strumenti di gestione consentono di contrastare le



dinamiche di uso competitivo che contrappone l'esigenza di fornitura di risorse essenziali alla popolazione con le esigenze delle attività produttive. I piani di interventi finalizzati a favorire la ricarica naturale e artificiale sono redatti in accordo con le numerose Direttive emanate dalla UE per favorire una gestione compatibile delle risorse naturali in un'ottica di integrazione e gestione a scala di bacino e scala transfrontaliera. La gestione delle risorse idriche è regolamentata dalla Unione Europea (UE) attraverso la EU Water Framework Directive e ha inserito l'impianto di ricarica di Ponte San Pietro nei piani di gestione delle alluvioni in adempimento delle misure previste dalla Floods Directive.

La WFD - Water Framework Directive ha avuto un ruolo importante non solo nella classificazione dei corpi idrici in termini di qualità e quantità ma anche nella definizione di piani di gestione compatibile delle risorse idriche per i vari Distretti e bacini Idrografici adottando le misure utili a diminuire le pressioni, ridurre gli impatti e soprattutto a favorire il risparmio idrico e la ricarica degli acquiferi. Il progetto WARBO in adempimento della WFD ha applicato la ricarica artificiale in aree di pianura alluvionale rappresentative dei principali contesti geomorfologici a scala Europea (alta pianura alluvionale, media pianura e bassa pianura alluvionale) affrontando le criticità e difficoltà nella gestione delle condizioni climatiche estreme caratterizzate da lunghi periodi siccitosi e/o da piogge intense a cui si associa un rapido deflusso e bassi tassi di infiltrazione negli acquiferi. Il progetto WARBO ha preso in considerazione ambienti di pianura

alluvionale al fine di sviluppare protocolli che definiscono per ogni ambiente geomorfologico e climatico le migliori procedure possibili di applicazione della ricarica artificiale. Ha individuato le procedure analitiche e le metodologie che consentono la caratterizzazione dei siti, di individuare le cause di degrado, le criticità e soluzioni utili alla riqualificazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei con minori costi e massima efficacia. Il presente protocollo definisce in base alle problematiche di degrado le soluzioni di intervento e modalità di approvvigionamento in modo da fornire un supporto per la gestione della ricarica e monitoraggio nei vari contesti geomorfologici, idrogeologici e geologici. L'esperienza ha consentito di valutare costi e criticità in modo fornire gli strumenti per il raggiungimento degli obiettivi ambientali definiti dalla UE per il 2020. Il seguente protocollo ha tenuto conto di tutte le Direttive che si occupano di acqua in modo da inerire nel protocollo le misure prioritari e i vincoli in esse definite. (2008/105/CE; sugli standard di qualità ambientale; 2007/60/CE sulle alluvioni; sulle acque sotterranee (2006); La direttiva Nitrati; La direttiva sulle acque reflue urbane)

Il documento ha tenuto conto della sostenibilità della procedura in termini economici ed ambientali (riduzione dell'inquinamento e emissioni di GHG) analizzando le problematiche di integrazione della ricarica artificiale con i vincoli e vulnerabilità definiti dall'assetto del territorio, dalle attività economiche e agronomiche. valutando vantaggi e svantaggi sulla salute degli ecosistemi acquatici. Infine il monitoraggio della sensibilità termica degli acquiferi alle escursioni stagionali ha fornito i dati utili a supportate l'integrazione delle attività di ricarica con il potenziale termico degli impianti che possono essere progettati in maniera da integrarsi con sistemi di captazione dell'energia geotermica.



### 1.3 Sviluppo del progetto WARBO e attività principali

Obiettivo principale del progetto WARBO è stato quello di sviluppare i protocolli multidisciplinari applicativi della metodologia di ricarica artificiale per la gestione delle risorse idriche. L'approccio multidisciplinare ha verificato le migliori pratiche da utilizzare per integrare i minori apporti idrici in considerazione che al depauperamento quantitativo si accompagna spesso un inquinamento diffuso. In particolare vaste aree della pianura alluvionale padana, così come la maggior parte delle pianure alluvionali delle aree costiere che si affacciano sul mediterraneo sono soggette a salinizzazione degli acquiferi e conclamati processi di desertificazione, problematiche che possono essere affrontate con l'introduzione della ricarica artificiale nei piani di gestione, analogamente le fasce pedemontane o alta pianura alluvionale sono caratterizzate da sedimenti grossolani molto permeabili che evolvono nella media e bassa pianura in sedimenti più fini e meno permeabili e questa diminuzione di permeabilità favorisce l'emergenza dell'acquifero. Questa area di transizione è nota come "linee delle risorgive" e perimetra senza soluzione di continuità la Pianura Padana dall'appennino alle Prealpi e la Pianura Friulana. In seguito alle variazioni del regime termico e pluviometrico negli ultimi anni si è assistito ad una graduale migrazione verso quote più basse delle sorgenti e in alcuni casi alla loro scomparsa. Le numerose segnalazioni della scomparsa di sorgenti storiche ha allarmato la popolazione che ha acquisito consapevolezza delle ricadute sugli habitat di pregio e sul paesaggio dell'area pedemontana e il progetto WARBO ha individuato nell'area di Mereto di Tomba e di Ponte Rosso (Z.I.P.R.) il contesto rappresentativo su cui testare la ricarica artificiale ai fini della mitigazione e applicazione della Direttiva acqua. Nell'alta pianura friulana la ricarica artificiale è stata finalizzata non solo alla compensazione dei minor apporti idrici responsabili dell'arretramento della quota della linea delle risorgive e sofferenze dei delicati habitat, ma anche a supporto della riforma agraria di trasformazione dell'irrigazione da impianti a scorrimento a impianti a goccia resa necessaria dagli elevato inquinamento da nitrati che affligge gli acquiferi della pianura veneto-friulana. La riforma agraria fornendo le risorse utili per l'equilibrio della falda epidermica consente di evitare che l'acqua in eccesso fornita con l'irrigazione possa lisciviare i nitrati convogliandoli nell'acquifero. Questi minori apporti risultano efficaci per limitare gli apporti dei nitrati in falda ma comporta un depauperamento quantitativo nella falda che può essere compensato dalla ricarica artificiale con numerosi piccoli impianti che grazie all'elevata permeabilità del sottosuolo possono apportare significativi volumi di acque di ottima qualità a compensazione dei minori apporti irrigui.

Nella Pianura Padana la ricarica artificiale è stata finalizzata al raggiungimento di quattro obiettivi: 1) contrastare la salinizzazione e inquinamento diffuso da metalli tossico-nocivi degli acquiferi, 2) garantire approvvigionamento irriguo ed idropotabile con risorse di buona qualità anche durante le fasi siccitose, 3) rendere il territorio resiliente ai cambiamenti climatici e al rischio idrogeologico inserendo gli invasi di ricarica nei piani di gestione degli eventi climatici estremi, 4) rinforzare la rete ecologica e riqualificare gli invasi di cava che nella pianura padana e nell'area del delta del Po sono tutti interessati da gravi problemi di salinizzazione. 5) verificare la possibilità di riqualificare ai fini idropotabili acquiferi salinizzati attraverso il confinamento del cuneo salino con immissione di acqua dolce di buona qualità. Obbiettivi raggiunti con l'impianti di Ponte San Pietro a Copparo.



Il progetto ha contribuito a ridurre l'impatto ambientale della gestione idraulica del territorio fornendo l'opportunità di inserire le numerosissime cave dismesse, diffuse nel territorio e tutte interessate da salinizzazione, nei piani di realizzazione delle casse di espansione in modo da consumare meno suolo possibile e riqualificare i copri idrici superficiali e sotterranei con la ricarica di acque dolci. Dalle attività di progetto è emerso che questo utilizzo promiscuo di vasche di espansione e impianti di ricarica può essere adottato senza rischi di inquinamento in cave che insistono in aree a basso impatto antropico e i cui canali di alimentazione sono caratterizzati da risorse di ottima qualità in modo da convogliare nell'acquifero solo acque che rispettano le caratteristiche definite nella Direttiva Acqua. L'opportunità di progettare le vasche di espansione in aree a basso impatto antropico riqualificando i canali irrigui di alimentazione con cultura di piante efficaci per le fitodepurazione consente di rinforzare i corridoi ecologici, contrastare la salinizzazione degli invasi aumentandone la biodiversità e di apportare grandi volumi di risorse idriche di qualità che infiltrandosi nel sottosuolo possono rallentare i tempi di corrivazione delle acque degli eventi di piena favorendo l'infiltrazione nella falda.

Il progetto grazie all'approccio multidisciplinare WARBO ha sviluppato un modello che ha supportato le scelte progettuali dell'impianto di ricarica in tutte le sue fasi dalla scelta della metodologia di ricarica, all'approvvigionamento idrico, al trattamento delle acque all'alimentazione dell'invaso di infiltrazione, al monitoraggio e infine al bilancio dell'efficacia del metodo ai fini della mitigazione dei rischi di desertificazione, idrogeologico e contaminazione da nitrati. In merito alla metodologia di ricarica è stato necessario abbandonare l'applicazione di sistemi di ricarica per iniezione diretta in quanto il sisma del Maggio 2012 ha evidenziato le criticità di azioni di iniezione forzata in acquiferi semiconfinati ubicati a profondità inferiori a 15 metri per aree in cui possono realizzarsi eventi sismici con PGA maggiore di 0.15g (Peak Ground Acceleration, picco di accelerazione al suolo). Si deve infatti evitare che la sovrappressione indotta dall'iniezione forzata possa favorire l'effetto cosismico della liquefazione. Le stazioni di monitoraggio dell'ARPA hanno rilevato un significativo innalzamento delle falde subito dopo gli eventi sismici principali del 20 e del 29 maggio con intensità variabile in base alla distanza dagli ipocentri [3]. In aree sismiche la ricarica artificiale mediante vasche di infiltrazione non ha controindicazioni in quanto non induce sovrappressione negli acquiferi mentre l'iniezione forzata può essere critica e va applicata con cautela e solo in aree ubicate a distanza di sicurezza da settori urbanizzati o in cui ricadono infrastrutture di interesse pubblico (impianti idrovori, ponti, viabilità principale). Il protocollo WARBO analisi è emerso che essa può essere utilizzata nella pianura padana per ricaricare l'acquifero A2, quando questo acquifero ospita acque dolci. Le notevoli profondità di questo corpo idrico non comportano rischi di effetti cosismici per cui la metodologia può essere applicata senza controindicazioni. La ricarica può essere anche utilizzata per ricaricare l'acquifero A1 solo in settori dove questo acquifero si comporta come una falda libera essendo in comunicazione idraulica con l'alveo dei fiumi. IL sisma del 2012 ha consentito di verificare che gli acquiferi in comunicazione con i sedimenti delle aree golenali hanno la possibilità di scaricare lungo i fiumi l'incremento della pressione di poro indotta dall'evento sismico e questo è quello che è avvenuto lungo il Fiume PO, il Cavo Napoleonico e il Panaro dove non si sono registrati fenomeni di liquefazione lungo l'attuale argine anche in settori prossimali alla zona epicentrale, mentre la prossimale pianura alluvionale che è stata lacerata da un sistema "en échelon" di fratture che hanno permesso la eruzione di acqua e sabbia per liquefazione. Il monitoraggio dei livelli idrometrici nel tratto compreso fra le stazioni di Sermide, Pontelagoscuro e Cavo Napoleonico durante la scossa principale del 20 maggio 2012 ha mostrato un innalzamento del livello di circa 8 cm che si è mantenuto per diverse ore per esaurirsi in circa 6 ore. Le geometrie delle curve idrometriche non sono giustificabili con l'onda libera che si propaga durante il sisma



in quanto questo tipo di segnale si esaurisce molto rapidamente mentre un incremento dell'afflusso di acqua in alveo per emungimento della falda sembra la causa più probabile. Per le motivazioni qui esposte l'impianto di ricarica di Ponte San Pietro è stato finalizzato ad azioni di ricarica per infiltrazione, la cui efficienza è favorita dalla presenza dei sedimenti sabbiosi di un paleoalveo che è in comunicazione idraulica con il sistema multiacquifero A0 il quale a sua volta ha interazioni con l'acquifero confinato A1.

Il monitoraggio geofisico, geochimico e biologico per un intero ciclo stagionale ha preceduto l'attività di ricarica fornendo un utile riferimento delle dinamiche di ricarica naturale sulla base del quale si è cercato di valutare l'effetto della ricarica artificiale nella riqualificazione qualitativa e quantitativa delle risorse idriche e sulla biodiversità consentendo di sviluppare il modello concettuale di ricarica per aree di pianura alluvionali. L'integrazione dei dati geofisici e geochimici ha consentito di produrre mappe tematiche 2D che forniscono la restituzione grafica e spaziale della migrazione dell'interfaccia acqua dolce –acqua salata durante la ricarica. Questo approccio si è rivelato vincente per definire in aree non interessate da accessi diretti tramite piezometri per definire a basso costo ed in modo non invasivo l'efficacia dell'azione di ricarica. Le attività di progetto sono ricadute in corrispondenza di due estremi climatici: 2012-2013 che è stato un periodo nettamente più caldo della media climatologica, sia a livello globale che nelle aree di progetto. Il 2012 è stato il 21° anno consecutivo con temperatura media più elevata della norma e il numero medio di notti tropicali, cioè con temperatura minima maggiore di 20°C, è stato il secondo più alto della serie a partire dal 1961, dopo il 2003. Queste condizioni termiche non consentono ai corpi idrici superficiali e al suolo di raffreddarsi durante la notte per cui l'evaporazione e l'evapotraspirazione hanno comportato nel 2012 un fortissimo stress sulle risorse idriche ed ecosistemi ad essi connessi, mentre il 2014 è stato caratterizzato da una stagione estiva anomala, caratterizzata da una ridotta frequenza di condizioni di alta pressione che hanno fatto sì che si avessero brevi periodi di bel tempo solo nel periodo di giugno e valori termici inferiori alle medie e precipitazioni rilevanti sopra la norma climatica soprattutto nel mese di luglio l'anticiclone delle Azzorre e quello Africano si sono estesi con costanza sull'Europa centro del Mediterraneo alimentando i frequenti sistemi frontali atlantici in moto da ovest verso l'Europa meridionale e il Mediterraneo. Queste condizioni hanno favorito un'importante ricarica naturale degli acquiferi per cui le ricadute della ricarica artificiale sono amplificate da queste condizioni climatiche favorevoli. Anche se il progetto WARBO le istituzioni che hanno la gestione e proprietà dei siti continueranno l'attività di ricarica e monitoraggio (nei siti test le sonde multi parametriche installate saranno lasciate in funzione e nel sito test di Ponte San Pietro il consorzio di Bonifica installerà ulteriori centraline di monitoraggio. L'efficacia della ricarica e le procedure di applicazione vengono di seguito illustrate in questo rapporto tecnico conclusivo delle attività prodotte da UNIFE in collaborazione con tutto il partenariato.



## 1.5 Piano di caratterizzazione e modello concettuale idrogeologico-geochimico e geofisico

La caratterizzazione dei siti test del progetto WARBO è avvenuta attraverso la raccolta dei dati litostratigrafici disponibili presso gli archivi dei Comuni di pertinenza, del Genio civile e del Servizio geologico delle due Regioni di Progetto. I dati disponibili sono stati integrati e validati attraverso sondaggi eseguiti per il progetto finalizzati alla realizzazione dei pozzi piezometrici e prelievo dei campioni da destinare alle analisi sedimentologiche, chimiche, petrofisiche e geofisiche. Nell'area friulana si disponeva

di una ricca banca dati sulla stratigrafia dei pozzi messa a disposizione dall'università di Udine, mentre nel territorio di Copparo la non idoneità degli acquiferi ai fini irrigui ed ancor più idropotabili ha comportato la presenza di pochi pozzi e di questi solo alcuni disponevano dei dati sulla sequenza litostratigrafica utile a correlare i parametri geochimici con i corpi idrici. Il progetto è stata un'occasione per realizzare una banca dati organica che consentisse di definire con maggior dettaglio caratteristiche stratigrafiche e geochimiche dei corpi acquiferi colmando le lacune conoscitive che anche in questa area come per la maggior parte delle reti di monitoraggio dell'acqua in Italia vedono focalizzati i piani di monitoraggio per la tutela della salute e non per la tutela ambientale. I dati raccolti sono stati restituiti in carte tematiche idrogeologiche sulla base dei quali è stato definito il programma di installazione dei pozzi piezometrici per il monitoraggio dell'acquifero ai fini della ricarica artificiale. I dati oltre a rispondere alle esigenze del progetto rientrano nei piani di tutela delle risorse idriche in adempimento della / Direttiva 2000/60 CE. PA. Lo studio ha consentito di verificare la presenza di acque salate nel primo acquifero confinato mettendo in luce che l'inquinamento non è legato all'intrusione delle acque marine attuali ma a quelle fossili. Data la relazione che è emersa dal progetto fra salinizzazione degli acquiferi e presenza nel sottosuolo di importanti strutture tettoniche sarebbe opportuno ai fini della protezione e il miglioramento delle risorse idriche rivedere le reti di monitoraggio esistenti nelle aree di pianura che si impostano in settori tettonizzati alla luce delle interferenze delle strutture tettoniche profonde con la superficie. Lungo queste strutture possono infatti risalire acque fossili ricche in Sali e metalli tossico-nocivi e in regime di basso gradiente geotermico queste emergenze possono non essere associate a anomalie termiche. Dal progetto è emerso che nella pianura padana molti pozzi ARPA della rete di monitoraggio eliminati dalla rete a causa del peggioramento del loro stato qualitativo, mentre nell'ottica del progetto proprio queste realtà sono quelle su cui prioritariamente si deve intervenire per contrastare il degrado ed evitare che si estenda alle aree limitrofe.

Per studiare il processo di infiltrazione nella vasca di ricarica a Mereto di Tomba (UD) sono state usate contemporaneamente due metodologie non distruttive: geoelettrica tomografica e termografia. La prima è basata sulle misure di conduttività elettrica e polarizzazione indotta del suolo ed è usata per mappare il movimento in profondità delle acque di ricarica sulla base delle variazioni della conduttività elettrica determinata dal passaggio dell'acqua. La termografia è basata sulle misure di temperatura del suolo e permette di ottenere un'accurata mappatura del grado di umidità e di saturazione della superficie del terreno. Le misure sono state fatte per entrambe le metodologie a intervalli di pochi minuti all'inizio dell'infiltrazione e successivamente ogni mezz'ora. Le misure sul fondo della vasca sono state fatte per l'intera notte fino alle 10 della mattina seguente per 24 ore con un intervallo di un'ora per la geoelettrica e con un intervallo di 20 minuti per la termografia. A causa delle ridotte dimensioni della vasca la massima



profondità raggiunte dalle misure geoelettriche è stata di 8 metri dal fondo e quindi circa 13 dal piano campagna. Il giorno successivo le misure sono state ripetute all'esterno della vasca, con un array più lungo, in modo tale da raggiungere una profondità maggiore di investigazione, calcolata in circa 20 metri; anche in questo caso le misure sono state fatte in continuo per 20 ore. Per verificare la presenza di perdite d'acqua dal vicino canale di irrigazione, sono state eseguite alcune misure geoelettriche sul fondo del canale con un cavo con elettrodi in grafite per misure subacquee. Le immagini termiche hanno fornito un'immagine eccellente dell'avanzamento e riduzione dell'estensione dell'area interessata dall'acqua e dell'area saturata dopo l'infiltrazione. La correlazione dei dati di superficie ottenuti con la termografia con sezioni elettriche, ha permesso di ottenere una mappa basata sul tempo, pseudo 4D, dell'avanzamento del processo di infiltrazione fino a una profondità di circa 20 metri. L'arrivo e il transito del plume di infiltrazione, assieme con le interazioni con gli stati del sottosuolo, può essere mappato precisamente e correlato con la contrazione dell'area allagata in superficie causata dall'infiltrazione. Poiché non ci sono perdite dal vicino canale, tutte le variazioni elettriche del sottosuolo sono determinate dal processo di infiltrazione. Nel sito di Copparo (FE) il compito principale era l'applicazione della termografia per verificare l'estensione dell'acqua in ingresso nella vasca di fitodepurazione e successivamente all'interno del lago. Grazie alla differenza di temperatura delle acque nei tre elementi: canale, vasca di fitodepurazione e lago, è stato possibile osservare l'intero processo di propagazione e mescolamento da un'unità all'altra.

Sulla base delle caratteristiche idrogeologiche, geofisiche e geochemiche si è proceduto alla redazione del modello stratigrafico - idrogeologico-geochemico concettuale che grazie al coinvolgimento delle istituzioni responsabili il modello oltre alla ricarica rappresenta un importante strumento per la pianificazione degli interventi e per la definizione delle politiche di tutela e l'uso sostenibile delle risorse idriche come previsto dalla Direttiva 2000/60 / CE. Il progetto di ricarica in entrambi i siti era stato sottoposto a procedure VIA e queste procedure sono state rivalutate dal tavolo tecnico per verificare eventuali criticità non esplicitate. L'iter di caratterizzazione e monitoraggio è stato definito nelle relazioni tecniche del progetto e soddisfano i requisiti di legge e sono in accordo con la 2000/60 / CE del 23/10/2000.





## 1.6 Approvvigionamento idrico e impatto territoriale nella gestione della ricarica artificiale

L'approvvigionamento delle risorse da destinare alla ricarica rappresenta una delle maggiori criticità della metodologia in quanto deve soddisfare le seguenti condizioni:

a) le risorse idriche da destinare alla ricarica devono avere ottima qualità in quanto non devono compromettere le caratteristiche dei corpi idrici. Queste condizioni devono essere garantite grazie a idonei sistemi di monitoraggio anche quando gli acquiferi sono salinizzati per indurre la graduale riqualificazione delle riserve idriche sotterranee che è uno dei principali obiettivi della ricarica.

b) le attività di ricarica non devono creare dinamiche di uso competitivo per cui l'approvvigionamento deve inserirsi nei piani di gestione delle risorse a scala di bacino. Nel caso del progetto WARBO l'approvvigionamento è stato erogato dai consorzi di bonifica e si concilia con la distribuzione a scopi irrigui.

c) L'approvvigionamento delle risorse deve essere inserito nei piani di gestione della rete irrigua e della rete di deflusso delle acque meteoriche in modo da operare senza costi energetici, condizione essenziale a operare senza incrementare le emissioni di GHG.

d) la destinazione delle risorse idriche per la ricarica deve garantire il deflusso minimo vitale nei corsi d'acqua interferenti e il trattamento delle risorse idriche per il raggiungimento delle caratteristiche di qualità previste dalla direttiva acqua deve essere perseguita attraverso l'inserimento delle aree di ricarica nei corridoi fluviali.

e) I volumi conferiti per la ricarica non devono innescare rischi geologici per cui occorre verificare se l'incremento della pressione di poro possa innescare frane, incrementare in caso di eventi sismici l'effetto di sito, incrementare il rischio alluvione nelle aree morfologicamente sensibili. L'area test del progetto WARBO di Ponte San Pietro ricade in un settore morfologicamente depresso per cui il Comune di Copparo in collaborazione con il Consorzio di Bonifica di Ferrara hanno valutato l'impatto che l'erogazione delle risorse per ricarica artificiale sul mantenimento del franco di bonifica e dell'efficienza della rete idraulica. La ricarica artificiale non deve confliggere con il deflusso dei surplus idrici in condizioni di precipitazioni di elevata intensità. Ogni territorio in base alle criticità elencate deve definire piani di gestione delle risorse da destinare alla ricarica artificiale, definendo costi.

Il piano di approvvigionamento e gestione delle acque di ricarica si è avvalso di una analisi climatica a scala locale che ha consentito di confermare l'estrema vulnerabilità e sensibilità climatica delle macroaree selezionate e i trend climatici emersi dal progetto WARBO sono risultati in accordo con quanto segnalato per il territorio italiano da NCDC/NOAA e ISPRA confermando in Italia anomalie di temperatura media significativamente maggiori rispetto ai valori climatologici osservati a scala globale [1, 2]. Per la



ricostruzione del ciclo dell'acqua, la modalità di fornitura, e il tempo di ricarica, sono state eseguite analisi geochimiche e geochimiche isotopiche con la determinazione degli isotopi stabili  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta \text{D}$ .

L'indagine climatica e geochimica è stata effettuata a scala di bacino in modo da verificare le eventuali criticità o sorgenti di rischio di inquinamento. Questa attività è stata particolarmente critica nell'area test di Ponte San Pietro in quanto il sisma del 2012 ha indotto la risalita di plume di acque fossili salate che potevano contaminare la rete irrigua. Questo approccio ha consentito di individuare idonee risorse idriche da destinare alle aree di ricarica in conformità con i parametri previsti dalla direttiva 2000/60 / CE.



## 1.6 Metodi analitici innovativi

Il progetto si è avvalso di metodologie convenzionali integrate da metodi innovativi finalizzati alla caratterizzazione dei siti, al monitoraggio della ricarica artificiale e alla elaborazione dei dati. Si segnalano le seguenti innovazioni metodologiche:

**a) Analisi climatica comparata all'analisi isotopica al fine di definire i tempi di ricarica.** Nell'ambito del progetto determinare a basso costo  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta \text{D}$  nelle precipitazioni, nelle acque superficiale sotterranee è stato utilizzato un metodo innovativo basato sulla spettroscopia di assorbimento laser ad alta risoluzione. Nello specifico è stato utilizzato un analizzatore isotopico, prodotto dalla ditta americana Los Gatos LWIA 24d. Questa strumentazione acquisita nel 2012 è stata tarata attraverso un inter confronto con la spettrometria di massa verificando un'ottima corrispondenza dei dati per campioni con conducibilità elettrica inferiore a  $3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Occorre aver cura di alternare all'analisi isotopica di campioni con conducibilità elettrica superiore a  $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$  l'analisi si acqua distillata in modo da lavare la camera, in quanto i Sali presenti nel campione possono producono un effetto matrice che influisce sulla determinazione del rapporto isotopico. Per la caratterizzazione isotopica delle precipitazioni e determinazione del loro afflusso sull'acquifero a falda libera il progetto WARBO ha definito che i campionamenti delle acque meteoriche deve essere eseguiti entro 12 ore dalla precipitazione in quanto tempi più lunghi fanno sì che le acque piovane raccolte nei pluviometri possano riequilibrarsi con l'atmosfera acquisendo l'impronta isotopica locale e quindi non sono più idonee a fornire il marker di precipitazione utile a tracciare

l'infiltrazione delle acque piovane.e le analisi degli acquiferi devono essere condotte prima e dopo le precipitazioni in modo da comprendere i tempi e efficacia delle precipitazioni sulla ricarica naturale e i tempi di campionamento possono essere più lunghi in quanto le capacità di scambio con l'atmosfera sono più ridotte.

**b) Utilizzo del Microraman confocale per caratterizzare le fasi minerali primarie e secondarie che caratterizzano le litologie dell'invaso di ricarica e dei corpi acquiferi interessati dalle attività di ricarica.** L'indagine è molto utile in corpi acquiferi interessati da problematiche di contaminazione diffusa da sostanze tossico-nocive in quanto consente di determinare se l'inquinante è presente nei componenti primari del sedimento (granuli, particelle argillose e cemento carbonatico) o se derivano della interazione del sedimento con le acque di falda. Nel caso specifico del test site di Copparo sono stati osservati problematiche di contaminazione nelle acque degli acquiferi da cloruri, Cr, Ni, V, As, B, Ba, Al e Fe. Si è cercato di capire quanto di questa contaminazione è da attribuire alla natura dei sedimenti e quanto invece è prodotto dalla risalita delle acque fossili. Inoltre la conoscenza delle natura delle fasi minerali che ospitano i contaminanti consente di comprendere se le variazioni delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque indotte con la ricarica (pH, T, Eh, ossigeno disciolto) possono favorire la solubilizzazione delle fasi minerali che contengono questi metalli rendendoli biodisponibili. Per il progetto WARBO è stato utilizzato Micro-Raman HORIBA Jobin Yvon LabRam HR800 con una sorgente  $632.81\text{nm}$  abbinato al microscopio



ottico Olympus in microraman che consente analisi puntuale e quindi di identificare fasi presenti in percentuale bassissima ma che contenendo i metalli tossico-nocivi. LA mineralogia dei sedimenti viene generalmente determinata con analisi in XRD su campioni polverizzati che non consente di identificare fasi la cui concentrazione nel sedimento è inferiore al 5 %. Gli spettri acquisiti con il microraman confocale hanno consentito di chiarire alcuni dubbi sulla origine dei depositi fluvio-glaciali mettendo per la prima volta in evidenza che i sedimenti che costituiscono l'acquifero A1 nell'area di progetto non derivano esclusivamente dal bacino del Po ma bensì hanno apporti anche dal bacino del fiume Adige. Sono stati infatti rinvenuti numerosi ciottoli di calcare e dolomite associati a porfidi con proporzioni simili ai depositi che caratterizzano gli apporti del Garda. Abbinando le analisi microraman con analisi in EDXRF è stato possibile constatare che il vetro dei ciottoli dei porfidi contiene tracce di arsenico e quindi l'interazione nel tempo di questi ciottoli con le acque di inter poro può liberare questo metallo tossico-nocivo. Quindi l'arsenico deriva oltre che dalle acque fossili metanifere profonde anche dalla interazione delle acque dell'acquifero con i sedimenti. Essendo l'acquifero confinato A1 lontano dalle aree di ricarica le acque intrappolate nei pori hanno lunghi periodi di permanenza e possono quindi arricchirsi nel tempo in Arsenico per lenta interazione con il sedimento, mentre l'introduzione nell'acquifero di acque di buona qualità oltre a migliorarne per diluizione le caratteristiche chimico-fisiche e chimiche dell'acquifero induce un flusso che riduce i tempi di interazione e quindi limita i processi di dissoluzione che sono caratteristici di acque fossili con lunghi tempi di permanenza a contatto con il sedimento. Sempre con l'accoppiamento del microraman con la EDXRF è stato possibile verificare che Cr, Ni, Co, V presenti in alte concentrazioni nelle sabbie dei corpi acquiferi sono associati a spinelli e fasi silicatiche femiche quali pirosseni e anfiboli per cui non sono biodisponibili essendo intrappolati in minerali resistenti all'alterazione e che quindi non tendono a liberare i metalli che li costituiscono, mentre nei livelli argilloso-siltosi contengono il Cr adsorbito nei minerali argillosi del gruppo della clorite smectite, per cui questo elemento può essere rimobilizzato per interazione acqua roccia. Essendo i livelli argillosi poco permeabili la ricarica artificiale non dovrebbe produrre problemi di contaminazione di questo metallo mentre la movimentazione dei sedimenti nei canali per i lavori di manutenzione possono favorire l'esposizione dei sedimenti alle interazioni con le acque e quindi contribuire a diffondere questo metallo nelle acque superficiali. Interessante è stato osservare nelle torbe abbondanza del K non è correlata alla silice che testimonia la presenza di ossidi e di cloruri di potassio nelle torbe. Questa abbondanza di potassio potrebbe derivare dallo sviluppo nei bacini palustri di felce palustre che è una pianta che ha la propensione a intrappolare potassio. Le felci inoltre sono piante che tendono ad assimilare l'arsenico e questo spiega l'arricchimento in arsenico che caratterizza i livelli torbosi. Questi livelli torbosi sono anche ricchi in solfuri di ferro. Fortunatamente essendo i livelli torbosi associati alle argille che sono rocce impermeabili la loro interazione con le acque non inducono problematiche di inquinamento. L'arsenico tende a concentrarsi negli ossidi e idrossidi di ferro (goethite) che caratterizzano i livelli argillosi pedogenizzati. L'unico problema di ha nei sedimenti di facies di piana inondabile (PI) ubicati da -2.00m a piano campagna in quanto interessati dalla aratura e da escavazione. Le analisi in microraman hanno permesso di stabilire che:

- il Ba è strettamente legato alla presenza di idrossidi di manganese derivanti prevalentemente da precipitazione chimica nel bacino di sedimentazione ed è anche presente come barite derivata dalla precipitazione di solfato di bario da acque metanifere fossili ricche in questo metallo;

- Rb e Zr risultano molto concentrati nei livelli ricchi in prodotti vulcanici;



- lo Sr è abbondantemente inglobato nelle fasi carbonatiche - Zn e Ni appaiono, nelle frazioni più grossolane, strettamente legati alla presenza di ossidi e idrossidi di ferro; in quelle più fini lo Zn, ma non il Ni, sembrerebbe correlato all'abbondanza di minerali argillosi,

- la presenza di spinelli testimonia apporti da complessi femici ed ultrafemici ricchi in Cr, Ni, V, Co. Con il microraman è stato possibile verificare che le anomale concentrazioni di Zn e nichel sono associate alla presenza di solfuri, mentre le alte concentrazioni di cromo testimoniano minerali femici quali pirosseni ed anfiboli e anche spinelli a cromite.

Il bario oltre ad essere presente nei carbonati è presente come barite e questo minerale si trova associato alle fratture ricche in solfuri. Le mineralizzazioni a ossidi di ferro (goetite ed ematite) invece sono quelle che presentano anche anomale concentrazioni di arsenico. Quindi si hanno chiare evidenze che in particolari condizioni climatiche e ambientali dalle acque metanifere precipitano fasi minerali ricche in metalli tossicologici che possono essere rimobilizzati con grave impatto sull'ambiente e salute umana. Il microraman ha mostrato come le argille possono adsorbire metalli tossici come As, Ba, Cr, Ni e V che possono essere rilasciati al cambiare del chimismo delle acque da riducenti ad ossidanti. Quindi l'erogazione di acque superficiali ricche in ossigeno deve essere condotta con prudenza in questi sedimenti e il metodo di ricarica mediante bacini di infiltrazione risulta più sicuro rispetto all'iniezione diretta in pozzo.

### c) **Monitoraggio biologico**

Il monitoraggio biologico è applicato sia alla qualità delle acque sia ai sistemi limitrofi gli invasi per avere a disposizione tecniche elastiche e di rapido utilizzo per valutare le condizioni ambientali del territorio.

Per studiare le comunità animali sono state applicate due diverse metodologie: lo studio dei macroinvertebrati acquatici mediante la loro raccolta sul fondo di canali ed invasi grazie alla rete di Surber e la raccolta di artropodi terrestri mediante la trappola di Malaise, con particolare attenzione ai ditteri Sirfidi. La raccolta dei macroinvertebrati acquatici è stata effettuata nel 2012 e nel 2013 a Mereto di Tomba, Ponte Rosso e Copparo e contestualmente alle indagini biologiche è avvenuta l'acquisizione dei parametri fisico-chimici dell'acqua. Le comunità di artropodi terrestri sono state indagate nel 2012-2013 Mereto di Tomba, Ponte Rosso e Copparo e nel 2014, dopo la realizzazione della vasca di fitodepurazione, a Copparo, per avere a disposizione dati prima e dopo la RA. Sui dati degli organismi raccolti con entrambe le metodologie sono stati calcolati i principali indici biotici (Shannon, Pielou e Margaleff) e sono state effettuate correlazioni con i parametri chimico-fisici dell'acqua raccolti grazie ad una sonda multiparametrica.

Per le indagini biologiche sono state usate le seguenti strumentazioni:

- Rete di Surber
- Trappola di Malaise



- Barattoli tipo Kartell, setacci, spruzzette, formalina e glicole polietilenico
- Sonda Multiparametrica

Le indagini sulle comunità di macroinvertebrati acquatici hanno mostrato che:

- A Ponte Rosso la comunità è abbastanza ricca e diversificata e sono presenti alcuni invertebrati bioindicatori di acque pulite, a dimostrazione della buona qualità delle acque .
- A Copparo la comunità non è così ricca, diversificata ed equiripartita probabilmente perché si tratta di un habitat relativamente recente. Sono presenti almeno un paio di specie bioindicatrici la cui presenza e numerosità è però dipendente dalla stagionalità.

Le indagini sugli artropodi terrestri hanno evidenziato:

- Negli anni 2012-2013 una comunità molto più ricca e diversificata a Mereto, seguito da Ponte Rosso mentre a Copparo la qualità ambientale appare abbastanza compromessa, con valori molto ridotti degli indici biotici, probabilmente a causa delle attività di disturbo dovute sia alle attività di cava sia da quelle legate all'agricoltura nell'intorno della Cava.
- Nel 2014, dopo la realizzazione della vasca di fitodepurazione, gli indici biotici mostrano una netta ripresa nella qualità ambientale a Copparo, con la presenza di numerose specie di Ditteri Sirfidi, che non erano stati raccolti negli anni precedenti.

#### **d) Metodologia e monitoraggio geofisico**

Metodi geofisici non invasive specificamente progettati per massimizzare la quantità di informazioni che vengono raccolte e per affrontare correttamente la fase di monitoraggio a breve termine e la fase sperimentale AR. La conoscenza della geometria, della profondità degli strati e della geologia del sottosuolo diventa sempre più importante per la caratterizzazione dei bacini di acqua. Per soddisfare questi requisiti, in anni recenti, è diventato sempre più comune per effettuare studi in cui più di un metodo geofisico viene utilizzato allo stesso tempo, con l'obiettivo di ridurre le incertezze di ciascuna di esse.

Indagini geofisiche permettono il riconoscimento del sottosuolo in una zona particolare, attraverso la misurazione variazioni della superficie in certe grandezze fisiche. Dalle variazioni spaziali e temporali di queste grandezze, la natura, le dimensioni e la profondità delle formazioni geologiche sepolte possono essere ricostruiti. I metodi possono essere utilizzati insieme per una migliore definizione di un particolare scopo di indagine, oppure possono essere utilizzati come alternative. La scelta dipende essenzialmente dalle caratteristiche geologiche e geometriche (distesa, profondità, ecc) del bersaglio. I metodi utilizzati



sono volutamente scelti tra quelli caratterizzati da una tecnologia più matura: la riflessione sismica con onde P ed S, ERT e GPR.

1. Georadar Survey - GPR (Ground Penetrating Radar). Questo metodo è adatto per l'identificazione di discontinuità superficiale nei metri superiori del sottosuolo. Come hanno differenti permittività dielettriche (meglio noto come costante dielettrica, anche se in realtà esso varia da materiale a materiale), i corpi, strati e strutture presenti nel suolo indurre rifrazioni e riflessioni del segnale elettromagnetico trasmesso, consentendo la ricostruzione di un 2D sezione del sottosuolo con indicazioni della geometria delle discontinuità.

2. Resistività elettrica tomografia (ERT) - ERT è un metodo veloce, efficiente ed economico, senza alcun impatto sull'ambiente e una definizione sufficiente per obiettivi fino a 100-150m in profondità. ERT utilizza una sorgente a corrente continua per ottenere il cosiddetto "resistività apparente", che è una funzione della distribuzione della resistività dei diversi materiali presenti nel sottosuolo.

Il modello della distribuzione della resistività fornisce informazioni che è direttamente legata alla porosità efficace delle falde acquifere e alle caratteristiche litologiche dei depositi.

È quindi un metodo primario di scelta per determinare la posizione e la forma delle alternanze in argilla, sabbia e ghiaia nel sottosuolo, e osservare come i valori della resistività del cambiamento falda nel tempo, in relazione al controllo della qualità dell'acqua all'interno.

3. Sismica passiva - sismica 2D metodo-sismica riflessione, la prima più speditiva che sfrutta sorgenti di sollecitazioni naturali o artificiali presenti nel sito di indagine mentre la sismica convenzionale, è un metodo basato sullo studio della propagazione delle onde sismiche prodotte artificialmente tramite vibrazioni, schiaffo martelli, ecc.

Analizzando le dimensioni e tempi di arrivo delle onde riflesse, e dopo l'elaborazione complessa dei dati raccolti, è possibile ottenere un'immagine accurata delle falde acquifere presenti nel sottosuolo. Il metodo 2D sismico ha permesso l'identificazione dei principali formazioni geologiche delle aree oggetto di indagine e per definire l'area del territorio in cui effettuare in seguito la riflessione sismica rilievo 3D.

6. Sismico 3D. Acquisizione sismica 3D utilizza la stessa metodologia riflessione sismica 2D (slap martello, geofoni e registrazione digitale di riflessioni) ma consente uno studio più accurato delle variazioni nelle proprietà del sottosuolo (ad esempio variazioni laterali delle falde acquifere).

Il metodo utilizza molti più sensori, più mezzi di trasporto, più personale, e tempi di esecuzione più lunghi e quindi elevati costi operativi. Questo permette la definizione della stratigrafia e permette la "estensione"



laterale delle misure raccolte nei pozzetti. Il metodo sismico ha i suoi limiti intrinseci in termini di risoluzione verticale (definizione di spessore) che dipende dai parametri di acquisizione di dati e della profondità.





## 1.7 Proposta di un protocollo per la caratterizzazione e monitoraggio degli impianti di ricarica artificiale

Sulla base delle attività sperimentali del progetto WARBO si propone il "protocollo di progettazione indagine, monitoraggio e gestione" che ha lo scopo di indurre azioni per la protezione qualitativa e quantitativa delle risorse idriche, come esplicitamente richiesto dalle direttive comunitarie e fornire gli elementi utili all'impiego della ricarica artificiale in modo da favorirne l'introduzione della metodologia nei piani territoriali della UE. Il progetto si è articolato in più attività parallele una di definizione delle metodologie di indagine e interconfronto fra risultati acquisiti con tecnologie diverse e complementari utile e dare uniformità del metodo e applicabilità a diversi contesti idrogeologici e geochimici, in modo da valutare preventivamente:

- i rischi e la capacità di contrasto della ricarica. Sono stati eseguiti approfondimenti utili a definire le caratteristiche idrogeologiche, petrofisiche (permeabilità) e geochimiche dell'acquifero analisi utili a valutare quali modifiche possono essere indotte per le variazioni dei parametri chimico-fisici soprattutto sulla permeabilità a causa della precipitazione di fasi solubili nei pori (carbonati, solfati, cloruri, ossidi ecc), riduzione del rischio di mobilizzazione di metalli potenzialmente tossico-nocivi attraverso la ricarica artificiale, efficacia della ricarica nel contrastare l'ingressione di acque saline contaminate;
- efficacia della ricarica per l'incremento della biodiversità nell'invaso e nell'ambiente ad esso collegato
- introduzione della metodologia della ricarica artificiale nei progetti in atto di realizzazione delle casse di espansione rese necessarie dalla maggiore ricorrenza di eventi climatici estremi. L'attuazione del protocollo è costituito da una serie di compiti e attività da sviluppare passo-passo secondo la seguenti procedure:
  - *Raccolta e trattamento dei dati esistenti, restituzione dei dati in carte tematiche e integrazione con metodi non invasivi e invasivi delle lacune conoscitive;*
  - *Costruzione del Modello Preliminare di ricarica e progettazione dell'impianto;*
  - *Esecuzione del rilievo batimetrico e campionamento dei sedimenti di fondale acquatico;*
  - *Creazione di carte tematiche di della dinamica di ricarica;*
  - *Inserimento della ricarica nei piani di resilienza ai cambiamenti climatici a scala territoriale ed europea.*