

Vol. 60 – Supplemento 2

Dicembre 2019

Bollettino di Geofisica teorica ed applicata

An International Journal of Earth Sciences

Progetto CLARA

*CLoud plAtform and smart Underground imaging
for natural Risk Assessment*

(Responsabile Scientifico del Progetto F. Castelli)

a cura di R. Caputo



Istituto Nazionale di Oceanografia
e di Geofisica Sperimentale

ISSN 0006-6729

Responsibility for all statements made in B.G.T.A. lies with the authors

Typesetting: Luglioprint, Trieste
Printing: Luglioprint, Trieste

Authorised by the Tribunale di Trieste, n. 242, September 17, 1960
Direttore responsabile: P. Giurco

Il ruolo del Comune di Ferrara

Il Comune di Ferrara ha una superficie di circa 404 km² su un territorio interamente pianeggiante. La città, che ha un patrimonio artistico e architettonico straordinario, si è trovata nel 2012 ad affrontare l'emergenza del terremoto che ha investito il settore occidentale della Provincia con forti risentimenti anche a Ferrara, facendo chiaramente comprendere a chi vive sul territorio quanto sia utile fare prevenzione in maniera costante, prima e oltre il verificarsi dell'emergenza.

A partire dal 2012 il Comune ha deciso di aderire alla proposta del progetto “CLARA” *CLoud plAtform and smart underground imaging for natural Risk Assessment* sottomessa al MIUR dalla *partnership* tra diversi enti di ricerca, grandi aziende e PMI del territorio, nell'ambito del bando “*Smart City e Social Innovation*”.

A seguito delle valutazioni ministeriali, la città di Ferrara era stata selezionata come uno dei tre *test site* assieme a Matera ed Enna. In particolare, a Ferrara si voleva studiare la vulnerabilità e la pericolosità sismica del suo territorio. Il progetto CLARA è stato caratterizzato da attività innovative nei settori della sicurezza del territorio e dell'ICT e ha indagato in profondità – sino a circa 2 km – le caratteristiche geologiche del territorio. Il progetto prevedeva tre casi di studio per sperimentare e promuovere l'utilizzo di un sistema innovativo integrato per la gestione dei rischi naturali in ambiente urbano e periurbano. Cambiamenti climatici e progressiva antropizzazione del suolo, infatti, hanno reso le nostre città sempre più vulnerabili alle calamità naturali e CLARA si proponeva di sperimentare nuove tecnologie osservative (*in-situ* e remote) ed ICT per il rafforzamento delle capacità sociali per affrontare i rischi naturali in ambiente urbano.

A Ferrara sono state allestite diverse attività di sperimentazione in ambiente urbano e focalizzate ad una miglior valutazione del rischio sismico con il fine ultimo di contribuire a mitigare gli effetti del fenomeno. Sono state effettuate misure sia in campo aperto, sia in edifici. Alcuni gruppi di ricerca hanno previsto il coinvolgimento dei cittadini come osservatori e comunicatori di segnali di rischio, mediante interviste singole o multiple nelle scuole per analizzare la consapevolezza nel valutare correttamente i rischi ambientali, oltre che il grado di fiducia che i cittadini stessi ripongono nei confronti delle istituzioni preposte alla gestione delle emergenze. L'interesse per il modello CLARA e l'importanza per i suoi risultati risiedono nella possibilità di essere adottati e applicati in altre situazioni di rischio, in Italia e all'estero, per fornire agli amministratori pubblici e ai tecnici gli strumenti per una migliore programmazione dello sviluppo territoriale basata su dati scientificamente fondati. Anche per questa ragione, ho accolto con piacere l'invito a presentare la pubblicazione di questo volume che contiene, fra l'altro, i primi risultati delle sperimentazioni effettuate nei tre *test site* ed in particolare nella città di Ferrara, e che verrà distribuito in occasione del convegno “Ferrara e il rischio sismico: dall'analisi della pericolosità alla consapevolezza dei cittadini ed alla prevenzione”, organizzato dall'Università di Ferrara presso il Polo Scientifico-Tecnologico.

Alan Fabbri

Sindaco della Città di Ferrara

Il ruolo della Città di Matera

Il Comune di Matera ha partecipato al progetto CLARA del MIUR sin dalla fase iniziale di progettazione sostenendo, in sinergia con il Comune di Ferrara e la Provincia di Enna, la creazione di una forte e qualificata *partnership* pubblico-privata e stimolando un utilizzo di nuove tecnologie osservative per lo studio del sottosuolo in ambito urbano. Il progetto ha infatti previsto la realizzazione di tomografie sismiche ed elettromagnetiche ad alta risoluzione in alcune aree del centro storico dei Sassi di Matera e di indagini sismiche passive nel centro urbano della città con l'installazione di sensori per la misura del rumore sismico ambientale, sia al suolo che in edifici civili di interesse strategico.

Il sottosuolo urbano di Matera ed il suo patrimonio storico ed architettonico rappresentano uno dei più straordinari *Living Labs* dove sperimentare le più moderne tecnologie per l'esplorazione geofisica del sottosuolo e sistemi ICT per la gestione di reti e sensori per la misura di parametri geo-ambientali.

L'Amministrazione Comunale di Matera ha collaborato con le università, i centri di ricerca e le aziende partecipanti al progetto non solo individuando le aree di interesse, ma anche fornendo un ampio spettro di informazioni e dati cartografici, geologici e geotecnici. Il Comune di Matera da anni sta infatti promuovendo azioni strategiche per una migliore gestione del territorio e la messa in sicurezza di zone interessate da fenomeni di micro-subsidenza e/o cedimenti dovuti alla presenza di cavità ed ipogei. Inoltre, la Città di Matera è anche oggetto di una sperimentazione della tecnologia 5G che aprirà nuovi scenari per l'utilizzo di sensori di nuova generazione per rendere la città più *smart* e resiliente ai rischi naturali ed ambientali.

I risultati scientifici del progetto CLARA contenuti in questo volume rappresentano pertanto un importante contributo per migliorare la definizione del rischio sismico e idrogeologico in ambito urbano. Le diverse presentazioni dei risultati su riviste scientifiche ed in prestigiose conferenze nazionali ed internazionali (es. Congresso della Società Geologica Italiana, Workshop della Society of Exploration Geophysics "*Geophysics for Smart Cities Development*" tenutosi di recente a Pechino, la sessione "*Urban Geophysics*" alla conferenza dell'American Geophysical Union che si terrà il prossimo mese di dicembre a San Francisco, nonché il Convegno che si terrà presso l'Università di Ferrara a fine novembre) rappresentano esse stesse strumenti di promozione, sia scientifica che culturale, per le attività svolte nell'area urbana della Città di Matera. Va infine sottolineato che il progetto CLARA ha adottato il modello dei *Living Labs*, ovvero la realizzazione di esperimenti in aree urbane proprio al fine di favorire la collaborazione e la partecipazione attiva di ricercatori, amministratori, imprenditori, professionisti, tecnici, cittadini, studenti e tutti i possibili portatori di interesse.

Raffaello De Ruggieri
Sindaco della Città di Matera

Il ruolo della Provincia di Enna

La Provincia Regionale di Enna, oggi Libero Consorzio dei Comuni di Enna, già in fase di presentazione della proposta ha aderito al Progetto CLARA, ritenendo l'iniziativa di interesse oltre che di grande utilità per il territorio provinciale. Infatti, tutta l'area della provincia di Enna è soggetta ad emergenze, che negli ultimi anni hanno interessato numerosi centri abitati e gran parte della viabilità provinciale, causando notevoli disagi e pericoli per la popolazione.

Le amministrazioni provinciali hanno come obiettivo prioritario la predisposizione di modalità operative ed organizzative finalizzate al mantenimento dell'ambiente e del territorio e conseguentemente, alla sicurezza e al permanere della qualità della vita dei cittadini, anche in relazione alla prevenzione di situazioni impreviste e/o calamitose.

In questo contesto, ricadono tra i compiti istituzionali delle amministrazioni provinciali la predisposizione dei piani di emergenza, l'attuazione delle attività di previsione e gli interventi di riduzione dei rischi stabiliti dai programmi nazionali e regionali, l'adozione dei provvedimenti amministrativi e la vigilanza sulla predisposizione da parte delle strutture protezione civile delle misure urgenti, anche di natura tecnica, da attivare nel caso di eventi calamitosi.

Per queste ragioni il Progetto CLARA, finalizzato all'acquisizione di una maggiore conoscenza sulle problematiche dei fenomeni di dissesto idrogeologico e di rischio naturale che possono interessare i centri abitati, la promozione di strategie di protezione territoriale con il presupposto di uno sviluppo sostenibile della collettività, nonché per il trasferimento alle pubbliche amministrazioni delle *best practice* culturali e tecnologiche individuate per la valutazione e gestione delle situazioni di rischio, è stato considerato una proficua opportunità di collaborazione.

Con queste finalità, anche nello specifico ambito del Progetto CLARA, sono state sviluppate con la Facoltà di Ingegneria e Architettura dell'Università di Enna "Kore" numerose attività di ricerca e studio nel settore della prevenzione dei fenomeni di dissesto idrogeologico e di rischio naturale che possono interessare i centri abitati, le strutture ed infrastrutture strategiche, le vie di comunicazione.

L'intento è stato quello di implementare modelli per la valutazione della pericolosità e la mitigazione del rischio, sviluppare congiuntamente attività di sperimentazione in aree campione rappresentative delle situazioni di dissesto, ricevere un supporto per la individuazione delle direttive riguardanti i piani di protezione civile e/o le strategie di intervento da attuare.

Per la Pubblica Amministrazione la partecipazione a progetti di ricerca come CLARA deve essere considerata un vero e proprio processo di innovazione. Oggi infatti le pubbliche amministrazioni devono essere intese come insieme di servizi offerti al cittadino che si devono basare sull'impiego delle più moderne tecnologie. Di contro queste ultime devono rappresentare un vantaggio e contemporaneamente un'opportunità per i soggetti pubblici che erogano servizi alla collettività.

Giuseppe Colajanni

già Dirigente Tecnico della Provincia Regionale di Enna

Il progetto CLARA: *Cloud plAtform and smart Underground imaging for natural Risk Assessment*

F. CASTELLI¹, C. CORNACCHIA², R. GUELI³, V. LAPENNA² e R. CAPUTO⁴

¹ Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università "Kore", Enna

² Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, CNR, Tito Scalo (PZ)

³ ETNA Hitech S.C.p.A., Catania

⁴ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

La sfida scientifica e tecnologica del progetto "CLARA" consiste nello sviluppare, in ottica *Smart Cities*, prodotti e servizi innovativi per la mitigazione del rischio sismico ed idrogeologico in aree urbane e semi-urbane attraverso il coinvolgimento attivo delle Pubbliche Amministrazioni (PPAA) (approccio *service oriented*).

Le tematiche della sostenibilità ambientale e della sicurezza in ambito urbano sono coerenti con gli obiettivi dell'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile (SDGs) dell'Organizzazione delle Nazioni Unite e sono presenti nelle *Societal Challenges* del programma H2020 dell'Unione Europea, rappresentando priorità strategiche in numerose iniziative in ambito internazionale^(1,2,3).

L'ambito urbano, a cui il progetto si rivolge, sta aumentando rapidamente, in quanto oggi siamo in presenza di una accelerazione del fenomeno di urbanizzazione a livello globale: si stima che nel 2050 circa il 66% della popolazione mondiale risiederà nelle città. In Europa, già a partire dal 2020 circa, l'80% della popolazione sarà localizzata in aree urbane. L'Italia si caratterizza per un numero elevato di città di medie dimensioni (50.000-200.000 abitanti) e centri storici di inestimabile valore storico ed architettonico fortemente esposte ad eventi catastrofici (es. terremoti, frane, eruzioni vulcaniche, ecc.) ed eventi climatici estremi (Fig. 1). Pertanto, con l'aumento dell'urbanizzazione si ha un significativo aumento della domanda di *smart technologies* per la gestione di interventi inerenti la sicurezza del territorio nelle aree urbane^(4,5) che CLARA vuole soddisfare.

In Europa ed in Italia vi sono già esempi di buone prassi nell'adozione di *smart technologies* per migliorare la sostenibilità ambientale, la mobilità e la sicurezza dei cittadini⁽⁶⁾. Sulla base del *Global Cities Index 2017*, tra le città europee più innovative si possono annoverare Vienna, Amsterdam, Amburgo, Copenaghen, Barcellona⁽⁷⁾. In queste aree urbane, le amministrazioni

⁽¹⁾ The 2030 Agenda for Sustainable Development and its 17 Sustainable Development Goals (SDGs) adopted by United Nations (Sept. 2015).

⁽²⁾ United Nations Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris Agreement. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. (2015).

⁽³⁾ United Nations International Strategy for Disaster Reduction. Sendai framework for disaster risk reduction 2015–2030.

⁽⁴⁾ IGBP First Synthesis, *Global Change and the Earth System: a planet under pressure*. Springer, (2004).

⁽⁵⁾ United Nations – Department of Economic and Social Affairs. *Urbanization Prospects: The 2014 Revision* (2014).

⁽⁶⁾ Report In Cities in Europe, PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.

⁽⁷⁾ The Urban Agenda for the UE. https://ec.europa.eu/regional_policy/en/policy/themes/urban-development/agenda/

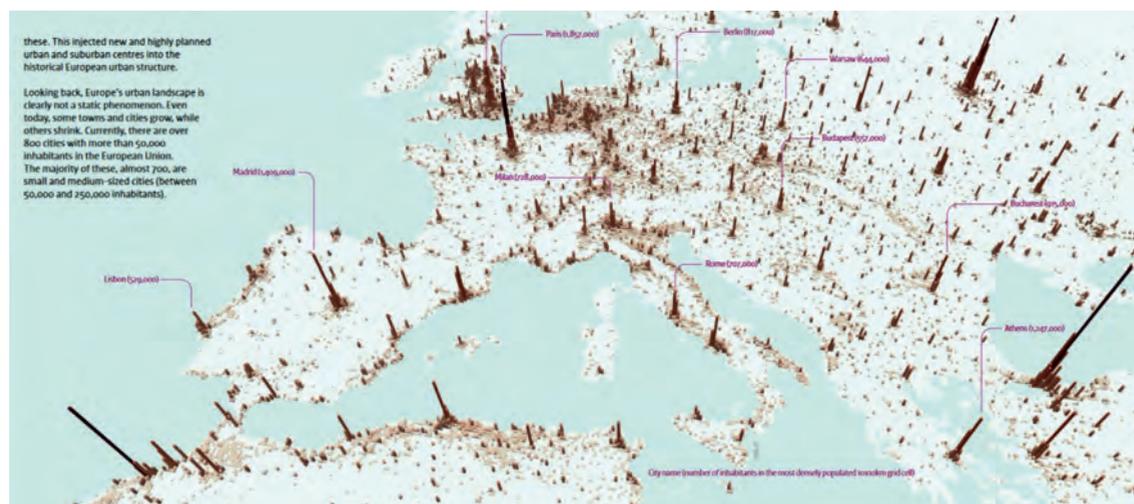


Fig. 1 - Rappresentazione dell'European Urban Landscape (Rapporto della Netherlands Environmental Assessment Agency).

hanno da tempo avviato strategie per l'introduzione e la diffusione pervasiva di tecnologie digitali (es. *smart sensors*, IoT, *cloud computing*), trasformando le città in laboratori *open source*, stimolando la creatività scientifica e l'innovazione tecnologica.

In piena coerenza con le iniziative già in atto a livello internazionale, il progetto CLARA si pone come obiettivo strategico di sviluppare e sperimentare soluzioni innovative per la gestione della sicurezza del territorio in aree test di particolare interesse, ricadenti nei territori del Comune di Ferrara, del Comune di Matera e della Provincia di Enna mediante una *partnership* pubblico-privato. Le aree di studio sono state individuate attraverso un dialogo con le PPAA avviato già nella fase di candidatura della proposta. La sperimentazione sarà effettuata adottando il modello dei *Living Labs*, ovvero mediante la realizzazione di esperimenti in aree urbane che hanno il pregio di favorire la partecipazione di ricercatori, amministratori, imprenditori, professionisti, tecnici, cittadini, studenti e tutti i vari portatori di interesse.

2. Metodi e tecnologie abilitanti

Il Progetto CLARA risponde a questa crescente domanda di servizi per la gestione della sicurezza del territorio nelle aree urbane (Fig. 2), integrando le più moderne tecnologie abilitanti (es. tomografia elettromagnetica 3D, sensoristica in fibra ottica, sciame di droni) per la caratterizzazione geologico-geofisica del sottosuolo, il monitoraggio delle infrastrutture civili di interesse strategico e di centri storici di particolare interesse storico ed architettonico (Fig. 3). Inoltre, CLARA adotta architetture ICT per la realizzazione di una piattaforma aperta, scalabile ed interoperabile per la condivisione, la visualizzazione e la gestione dei dati geospaziali (in accordo con quanto previsto dai più recenti programmi di *Digital Earth*) (Showstack, 2014; Bobylev e Sterling, 2016; Lapenna, 2017).

Il progetto CLARA intende contribuire allo sviluppo di una nuova generazione di sistemi per la gestione dei rischi naturali in ambiente urbano e periurbano basato sui seguenti paradigmi:

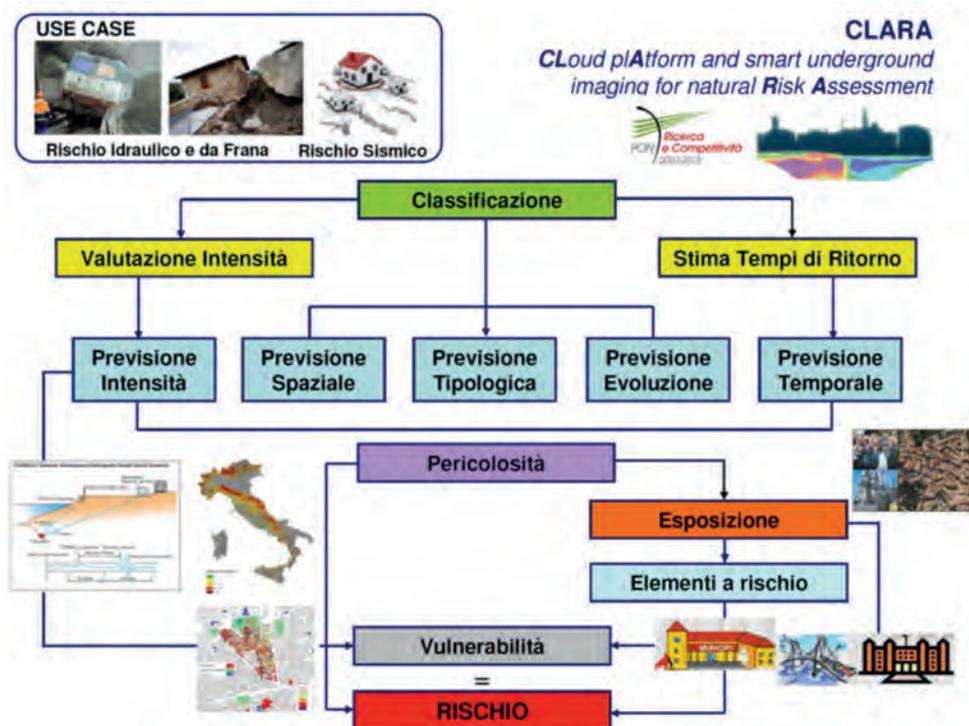


Fig. 2 - Struttura delle attività ed approccio adottato dal progetto CLARA.

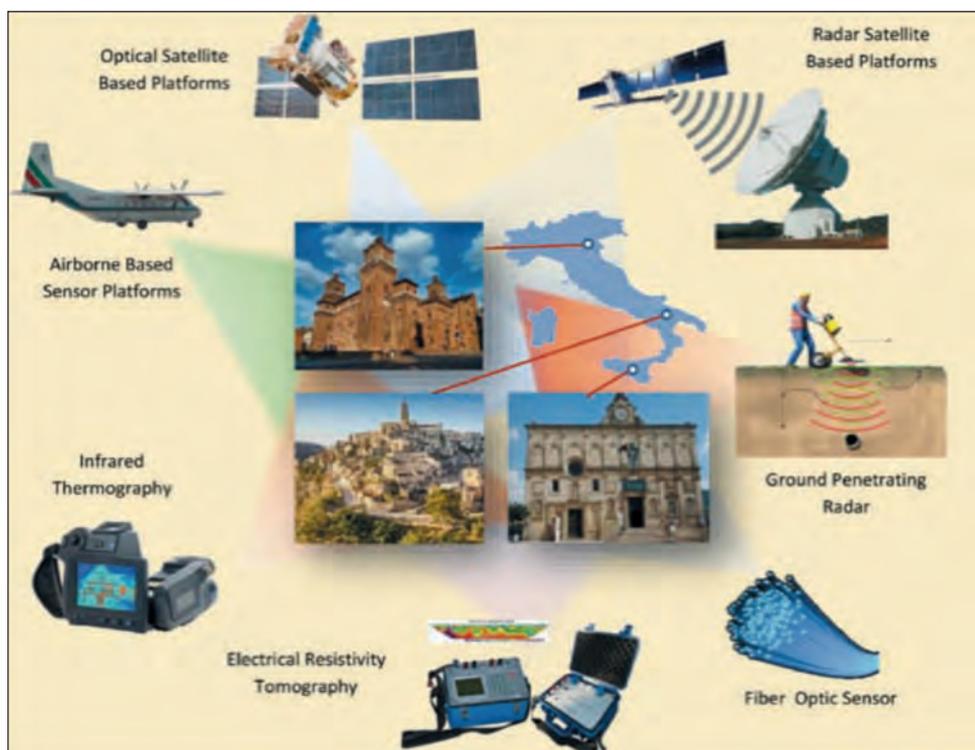


Fig. 3 - Schema semplificato dell'approccio adottato dal progetto CLARA che si basa sull'integrazione di un ampio spettro di metodologie osservative e sensoristica avanzata per il monitoraggio delle aree urbane.

- **integrazione semantica di modelli di simulazione dei fenomeni di interesse.** La maggiore barriera all'applicazione di soluzioni per l'interoperabilità e l'orchestrazione di applicazioni complesse è l'interpretazione semantica del loro dominio di validità e dei loro risultati. CLARA propone l'utilizzo di mappe concettuali e modelli semantici per garantire il corretto utilizzo di componenti di elaborazione dipendenti dal contesto applicativo nell'ambito di sistemi di decisione automatica;
- **reti di sensori distribuite e dense.** Il progetto CLARA al fine di migliorare la risoluzione spaziale delle reti di sensori attualmente disponibili propone lo studio di strumenti per l'integrazione, l'armonizzazione e la fusione di osservazioni (*Sensor synergy*) condotte a diversa risoluzione sul suolo e sottosuolo urbano e periurbano realizzando, in un'unica architettura, un sistema di reti *wireless, smart-dust* di nodi sensoriali multi-parametrici a basso costo e sensori su droni, integrati a sistemi di ricognizione tomografica 2D e 3D del sottosuolo operanti a diverse profondità;
- **reti di sensori umani.** Al fine di migliorare ulteriormente la risoluzione e l'affidabilità delle osservazioni nei tipici scenari di crisi che si realizzano soprattutto in ambiente urbano, CLARA propone l'approfondimento sistemico del ruolo attivo della popolazione coinvolta nell'evento, studiando strumenti che consentano l'acquisizione, la validazione, la catalogazione e l'elaborazione delle osservazioni effettuate dalle singole persone al fine di ricostruire lo scenario di crisi. Il tema viene approfondito, sia sotto l'aspetto socio-cognitivo sia sotto l'aspetto strumentale, per risolvere le barriere tecnologiche all'integrazione, connettività ed interoperabilità delle reti di sensori umani;
- **sistemi di decisione specifici ed adattivi.** CLARA propone lo studio di un *framework* a base semantica per la prototipizzazione rapida di sistemi di supporto alle decisioni verticalizzati e basati sull'orchestrazione di servizi base esistenti (SCADA, GIS, modelli di simulazione, DSS stessi). basandosi sulla disponibilità di architetture *Cloud*;
- **sistemi di comunicazione informativa e partecipativa.** Il progetto affronta il problema del coinvolgimento attivo e partecipativo delle popolazioni colpite da un evento naturale estremo. In particolare, CLARA propone l'approfondimento dei meccanismi socio-cognitivi che sono alla base dell'interazione tra uomo e ambiente e come l'informazione possa indurre comportamenti reattivi corretti. Sulla base di questo studio verranno studiate piattaforme tecnologiche informative e partecipative attraverso le quali effettuare la condivisione bidirezionale degli scenari di crisi.

In sintesi, il progetto CLARA combina questi aspetti in un approccio olistico integrato, fornendo un sistema per la realizzazione di soluzioni dedicate alla sicurezza del territorio, che sono pienamente utilizzabili ed ottenute massimizzando i concetti di integrazione, connettività ed interoperabilità tra dispositivi *hardware*, componenti *software* e utilizzatori finali.

3. La *partnership* pubblico-privata ed obiettivi realizzativi

Il progetto CLARA è stato approvato dal MIUR nell'ambito di un Bando Nazionale sul tema "*Smart Cities and Communities and Social Innovation*" (D.D. n.1913 del 07.08.2015) ed è previsto un finanziamento complessivo di circa 12 Meuro. Il progetto sarà completato entro il 31 dicembre 2019.

Il *team* proponente è basato su una forte aggregazione tra sistema pubblico e privato ed un coinvolgimento attivo delle PPAA. Nella *partnership* vi sono università e centri di ricerca con competenze consolidate nella modellistica geologica, idrogeologica e geofisica, scienze cognitive, nello sviluppo di strumenti ICT innovativi (es. *cloud computing*) e tecnologie osservative, sia *in situ* che in *remote sensing*.

Nella compagine industriale sono presenti tutte le competenze e le professionalità necessarie per sviluppare prodotti operativi per le PPAA nel settore della mitigazione dei rischi naturali: dall'ingegneria civile allo sviluppo di sensoristica avanzata, dallo sviluppo di piattaforme ICT alla implementazione di codici per l'integrazione di dati geospaziali eterogenei.

La componente pubblica è costituita dall'Università degli Studi di Enna "KORE", l'Università di Catania, l'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale di Trieste con sub-contraente l'Università di Ferrara e tre istituti del CNR (IMAA, IREA, ISTC) con sub-contraente l'Università "La Sapienza" di Roma. La componente industriale è costituita da Etna Hitech, dal Consorzio Iter, Meridionali Impianti, Sidercem, Sinergis s.r.l.⁽⁸⁾, Geostudi Astier s.r.l., Geosystems s.r.l., HERA s.p.a., IDS s.p.a., Ingegnerie Toscane s.r.l., Rotas Italia s.r.l., Tecno IN s.p.a. e Consorzio TeRN.

Al fine di conseguire i risultati attesi e gestire al meglio la collaborazione tra i numerosi *partner* di progetto, le attività sono state articolate in 8 Obiettivi Realizzativi:

OR1 - Studio, definizione ed implementazione di modelli per la valutazione della pericolosità e la mitigazione dei rischi naturali in aree urbane (resp. Francesco Castelli);

OR2 - Fiducia, percezione del rischio e partecipazione attiva nel monitoraggio e nella prevenzione dei rischi naturali: modelli e simulazioni (resp. Rino Falcone);

OR3 - Sviluppo ed integrazione di metodi innovativi per la tomografia 2D e 3D del sottosuolo in aree urbane (resp. Vincenzo Lapenna);

OR4 - Sviluppo ed integrazione di tecniche diagnostiche non invasive per la caratterizzazione strutturale di edifici/infrastrutture in aree ad elevato rischio naturale (resp. Stefano Parolai);

OR5 - Implementazione di sistemi tecnologici innovativi per l'acquisizione e la trasmissione di dati multi-parametrici per il monitoraggio del sottosuolo e delle strutture/infrastrutture (resp. Corrado Santoro);

OR6 - Sistemi informativi *Cloud Open* per gli Enti Territoriali per la difesa del suolo, la gestione dell'allerta e dell'emergenza (resp. Roberto Gueli);

OR7 - Sviluppo di *Smart Application* a supporto dell'implementazione di modelli sociali di *Risk Governance* (resp. Roberto Gueli);

OR8 - *Living Labs* per la sperimentazione dei risultati nella Pubblica Amministrazione (resp. Francesco Castelli e Vincenzo Lapenna).

4. La collaborazione con la Pubblica Amministrazione: il ruolo dei *Living Labs*

Un elemento fortemente caratterizzante il progetto CLARA è il coinvolgimento attivo delle PPAA. Uno dei principali obiettivi consiste, infatti, nel promuovere azioni di sensibilizzazione delle PPAA sulle condizioni di rischio idrogeologico e sismico di ciascun territorio e sulle

⁽⁸⁾ acquisita da Dedagroup s.p.a. durante il progetto CLARA.

possibili misure di mitigazione. CLARA partendo dall'analisi della pericolosità nelle aree urbane interessate, giunge alla stima dei livelli di pericolosità fino a trasferire alle PPAA coinvolte le *best practices* culturali e tecnologiche per la valutazione di tali rischi. In particolare, si intende contribuire alla realizzazione di strumenti specifici utili alle politiche di pianificazione urbanistica sostenibile in relazione agli eventi sismici e di frana, contribuendo alle attività di pianificazione, mitigazione e prevenzione degli effetti connessi ad eventi calamitosi.

Nel progetto sono state coinvolte la Provincia di Enna, il Comune di Ferrara ed il Comune di Matera con centri storici di inestimabile valore, con un'enorme tradizione culturale ed una forte vocazione turistica. Le amministrazioni hanno espresso mediante delibere ufficiali la loro partecipazione in qualità di *stakeholders* ed hanno contribuito sin dalla fase iniziale alla definizione di obiettivi e risultati attesi. Le PPAA hanno quindi individuato e sottoposto con chiarezza al *team* di progetto le loro principali esigenze per la gestione della sicurezza del territorio, con particolare attenzione alle problematiche connesse con il rischio sismico ed idrogeologico.

Le aree di studio sono ubicate in ambienti geografici, geomorfologici e geologici che le rendono particolarmente esposte a rischi naturali (terremoti, frane, alluvioni) e che richiedono una maggiore ed accurata conoscenza delle problematiche connesse a queste tipologie di dissesto.

Il territorio della **Provincia di Enna** a causa del suo complesso assetto morfologico, geologico e tettonico, è caratterizzato da diverse tipologie di fenomeni di instabilità quali frane, alluvioni e terremoti. In conseguenza dell'abbandono progressivo delle zone montane, della mancanza di manutenzione dei versanti e delle opere idrauliche, nonché della frequente inadeguatezza delle opere infrastrutturali, gli eventi connessi al rischio idrogeologico sono, insieme ai terremoti, quelli che hanno provocato in passato i danni maggiori (Castelli, 2017). Negli ultimi anni è stata avviata una forte collaborazione tra sistema della ricerca (Università di Enna "Kore" ed Università di Catania) e la Protezione Civile Regionale, che ha consentito di sviluppare ed applicare metodologie innovative per la mitigazione del rischio idrogeologico con particolare attenzione alle infrastrutture di trasporto.

La **Città di Ferrara** si caratterizza per un tessuto urbano di assoluto pregio storico ed architettonico (la città è Patrimonio dell'Umanità UNESCO). I recenti eventi sismici in Emilia-Romagna hanno evidenziato la pericolosità sismica del territorio ferrarese che è stato inserito in zona 3 della carta del rischio sismico. L'amministrazione comunale di Ferrara è da tempo molto attiva nell'introduzione di tecnologie ICT per la gestione sostenibile dell'ambiente e della sicurezza del territorio e la salvaguardia del proprio inestimabile patrimonio culturale. Inoltre, nella periferia urbana ha sede il polo chimico di Ferrara, che conta numerose aziende chimiche, ed un campo geotermico a bassa entalpia. L'obiettivo specifico di CLARA per Ferrara è l'applicazione di metodi geologici e geofisici innovativi per la caratterizzazione geofisica del sottosuolo urbano e la valutazione di effetti di amplificazione sismica.

La **Città di Matera** con il centro Storico dei Sassi di Matera, sito riconosciuto patrimonio dell'umanità dall'UNESCO, è probabilmente il più straordinario esempio di "città sotterranea". Matera è una città antichissima e la sua origine si perde nella preistoria. Per il substrato abitativo consistente in grotte scavate nell'ammasso tufaceo, essa è nota come la città sotterranea. Inoltre, per la continuità di vita dal paleolitico ai giorni nostri è ritenuta una delle città più antiche del mondo. Il sottosuolo della città di Matera è caratterizzato da un complesso ed articolato sistema di cavità ipogee che hanno generato in alcuni casi fenomeni di instabilità e danni al patrimonio architettonico. Pertanto, il progetto CLARA risponde all'esigenza di una maggiore conoscenza

del sottosuolo della città, sia per individuare interventi ottimali di mitigazione del rischio idrogeologico e sismico, sia per una maggiore valorizzazione turistica delle risorse del sottosuolo. Nel 2019 Matera è la capitale europea della cultura ed è anche una delle sedi individuate dal Ministero dello Sviluppo Economico per la sperimentazione della tecnologia 5G.

Il progetto intende sfruttare a pieno lo strumento dei *Living Labs* per stimolare la domanda di applicazioni e servizi innovativi, per facilitare la creazione di efficienti ecosistemi d'innovazione che sviluppino servizi e applicazioni utilizzando le informazioni generate dagli utenti (ad esempio, attraverso i *social network*) o catturate attraverso sensori (IoT). Le PPAA coinvolte nel progetto saranno i primi acquirenti (*first adopter*) di servizi di ricerca, sviluppo e prototipazione mirati a soddisfare bisogni pubblici chiaramente identificati e saranno realizzati dei *Living Labs* in aree pilota per sperimentare su campo, e con il pieno coinvolgimento degli utilizzatori finali, i prodotti ed i servizi sviluppati. Uno specifico percorso di valutazione partecipata che coinvolga testimoni privilegiati consentirà alla PPAA, ovvero ai diretti interessati, di valutare l'utilizzo dei servizi, prodotti e modelli sviluppati nell'ambito del progetto CLARA.

Un primo esempio di *Living Lab* è stato realizzato nella città di Matera mediante l'esecuzione di tomografie geoelettriche ed elettromagnetiche in alcune aree del centro storico (piazza Duomo, piazza San Giovanni), di misure sismiche passive per lo studio di fenomeni di amplificazione sismica locale e di risonanza suolo-edifici e *test* per l'utilizzo di fibre ottiche per il monitoraggio di edifici di interesse strategico. Le indagini sono state effettuate mediante il coinvolgimento attivo della PPAA e dei cittadini. Nella fase finale del progetto saranno realizzati altri *Living Labs* nelle aree di studio. I risultati del progetto CLARA saranno resi disponibili alle PPAA ed ai cittadini mediante *web-GIS* ed architetture ICT per *Open Data*.

Un secondo esempio di *Living Lab* è in programmazione nella città di Ferrara il giorno 23 novembre; tale evento si terrà presso le aule ed il campus del Polo Scientifico Tecnologico dell'Università di Ferrara e sarà l'occasione per presentare i principali risultati metodologici ottenuti durante il progetto e/o l'impatto che questi potranno avere per la città ed il suo territorio. Il programma prevede una serie di brevi esperimenti e presentazioni della durata di 20-25 minuti ognuno, ripetuti più volte nella giornata al fine di dare la possibilità a tutti gli intervenuti, organizzati in gruppi, di partecipare dal vivo alle diverse attività. In particolare, sono previsti: a) un laboratorio per l'esplorazione geofisica del sottosuolo con l'acquisizione in diretta di un profilo di sismica a riflessione, b) prove su campo ed acquisizione dal vivo di profili geoelettrici ad alta risoluzione per esplorare il sottosuolo urbano, c) applicazioni della tecnica del georadar per la diagnostica dello stato interno delle strutture, d) modellazioni analogiche per spiegare l'interazione tra onde sismiche ed edifici e la loro influenza reciproca, e) dimostrazioni pratiche con l'utilizzo di strumenti topografici ad alta precisione per il monitoraggio delle strutture e del territorio.

L'esperienza dei *Living Labs* nell'area della città di Enna ha come obiettivo la promozione delle azioni di sensibilizzazione nelle PPAA che si sono rese disponibili alla sperimentazione, sulle condizioni di rischio idrogeologico e sismico e sulle relative misure di mitigazione. Con tale finalità, il progetto ha inteso fornire un contributo all'analisi della pericolosità nell'area urbana della città, trasferendo le *best practices* culturali e tecnologiche per la valutazione di tali rischi, contribuendo alle attività di pianificazione, mitigazione e prevenzione degli effetti connessi ad eventi calamitosi, sperimentando sul campo e con il coinvolgimento degli utilizzatori finali, i prodotti ed i servizi sviluppati.

La sperimentazione ha principalmente interessato il territorio della città di Enna, in collaborazione con il Dipartimento Regionale della Protezione Civile e la Provincia Regionale di Enna, oggi Libero Consorzio Comunale di Enna. Le attività “in campo” sono state orientate a sperimentare diversi scenari applicativi nell’ambito della gestione delle emergenze, nonché ad individuare e testare tecnologie innovative per la acquisizione e l’elaborazione dei dati di base e per il monitoraggio di fenomeni di dissesto potenziali e/o in atto.

5. Conclusioni

Il progetto CLARA rappresenta un volano per lo sviluppo, l’applicazione ed il trasferimento di servizi e prodotti innovativi alla PPAA per la gestione della sicurezza del territorio in ambito urbano. Le sfide scientifiche e tecnologiche sono affrontate mediante l’integrazione delle più innovative metodologie geologiche e geofisiche, architetture ICT per la gestione di dati geospaziali, *cloud computing* e sensoristica avanzata. Oltre all’aspetto scientifico, un elemento fortemente caratterizzante il progetto è rappresentato dall’implementazione di un rapporto innovativo tra sistema della ricerca, sistema industriale, Pubblica Amministrazione e cittadini in piena coerenza con le strategie della *Quadruple Helix Model for Innovation* promossa a livello internazionale e, in via sperimentale, a livello nazionale dal MIUR nell’ambito di bandi sul tema *Smart Cities* (Salvia et al., 2016).

Pur non essendo ancora completato, il progetto CLARA ha già conseguito risultati di grande interesse applicativo per le PPAA che sono stati già oggetto di pubblicazioni su riviste internazionali (Lentini et al., 2018) presentazioni nell’ambito di convegni nazionali ed internazionali, tra i quali un *workshop* organizzato recentemente dalla Society of Exploration Geophysics a Pechino in Cina sul tema *Geophysics for Smart Cities Development* (Lapenna, 2019).

Molti fra i principali risultati del progetto CLARA sono contenuti all’interno di questo volume.

BIBLIOGRAFIA

- Bobylev, N., Sterling, R., *Urban underground space: A growing imperative Perspectives and current research in planning and design for underground space use*. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 55, pp. 1-4 (2016).
- Castelli F. *Aspetti geotecnici nella valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto*. Relazione Generale XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica “La Geotecnica nella Conservazione e Tutela del Patrimonio Costruito”. Sessione 2: Infrastrutture di Trasporto. Roma 20-22 Giugno 2017, AGI Ed., 55-113.
- Lapenna V., *Resilient and sustainable cities of tomorrow: the role of applied geophysics*. BGTA, Vol.58, 237-251, (2017).
- Lapenna V. (on behalf of the CLARA Team Project), *CLoud plAtform and smart underground imaging for natural Risk Assessment in urban areas: the Clara project*. SEG Workshop on Geophysics for smart cities developments. (2019). <https://seg.org/events/smartcitychina>
- Lentini V., Distefano G., Castelli F. *Consequence analyses induced by landslides along transport infrastructures in the Enna area (South Italy)*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 1-16, ISSN 1435-9529, doi.org/10.1007/s10064-018-1390-7 (2018).
- Salvia, M., Cornacchia, C., Di Renzo, G.C., Braccio, G., Annunziato, M., Colangelo, A., Orifici, L., Lapenna V. *Promoting smartness among local areas in a Southern Italian region: The Smart Basilicata Project*. Indoor & Built Env., Vol.25, 1024-1038, (2016).
- Showstack R., *Scientists Call for a Renewed Emphasis on Urban Geology*. EOS Earth & Space Science News, (2014).

Partecipanti al Progetto CLARA

Enti di ricerca

- **Università degli Studi di Enna “Kore”**, Cittadella universitaria - Enna
Facoltà di Ingegneria e Architettura, via delle Olimpiadi 4, Cittadella Universitaria, 94100 Enna
- **Consiglio Nazionale delle Ricerche**, piazzale Aldo Moro 7 - Roma
IMAA, Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, C.da S. Loja, CNR Area di Ricerca di Potenza, 85050 Tito Scalo (PZ)
ISTC, Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione, via S. Martino della Battaglia 44, 00185 Roma
IREA, Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell’Ambiente, via Diocleziano 328, 80124 Napoli
- **Università degli Studi di Catania**, piazza Università 2 - Catania
Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, viale Andrea Doria 6, 95125 Catania
Dipartimento di Matematica e Informatica, viale Andrea Doria 6, 95125 Catania
- **OGS Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale** - Sgonico (TS), borgo Grotta Gigante n.42/c
- **Università degli Studi di Ferrara**, via Ariosto 35 - Ferrara
Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, via Saragat 1, 44122 Ferrara
Dipartimento di Ingegneria, via Saragat 1, 44122 Ferrara
Dipartimento di Architettura, via Quartieri 8, 44121 Ferrara
- **Università degli Studi di Roma “La Sapienza”**, piazzale Aldo Moro - Roma
Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale, via Eudossiana 18, 00184 Roma

Aziende

- Consorzio ITER, C.da Targia 58 - Siracusa
- Consorzio TeRN, C.da S. Loja s/n - Tito (PZ)
- Dedagroup S.p.A., via loc. Palazzine 120/f - Trento

- Etna Hitech S.C.p.A., viale Africa 31 - Catania
- IDS Ingegneria dei Sistemi S.p.A., via Enrica Calabresi 24 - Pisa
- Geostudi Astier S.r.l., via Nicolodi 48 - Livorno
- Geosystems S.r.l., via Atto Vannucci 7 - Firenze
- HERA S.p.A., viale Carlo Berti Pichat 2/4 - 40127 Bologna
- Ingegnerie Toscane S.r.l., via F. De Sanctis 49 - Firenze
- Meridionale Impianti S.p.A., via Senatore Luigi Simonetta 26/D - Caponago (MB)
- Rotas Italia S.r.l., via Genova 6 - Treviso
- Sidercem S.r.l., via Libero Grassi 7 - Caltanissetta
- Tecno In S.p.A., via Marcora 52 - San Donato Milanese (MI)

Amministrazioni pubbliche

- Comune di Ferrara, piazza del Municipio 2 - 44121 Ferrara
- Comune di Matera, viale Aldo Moro 32 - 75100 Matera
- Libero Consorzio Comunale di Enna (già Provincia Regionale di Enna), piazza Garibaldi 2 - 94100 Enna
- Dipartimento della Protezione Civile della Regione Siciliana, via Gaetano Abela 5 - 90141 Palermo

Indice

IL RUOLO DEL COMUNE DI FERRARA A. Fabbri	I
IL RUOLO DELLA CITTÀ DI MATERA Raffaello De Ruggieri	III
IL RUOLO DELLA PROVINCIA DI ENNA Giuseppe Colajanni	V
Il progetto CLARA: <i>Cloud plAtform and smart Underground imaging for natural Risk Assessment</i> F. Castelli, C. Cornacchia, R. Gueli, V. Lapenna e R. Caputo	VII
PARTECIPANTI AL PROGETTO CLARA	XV
OR1 - Studio, definizione ed implementazione di modelli per la valutazione della pericolosità e la mitigazione dei rischi naturali in aree urbane	s1
MODELLI PER LA CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI NATURALI F. Castelli e V. Lentini	s3
MODELLI PREVISIONALI PER LE FRANE F. Castelli e V. Lentini	s8
APPROCCI FISICO-MATEMATICI E TECNOLOGIE DI CALCOLO AD ALTE PRESTAZIONI PER LA STIMA DELLA PERICOLOSITÀ DEI FENOMENI FRANOSI G. Bilotta, C. Del Negro, G. Pappalardo, G. Russo, E. Tramontana	s13
IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI PER IL SUPPORTO ALLE DECISIONI F. Castelli e V. Lentini	s16
OR2 - Fiducia sociale e prevenzione collettiva dei rischi naturali: due studi sperimentali	s21
FIDUCIA SOCIALE E PREVENZIONE COLLETTIVA DEI RISCHI NATURALI: DUE STUDI SPERIMENTALI F. Paglieri, R. Falcone, S. Felletti e A. Sapienza	s23
OR3 - Sviluppo ed integrazione di metodi innovativi per la tomografia 2D e 3D del sottosuolo in aree urbane ed industriali	s37
MISURE GEOFISICHE REALIZZATE IN PIAZZA SAN GIOVANNI E NELLA VILLA DELL'UNITÀ D'ITALIA A MATERA F. Soldovieri, S. Piscitelli, A. Perrone, J. Bellanova, G. Calamita, I. Catapano, G. Gennarelli, G. Ludeno, G. Morelli, G. Catanzariti, E. Lauriti e G. Graziano	s39

INTEGRAZIONE DI MISURE GEOFISICHE IN PIAZZA DUOMO NEI SASSI DI MATERA S. Piscitelli, F. Soldovieri, G. Morelli, A. Perrone, J. Bellanova, G. Calamita, I. Catapano, G. Gennarelli, G. Ludeno, G. Catanzariti, E. Lauriti e G. Graziano	s52
METODI SISMICI SPEDITIVI PER LA DIAGNOSTICA NON-INVASIVA DELLE CARATTERISTICHE DINAMICHE DEL SOTTOSUOLO NEI CENTRI URBANI UTILIZZANDO ONDE DI RAYLEIGH: IL CASO DELLA CITTÀ DI FERRARA N. Abu Zeid, S. Bignardi e G. Santarato	s61
PROSPEZIONI SISMICHE IN AMBIENTE URBANO A SUPPORTO DELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE - PARTE PROFONDA A. Affatato, L. Baradello, L. Petronio, A. Barbagallo, D. Sorgo, G. Cristofano, M. Lovo, S. Maffione, V. Pasciullo, R. Caputo, M. Stefani e N. Abu Zeid	s68
PROSPEZIONI SISMICHE A RIFLESSIONE ONDE SH AD ALTA RISOLUZIONE IN AMBIENTE URBANO A SUPPORTO DELLA PIANIFICAZIONE TERRITORIALE - OBIETTIVI SUPERFICIALI (< 100 M) A. Affatato, L. Baradello, L. Petronio, A. Barbagallo, D. Sorgo, R. Caputo, M. Stefani e N. Abu Zeid.	s75
IL QUATERNARIO SUPERIORE NEL SOTTOSUOLO DI FERRARA: PENETROFACIES ED ARCHITETTURA DEPOSIZIONALE M. Stefani, L. Minarelli e A. Pavanati	s81
TELERILEVAMENTO SATELLITARE PER GENERAZIONE DI DSM DI AREE URBANE F. Fratarcangeli, A. Nascetti e M. Crespi	s89
ANALISI DELLA RETE SISMOMETRICA DEL COMUNE DI FERRARA P. Mari, M. Cinci, R. Caputo e N. Abu Zeid	s95
TOMOGRAFIE GEOELETTRICHE PROFONDE (DERT) PER LO STUDIO GEOLOGICO-IDROGEOLOGICO DI FERRARA E. Rizzo, S. Piscitelli, J. Bellanova, L. Capozzoli, G. De Martino, M. Guerriero, G. Morelli, F. Fischanger, R. Caputo e V. Lapenna . . .	s100
RELAZIONI FRA STORIA DEPOSIZIONALE, CRESCITA URBANA E RISCHI AMBIENTALI NELLA CITTÀ DI FERRARA M. Stefani e L. Minarelli	s106
CARTOGRAFIA GEOLOGICA E STORIA DEPOSIZIONALE DEI CORPI SEDIMENTARI ACCUMULATI DA PO E RENO NELL'AREA DI FERRARA M. Stefani, L. Minarelli e A. Pavanati	s112

**OR4 - Sviluppo ed integrazione di tecniche diagnostiche non invasive
per la caratterizzazione strutturale di edifici/infrastrutture
in aree ad elevato rischio naturale**

DIAGNOSTICA NON-INVASIVA BASATA SULL'ANALISI SPETTRALE DEL RUMORE SISMICO AMBIENTALE (MICROTREMORI) DI ALCUNI EDIFICI SCOLASTICI DEL COMUNE DI FERRARA N. Abu Zeid e G. Santarato	s119
MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE TRAMITE TECNICHE TOPOGRAFICHE INNOVATIVE E TRADIZIONALI Pellegrinelli e P. Russo	s127
MIGLIORAMENTO DEL MONITORAGGIO SISMICO NELL'AREA DI FERRARA P. Mari, M. Cinci, R. Caputo e N. Abu Zeid	s134
UN APPROCCIO INNOVATIVO PER UNA MIGLIORE COMPrensIONE DELL'INTERAZIONE SISMICA TRA SUOLO E STRUTTURE: IL <i>TEST SITE</i> DI FERRARA B. Petrovic, S. Parolai, M. Romanelli, A. Affatato, L. Petronio, A. Barbagallo, D. Sorgo, M. Stefani e R. Caputo	s140
UTILIZZO DI RUMORE SISMICO PER LA CARATTERIZZAZIONE RAPIDA DEGLI EDIFICI N. Tragni, M.R. Gallipoli, M. Lupo, G. Massolino, M. Mucciarelli, A. Rebez, T.A. Stabile e D. Sandron	s148
SVILUPPO DI SENSORI <i>AD HOC</i> PER MISURE DI VIBRAZIONI IN AREE URBANE L. Amato, D. Sala, M. Uliano, G. Antonucci e G. De Viti	s154

**OR5 - Implementazione di sistemi tecnologici innovativi per l'acquisizione
e trasmissione di dati multi-parametrici per il monitoraggio del sottosuolo
e delle strutture/infrastrutture**

IMPLEMENTAZIONE DI SISTEMI TECNOLOGICI INNOVATIVI PER L'ACQUISIZIONE E TRASMISSIONE DI DATI MULTI-PARAMETRICI PER IL MONITORAGGIO DEL SOTTOSUOLO E DELLE STRUTTURE/INFRASTRUTTURE C. Santoro	s159
	s161

MONITORAGGIO TRAMITE RETI DI SENSORI Astuti e S. Chillari	s163
MONITORAGGIO AEREO DEL TERRITORIO TRAMITE L'USO DI SCIAMI DI UAV F. D'Urso, F. Messina, G. Pappalardo, C. Santoro, L. Cantelli, D. Guastella, C.D. Melita e G. Muscato	s166
ROBOT BIO-ISPIRATI PER IL POSIZIONAMENTO DEI SENSORI P. Arena e L. Patanè	s176
SENSORE PER RILEVAZIONE DI MOVIMENTI ORIZZONTALI DEL TERRENO Astuti e S. Chillari	s183
SVILUPPO DI UN SISTEMA CON SENSORI INTEGRATI PER MONITORAGGIO FRANE F. Pedrielli e F. Petrucci	s187
STRATEGIE ADATTATIVE E DISTRIBUITE PER IL <i>DEPLOYMENT</i> DEI SENSORI E IL SUPPORTO DECISIONALE ALLA GESTIONE DELLE EMERGENZE A. Di Stefano e G. Morana	s195

OR6 - Sistemi informativi *Cloud Open* per gli enti territoriali per la difesa del suolo, la gestione dell'allerta e dell'emergenza s199

SISTEMI INFORMATIVI <i>CLOUD OPEN</i> PER GLI ENTI TERRITORIALI PER LA DIFESA DEL SUOLO, LA GESTIONE DELL'ALLERTA E DELL'EMERGENZA R. Gueli	s201
ANALISI DEL FLUSSO INFORMATIVO E DELLE SORGENTI DATI PER LA COMUNICAZIONE BIDIREZIONALE TRA TECNICI, DECISORI, VOLONTARI, E POPOLAZIONE R. Gueli	s203
SOLUZIONI <i>CLOUD OPEN</i> PER GLI ENTI TERRITORIALI R. Gueli	s212
MODELLO SEMANTICO PER L'INTEGRAZIONE DI PROCESSI ED ENTITÀ SPAZIALI R. Gueli	s217
ANALISI DI <i>SOFTWARE</i> NUMERICO E INDIVIDUAZIONE DI ELEMENTI CUI APPLICARE LE TECNICHE DI PARALLELIZZAZIONE AUTOMATICA E RELATIVA VALIDAZIONE, NEL QUADRO DEI MODELLI DI PREVISIONE DEL RISCHIO FRANA G. Bilotta, S.D. Calanna, C. Del Negro, A. Fornaia, G. Pappalardo, S. Scafiti, R. Torrisi e E. Tramontana	s224

OR7 - Sviluppo di *Smart Application* a supporto dell'implementazione di modelli sociali di *Risk Governance* s229

SVILUPPO DI <i>SMART APPLICATION</i> A SUPPORTO DELL'IMPLEMENTAZIONE DI MODELLI SOCIALI DI <i>RISK GOVERNANCE</i> R. Gueli	s231
PIATTAFORMA <i>WEBGIS</i> PER LA CATALOGAZIONE E DATA CURATION DI INFRASTRUTTURE CRITICHE URBANE D. Territo	s232
PIATTAFORMA PER L'ELABORAZIONE DI SCENARI DI RISCHIO LEGATI AD EVENTI METEORICI ESTREMI IN AMBIENTE URBANO R. Gueli	s237
PROGETTI CITIZEN-CENTRED PER L'ESPLORAZIONE TERRITORIALE R. Gueli	s253

OR1

**Studio, definizione ed implementazione
di modelli per la valutazione
della pericolosità e la mitigazione
dei rischi naturali in aree urbane**

Modelli per la classificazione dei fenomeni naturali

F. CASTELLI e V. LENTINI

Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università "Kore", Enna

1. Introduzione

Le città e le aree urbanizzate devono rispondere a sollecitazioni sempre maggiori in termini di sicurezza sociale, funzionalità, prestazionalità, prevenzione e mitigazione dei rischi derivanti da fenomeni naturali come le alluvioni, le frane ed i sismi. In tal senso gli strumenti urbanistici non sempre si sono dimostrati efficaci nel garantire la sicurezza ambientale nella dimensione urbana, proprio nei termini della riduzione del rischio.

Parimente i dispositivi di controllo e monitoraggio non sempre sono idonei ad interagire "real time" con i cittadini, gli operatori e gli enti locali preposti al controllo ed alle decisioni. Non è stato ancora validato un modello standardizzabile di interazione con le popolazioni ed i territori interessati dai fenomeni e dagli eventi calamitosi.

Questo oggi può essere realizzato ipotizzando un cluster di azioni relazionate ai diversi settori della sicurezza, considerando i processi inclusivi, le soluzioni di pianificazione operativa, ed il coordinamento interistituzionale.

In letteratura le metodologie disponibili per affrontare ogni passo procedurale che porta alla valutazione del rischio sono molteplici. Tuttavia, la comunità scientifica ha spesso utilizzato approcci metodologici e tecnologie per la produzione ed elaborazione di basi di dati sostanzialmente differenti da caso a caso, in quanto spesso legati alla specificità dei fenomeni ed alle caratteristiche dei territori oggetto degli interventi. Ne consegue che, a livello nazionale, le Pubbliche Amministrazioni responsabili della pianificazione territoriale e della redazione dei piani di emergenza non sempre dispongono di un quadro univoco di riferimento normativo, culturale e tecnologico.

In questo contesto, a partire dallo stato dell'arte e dalle esperienze dei suoi partecipanti, nell'ambito del Progetto *CLARA* è stata messa a punto una metodologia di riferimento applicabile ai diversi scenari fenomenologici e territoriali.

Sono stati esaminati i modelli utilizzati per la classificazione dei rischi e per la stima dei livelli di pericolosità e vulnerabilità e sono state individuate ed analizzate le informazioni contenute nelle banche dati esistenti sui fenomeni potenziali e/o in atto. Sono state, inoltre, valutate le tecnologie disponibili per l'acquisizione e l'elaborazione dei dati per il monitoraggio, nonché i modelli di calcolo per l'analisi dell'evoluzione dei fenomeni. Infine, sono stati criticamente esaminati i fattori di controllo ed i parametri di riferimento che definiscono l'intensità del fenomeno e le condizioni che ne favoriscono la propagazione e/o l'amplificazione degli effetti, con particolare riferimento alle aree urbanizzate.

2. Finalità

L'obiettivo dell'attività ha riguardato l'analisi del rischio mediante lo sviluppo di modelli per la classificazione dei fenomeni naturali, la stima dei livelli di suscettività e pericolosità, nonché di

vulnerabilità delle risorse esposte nelle aree urbanizzate. Per il raggiungimento di quest'obiettivo le attività intraprese hanno riguardato le procedure per la gestione dell'emergenza, la messa a sistema di interventi ed azioni per la "sicurezza preventiva", la "gestione della sicurezza" e la loro applicabilità.

Partendo dal concetto di rischio, inteso come la manifestazione della interferenza tra i processi di instabilità che "naturalmente" si sviluppano sul territorio in rapporto alla vulnerabilità ed al valore dei beni esposti, è stata analizzata l'interazione tra i fenomeni naturali e le attività antropiche. Questa interazione è di tipo reciproco: non di rado inappropriate "modalità" di utilizzo e gestione del territorio causano una amplificazione dei dissesti. La prevenzione dei rischi naturali, pertanto, è strettamente connessa ad una pianificazione territoriale compatibile con l'assetto geomorfologico e geologico del territorio e con le condizioni di sismicità e stabilità. Tuttavia, le conseguenze di alcuni recenti terremoti ed eventi franosi/alluvionali che hanno interessato anche il nostro Paese, dimostrano che questa sfida è ancora molto lontana dall'essere vinta. Infatti, nonostante il progredire delle conoscenze tecniche e scientifiche, le vittime ed i danni causati da eventi naturali hanno subito nell'ultimo periodo un notevole incremento, anche in conseguenza della forte antropizzazione del territorio.

Da questo punto di vista, vari fattori possono concorrere al raggiungimento dello obiettivo della salvaguardia della vita umana: certamente prioritaria è l'attività di prevenzione attraverso corrette politiche di pianificazione territoriale. Non sono però secondarie l'interdisciplinarietà dell'approccio con cui va affrontato lo studio e la qualificazione dei tecnici preposti alla gestione del territorio (Castelli, 2014).

Il Progetto *CLARA* si attesta su un filone di ricerca ritenuto prioritario nel panorama europeo (Horizon 2020) e nazionale. La sua realizzazione rappresenta un'opportunità sia per la sperimentazione di nuove applicazioni, che per attuare il cosiddetto "trasferimento tecnologico" nell'ambito della "filiera della sicurezza". L'idea è quella di coniugare l'utilizzo di avanzate tecnologie ICT da parte di cittadini, Amministrazioni Pubbliche ed imprese, con profili di ricerca applicata nel settore della sicurezza dei sistemi territoriali (Castelli *et al.*, 2015).

Il progetto trova una significativa collocazione in un settore di notevole impatto sulla collettività, quale quello della sicurezza dei sistemi territoriali in caso di eventi naturali, dove l'utilizzo delle tecnologie della informazione e comunicazione si rivela di interesse strategico per migliorare l'interazione pubblico-privato, i servizi pubblici ed i processi di gestione delle emergenze.

In un territorio ad elevato rischio sismico e da frana, quale quello italiano, con un tessuto urbanizzato caratterizzato da elevati livelli di vulnerabilità e con un terziario rivolto prevalentemente all'industria delle costruzioni residenziali, l'implementazione dei risultati della ricerca proposta, in termini di zonazione del rischio, reti locali di monitoraggio e sistemi di sicurezza, può consentire la promozione di politiche di prevenzione e mitigazione degli effetti dei fenomeni naturali.

3. Metodologia

L'attività di ricerca condotta è stata prevalentemente finalizzata ad approfondire l'analisi dei fenomeni che interessano il suolo ed il sottosuolo, al fine di valutare l'influenza che questi esercitano sulla vulnerabilità delle strutture/infrastrutture e, più in generale, dei sistemi geotecnici. Gli aspetti principalmente analizzati riguardano la sperimentazione nel campo del comportamento

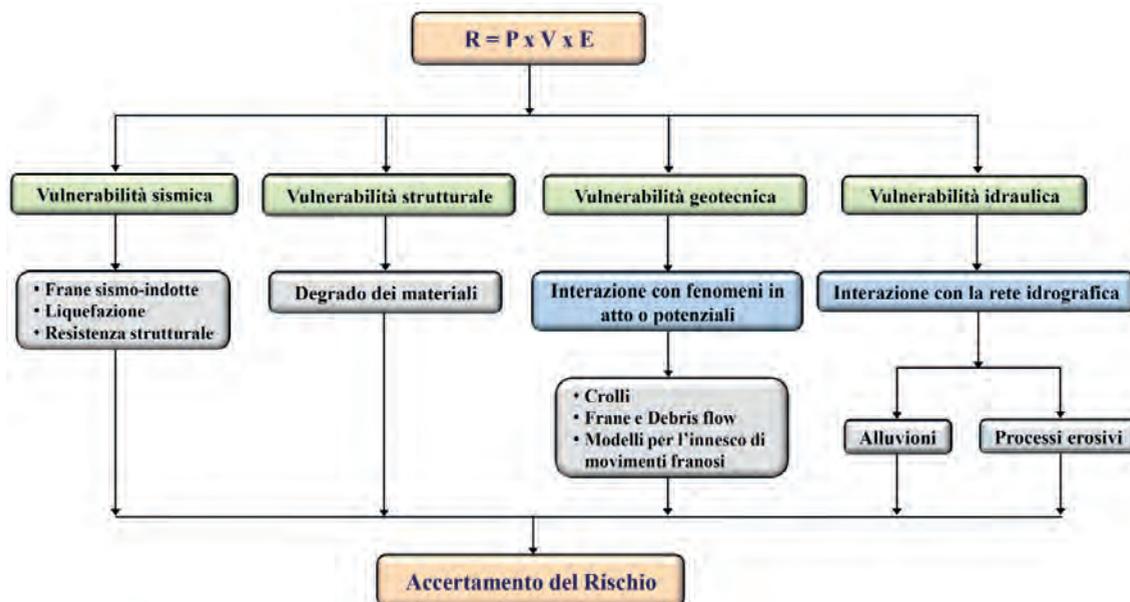


Fig. 1 - Pericolosità ed accertamento del rischio.

del terreno, con particolare riferimento per quanto riguarda il rischio sismico all’analisi della risposta nel caso di “terreni difficili”, ed ai “fattori predisponenti” dei meccanismi d’innesco e di propagazione per quanto riguarda il rischio da frana.

A partire dalla formula adottata per la valutazione del rischio su basi qualitative e quantitative (Fig. 1): $R = (P \times E \times V)$, essendo R il rischio, P la pericolosità, E gli elementi esposti e V la vulnerabilità, nel caso di aree urbanizzate ed infrastrutture, esso non è confinato solo all’area colpita dall’evento, ma ai malfunzionamenti che possono coinvolgere un’intera porzione di territorio. L’ampiezza di tale dominio dipende dal tempo di gestione delle emergenze e dall’architettura topologica e funzionale dell’area stessa (“rischio non localizzato”).

In questo caso la pericolosità P è legata alla probabilità che l’evento possa interessare direttamente o indirettamente l’ambito territoriale in cui si sviluppa, l’esposizione E è legata alle modalità di funzionamento, la vulnerabilità V alle tipologie strutturali. Ad esempio, nel caso della valutazione del rischio per un attraversamento idraulico in viadotto, la pericolosità è la probabilità (o tempo di ritorno) di un fissato evento critico (es. la probabilità che si verifichi una piena di entità Q), la vulnerabilità è connessa alla tipologia ed alle caratteristiche dell’opera di attraversamento (es. tipologia fondazioni delle pile in alveo), l’esposizione dipende dal valore dell’opera.

L’esame degli aspetti geotecnici connessi alla vulnerabilità non può prescindere dallo studio dei terreni su cui insistono le opere. Ne deriva l’esigenza di definire una scala di indagine dei fenomeni investigando sia su quelli di tipo localizzato, che su quelli che comportano una scala maggiore (Fig. 2). Saranno quindi i fenomeni naturali che agiscono a scala territoriale a dover essere prevalentemente analizzati, come ad esempio lo studio degli effetti legati all’interazione con i corsi d’acqua, alle alluvioni, alle frane ed ai crolli, alla sismicità del territorio.

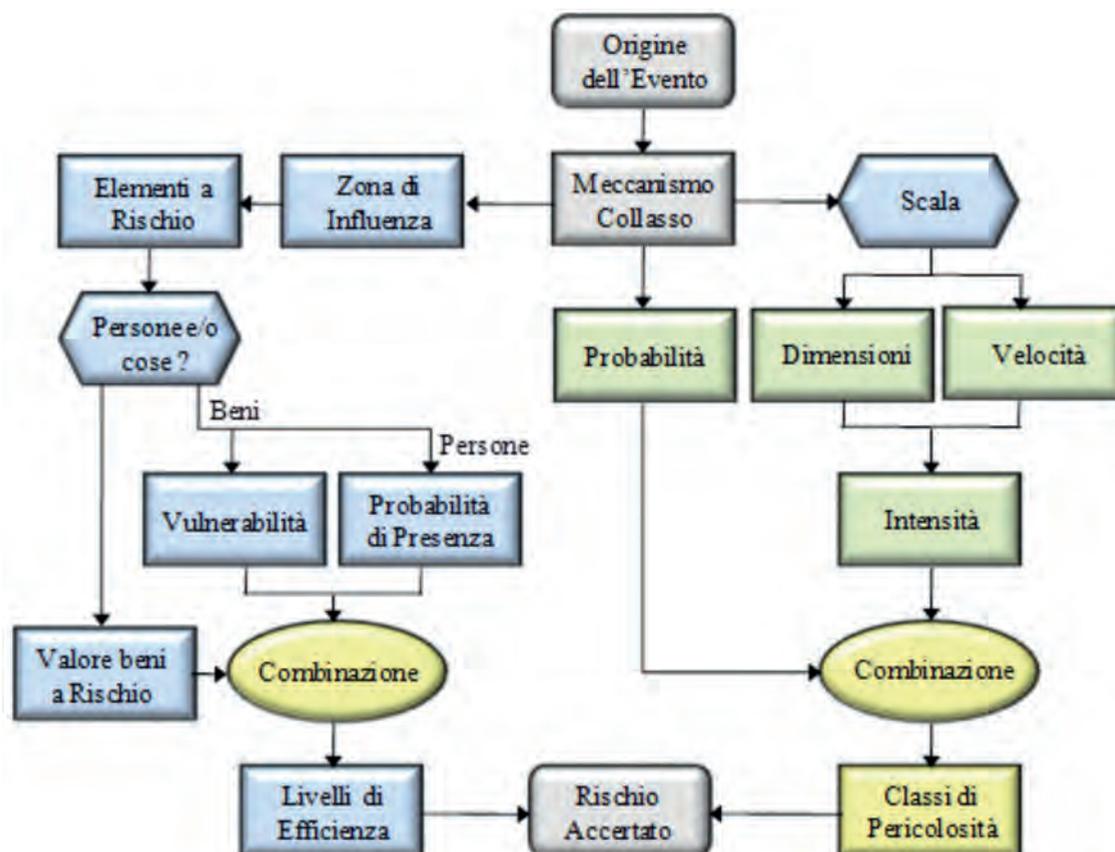


Fig. 2 - Definizione e sviluppo del processo.

4. Risultati dello studio

La vulnerabilità esprime in generale la propensione di un manufatto e/o bene a subire danni o modificazioni per effetto di un'azione naturale o antropica. Con riferimento ad un singolo elemento, oppure alla globalità di un sistema, la vulnerabilità si può intendere come la misura della perdita o della riduzione di efficienza a svolgere le funzioni che normalmente vengono esplicitate. È importante sottolineare come la vulnerabilità rappresenti una proprietà intrinseca della struttura ("vulnerabilità del costruito"). Essa allora dipende dalle caratteristiche geometriche e costruttive, dall'età, dai materiali con cui è realizzata, dalla bontà del progetto e dallo stato di conservazione. La "vulnerabilità del costruito" deve essere combinata con la "pericolosità territoriale", quest'ultima associata a fenomeni deformativi permanenti dei terreni e degli ammassi rocciosi, come franosità, subsidenza, liquefazione, ecc.

La vulnerabilità complessiva è funzione di questi fattori, che determinano l'influenza delle condizioni locali nella valutazione della stabilità del patrimonio edilizio ed infrastrutturale, sia alla scala locale che territoriale. Alla vulnerabilità è connesso il concetto di danno, ovvero la perdita parziale o completa da parte della struttura della sua funzionalità. Questa può essere "strutturale", se riferita alle caratteristiche costruttive, può trattarsi di una vulnerabilità "naturale", se riguarda

le caratteristiche del territorio attraversato, ed i rischi naturali che lo contrassegnano, può essere, infine, una vulnerabilità relativa ai “flussi” nelle diverse ore del giorno.

L'accertamento della vulnerabilità, ovvero della probabilità di collasso, richiede di individuare i possibili meccanismi di rottura, quindi di definire il modello geotecnico, ed infine, di eseguire le verifiche di sicurezza. Il risultato è affetto da incertezze che dipendono dai dati e dal metodo di calcolo. I dati la cui variabilità è poco influente sul risultato sono assunti di valore noto (deterministici), mentre quelli la cui variabilità è maggiormente influente sul risultato sono considerati variabili aleatorie e definiti attraverso il loro valore medio (atteso e più probabile) e la loro deviazione standard.

La probabilità che si verifichi un danneggiamento strutturale in funzione di uno o più parametri indipendenti indicativi dell'evento studiato (i.e. portata e/o altezza idrica nel caso della probabilità di rottura di un argine, velocità di picco PGV o accelerazione di picco PGA nel caso degli effetti indotti da un sisma), può essere espressa tramite una funzione probabilità denominata “curva di fragilità”. Questo concetto recentemente è stato esteso anche all'ambito dell'ingegneria geotecnica, ed in particolare allo studio delle probabilità di collasso di arginature, gallerie, condotte interrate, muri di sostegno, opere portuali e versanti, sottoposti ad una specifica condizione di sollecitazione, o ad una variazione del livello di falda oppure a spostamenti riferiti a differenti tipologie di fenomeni franosi o ad una analisi di pericolosità sismica del sito (Aiello *et al.*, 2004; Argyroudis e Pitilakis 2012; Lanzano *et al.*, 2013; Marchi *et al.*, 2014).

BIBLIOGRAFIA

- Aiello V., Barile A. e Silvestri F. (2004). *Zonazione ed analisi di instabilità di pendii in condizioni sismiche: sviluppi metodologici ed aspetti applicativi*. Atti Incontro Annuale Ricercatori di Geotecnica - IARG 2004, Trento, 7-9 luglio 2004, 4 p.
- Argyroudis S. e Pitilakis K. (2012). *Seismic fragility curves of shallow tunnels in alluvial deposits*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 35, 1-12.
- Castelli F. (2014): “*Studio, definizione ed implementazione di modelli per la valutazione della pericolosità e la mitigazione dei rischi naturali in aree urbane*”. Atti Coast Esonda 2014, Ferrara 17-19 settembre 2014, 10 p.
- Castelli F., Castellano E. Contino F. e Lentini V. (2015). “*Landslide risk: recent developments for the emergency management*”. Proc. Int. Emergency Management Society, 2015 Annual Conference, September 30 - October 2, 2015, Rome, Italy, 12 p.
- Lanzano G., Salzano E., de Magistris F.S. e Fabbrocino G. (2013). *Seismic vulnerability of natural gas pipelines*. Reliability Engineering & System Safety, 117, 73-80.
- Marchi M., Gottardi G., Madiari C., Ranalli M., Tonni L. e Vannucchi G. (2014). *Probabilità di collasso di un tratto di argine maestro del fiume Pò*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica - IARG 2014, Chieti e Pescara, 14-16 luglio 2014, 6 p.

Modelli previsionali per le frane

F. CASTELLI e V. LENTINI

Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università "Kore", Enna

1. Introduzione

La previsione di fenomeni come le frane, soprattutto di quelle a cinematica rapida ascrivibili alla classe delle frane per colamento (*debris/earth flows*), assume un ruolo fondamentale ai fini di una adeguata gestione del territorio, della salvaguardia delle vite umane e dei beni vulnerabili (patrimonio edificato ed infrastrutture a sviluppo lineare).

La rapidità di innesco a seguito di fasi preparatorie non sempre facilmente monitorabili, ed il potenziale molto spesso distruttivo, pongono la necessità di approntare metodi di valutazione preventiva della suscettibilità di versanti/impluvi a questi eventi, con particolare attenzione alle aree urbanizzate.

Lo studio dei caratteri geomorfologici, geologici, idrologici e geotecnici risulta basilare per la definizione e l'identificazione dei fattori predisponenti, dei meccanismi d'innesco e di propagazione, soprattutto dove evidenze morfologiche indicano la possibilità dell'insorgenza di tali fenomeni. Questi fattori rappresentano solo una parte degli aspetti che riguardano lo sviluppo di tali tipologie di fenomeni: altre condizioni fondamentali sono quelle connesse ai meccanismi di mobilitazione, propagazione e deposito del materiale.

Relativamente alle tipologie dei fenomeni, tralasciando di considerare il caso delle frane indotte da eventi eccezionali (sismi), quelle di scorrimento sono le più diffuse sul territorio nazionale: non hanno una cinematica rapida, se non nella loro fase parossistica, ma coinvolgono enormi volumi di terreno e sono dotate di grande potenziale distruttivo, trascinando tutto ciò che insiste sul pendio in movimento.

I crolli invece sono dissesti tipici di pareti rocciose fratturate e giuntate, non presentano volumi confrontabili con le frane di scorrimento, tuttavia, avendo una cinematica tipica dei gravi in caduta libera, sono dotati di grande energia cinetica per cui il potenziale distruttivo è enorme.

La cinematica rapida è tipica anche delle colate che si verificano generalmente su pendii ripidi montani, quando ammassi granulari vengono mobilitati in seguito all'apporto di grandi quantità d'acqua, per eventi piovosi di particolare intensità e si propagano verso valle con velocità generalmente molto elevate. Le velocità osservate durante gli eventi variano da 0,5 a 20 m/sec.

Molti fenomeni franosi possono essere considerati come colate di fango (*mud flow*) e colate detritiche (*debris flow*). L'insidia tipica delle colate sta nella difficile previsione e nella repentina velocità evolutiva. Queste caratteristiche cinematiche sono strettamente legate al verificarsi del cosiddetto processo di trasformazione in colata (o fase di post-rottura), che rende l'iniziale massa instabile ("*volume di innesco*") assimilabile ad un fluido e, quindi, dotato di elevatissima mobilità.

Il meccanismo di innesco determina l'entità dei volumi mobilitati e le modalità di raggiungimento delle condizioni di rottura, mentre la fase di post-rottura si caratterizza per le accelerazioni che si instaurano nelle masse mobilitate.

Nel caso delle frane indotte da eventi meteorici intensi, possono essere adoperati diversi approcci previsionali: taluni prescindono dall'interazione tra pioggia e terreno e basano la previsione d'innescò solo sui dati di pioggia (modelli a soglia) (Castelli e Lentini, 2013; Castelli *et al.*, 2016), altri più avanzati, tengono conto dell'interazione e consentono di articolare un legame delle previsioni alle piogge, alla morfologia ed alla litologia del terreno. La maggior parte dei modelli considerano una relazione di tipo monomio per la soglia, formulata in termini d'intensità media e durata degli eventi innescanti. Altri metodi impiegano grandezze caratterizzanti gli eventi di pioggia, quali indici di precipitazione antecedente e/o per intero la serie di precipitazioni, presentando il limite di richiedere un input che spesso si ha a disposizione solo per periodi non sufficientemente lunghi per una affidabile calibrazione dei parametri. In più questi metodi non sempre consentono di tenere conto degli effetti delle modifiche dell'uso del suolo, delle condizioni idrauliche, né delle proprietà geotecniche dei terreni (Fig. 1).

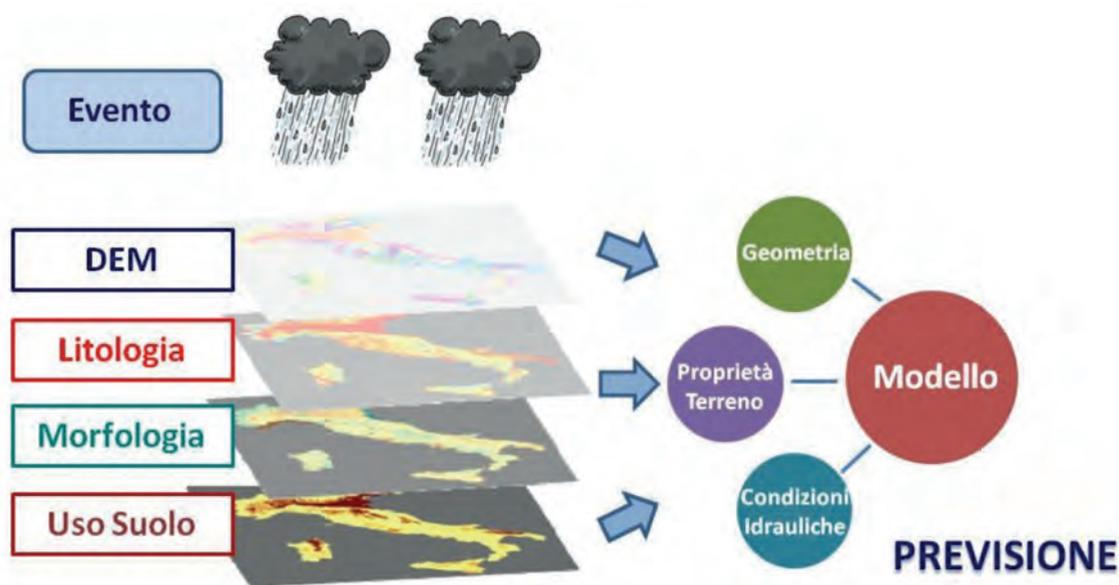


Fig. 1 - Modelli di previsione e fattori di interesse.

I modelli di previsione basati sulla valutazione di una soglia critica di piovosità non riescono a predire, solo sulla base delle conoscenze spaziali di vecchi movimenti, quando una frana inizierà a muoversi. Inoltre, anche se questi si basano su opinioni di esperti, essendo spesso fondati sull'applicazione di regole decisionali soggettive per la definizione e la stima dei pesi, sono utili solo per valutazioni locali.

Per rimuovere la soggettività nelle analisi è necessario impiegare metodi deterministici che permettano di considerare che, ogni volta che si innesca un movimento, cambiano le condizioni topografiche, meccaniche e si creano nuove condizioni di instabilità, diverse da quelle iniziali. In quest'ambito è da segnalare che in letteratura sono disponibili modelli fisicamente basati in grado di individuare all'interno di un bacino le aree a maggiore pericolosità.

2. Metodologia

Poiché nel caso di frane catastrofiche giocano un ruolo fondamentale le forze di filtrazione, è essenziale l'impiego di metodi che consentano lo studio accoppiato del comportamento del terreno e del fluido interstiziale.

Progressi sono possibili grazie alle moderne tecniche numeriche, in grado di simulare movimenti di masse di grandi dimensioni, con la possibilità di utilizzare tali metodologie anche per la previsione dei danni causati da un evento franoso.

La tecnica numerica denominata "*Material Point Method (MPM)*", ad esempio, impiegata per simulare il comportamento di solidi, liquidi, gas e di qualsiasi altro materiale continuo, trova oggi applicazione anche nella modellazione dei complessi meccanismi pre- e post-rottura che regolano il comportamento dei fenomeni franosi (Soga *et al.*, 2016) e rappresenta una notevole innovazione nello studio di queste tipologie di dissesto.

Un ulteriore aspetto che riveste una grande importanza nella valutazione del rischio è la previsione dell'intensità di una frana, ovvero del suo potere distruttivo. In prima analisi, il potere distruttivo di una frana è funzione della velocità, del volume, delle caratteristiche della massa in movimento, del contenuto in acqua, della pendenza del versante lungo il quale la massa si muove, ecc..

Per tenere conto di questi fattori, l'approccio monofase della meccanica dei continui (Savage e Hutter, 1989) è quello che nel tempo, nell'ambito della modellazione teorica di frane rapide di tipo flusso, ha maggiormente permesso di cogliere gli aspetti che regolano il comportamento di insieme del fenomeno.

Esso prevede l'integrazione delle equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto nello spessore del flusso e che la dissipazione della energia si concentri all'interfaccia flusso-superficie di scorrimento. Sulla base di tale approccio, altri se ne sono succeduti. L'effetto multidimensionale del flusso è stato gradatamente preso in considerazione e fenomeni più complessi sono stati inseriti arricchendo la formulazione di base, prevedendo anche l'erosibilità del fondo lungo cui la massa fluisce. Relativamente allo studio del processo di propagazione, la maggior parte dei modelli numerici sviluppati negli ultimi anni si basano sull'approccio teorico di Savage e Hutter (1989). Questi modelli permettono un'analisi quantitativa dei parametri di flusso e di deformazione e la definizione della configurazione assunta dalla massa nell'area di deposito. In generale essi possono essere classificati in funzione: 1) della possibilità di condurre analisi 2D o 3D; 2) dell'utilizzo di una configurazione euleriana o lagrangiana e 3) del tipo di legge reologica implementata.

Sebbene le colate di detrito siano riconducibili ad un mezzo bifase, la maggior parte dei modelli numerici disponibili si basano su un approccio monofase al problema. La loro applicazione richiede, oltre alla definizione dei caratteri morfologici dell'area di studio, l'attribuzione di un'appropriata legge reologica al mezzo continuo equivalente e la calibrazione dei relativi parametri.

Le insite difficoltà sperimentali connesse alla taratura di tali parametri consiglia normalmente il ricorso a leggi reologiche semplici, che tuttavia non sempre risultano adeguate per il conseguimento di risultati soddisfacenti. Inoltre, durante la propagazione il flusso di detriti non si comporta con una reologia fissa, poiché cambia caratteristiche e concentrazioni nello spazio e nel tempo. Per questa ragione alcuni codici di calcolo offrono la possibilità di scelta tra diverse leggi reologiche, nonché di predire gli sforzi viscosi in funzione della concentrazione del sedimento, consentendo

d'indagare gli aspetti che caratterizzano la dinamica ed il comportamento reale di una colata (materiale fine o gravel). È questo il caso del modello FLO-2D sviluppato da O'Brien (2007), basato sulla conservazione del volume (modellazione a fondo fisso). I flussi iperconcentranti sono simulati in condizioni omogenee (monofase) non lineari alla Bingham e la propagazione avviene secondo una legge reologica quadratica in funzione della concentrazione del sedimento.

3. Risultati ottenuti

Il codice di calcolo FLO-2D è stato utilizzato per simulare l'evento che ha interessato la città di Enna nella notte tra l'1 ed il 2 febbraio 2014, causando l'isolamento del centro abitato per l'ingente volume di materiale detritico trasportato e depositatosi sulla principale arteria di collegamento della città (SS117bis) con l'Autostrada A19 "Palermo-Catania". L'area oggetto di studio è quella delle pendici di Enna, nella quale s'innescano parecchi movimenti gravitativi superficiali al livello della coltre alterata delle marne argillose grigio-azzurre, i cui spessori variano da 2,0 m fino a circa 4,0 m. Si tratta di fenomeni che interessano prevalentemente la parte più superficiale della formazione, soprattutto durante i fenomeni piovosi più intensi. Le cause sono riconducibili alla forte pendenza naturale del versante, ed alla mancanza di adeguate opere di regimentazione delle acque meteoriche provenienti da monte.

La simulazione numerica è stata condotta utilizzando un accurato modello digitale del terreno (*DTM*), mentre per la caratterizzazione geotecnica dei litotipi interessati dall'evento sono stati impiegati i risultati delle numerose campagne d'indagine effettuate nella zona, i cui risultati sono sintetizzati da Castelli *et al.* (2017).

I risultati ottenuti mediante le simulazioni numeriche, assumendo per i coefficienti reologici i valori proposti da Stancanelli e Foti (2015), sono presentati rispettivamente in termini di altezza massima, altezza finale e massima velocità del flusso (Fig. 2). Il confronto tra i valori sperimentali e numerici mostra un buon accordo in termini di volume di materiale trasportato e circoscrizione dell'area inondata.

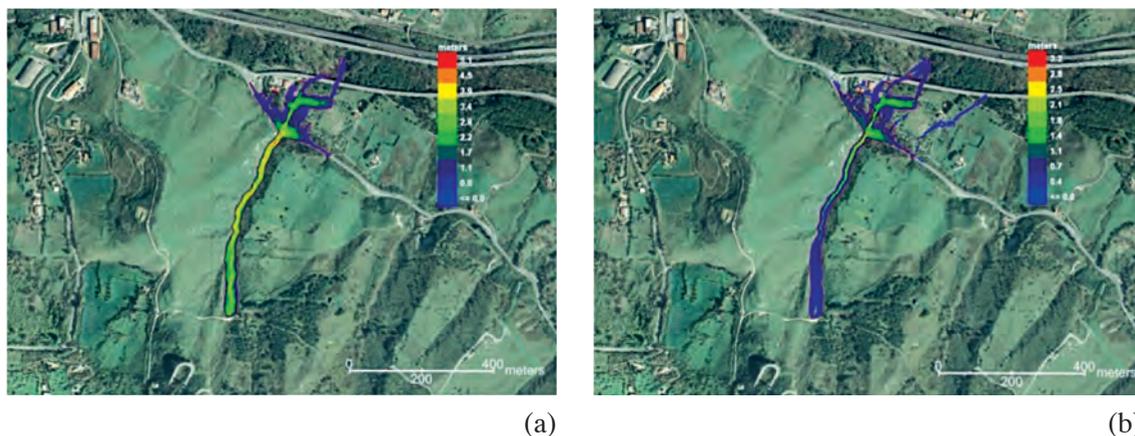


Fig. 2 - Simulazione evento: a) Massima altezza del flusso e b) Altezza finale del flusso.

Il volume di materiale calcolato con la simulazione numerica risulta di poco superiore ($\approx 6\%$) a quello effettivamente trasportato (pari a $\approx 1400 \text{ m}^3$), che depositatosi sulla strada è stato rimosso dalla Protezione Civile della ex Provinciale Regionale di Enna durante la fase di riapertura della strada stessa.

La colata è avvenuta in un'unica ondata, alle 21:00 circa del 1° febbraio 2014 e la successiva pioggia ha prevalentemente provocato una maggiore espansione dei sedimenti nella zona di deposito ai piedi delle pendici, sulla strada statale SS117bis.

L'altezza finale del deposito è risultata leggermente superiore, specialmente nel punto in cui l'impluvio incontra la strada, mentre le velocità calcolate rientrano nel range di valori riportati in letteratura, confermando una buona capacità del modello di riprodurre l'evento.

BIBLIOGRAFIA

- Castelli F. e Lentini V. (2013). *Landsliding events triggered by rainfalls in the Enna area (South Italy)*. Proc. of the Second World Landslide Forum, Roma, 3-7 October, 2011, Springer eds., 2, 39-47.
- Castelli F., Castellano E., Contino F. e Lentini V. (2016). *A Web-based GIS system for landslide risk zonation: the case of Enna area (Italy)*. Proc. XII International Symposium on Landslides (ISL 2016) - Napoli, Italy, June 12-19, 2016, 2, 595-603.
- Castelli F., Freni G., Lentini V. e Fichera A. (2017). *Modelling of a debris flow event in the Enna area for hazard assessment*. Proc. I International Conference on the Material Point Method, MPM 2017, Delft, Netherland, 6 p.
- O'Brien J.D. (2007). *FLO-2D User's Manual*. Version 2007.06, FLO Engineering, Nutrioso.
- Savage S.B. e Hutter K. (1989). *The motion of a finite mass of granular material down a rough incline*. Journal of Fluid Mechanics, 199, 177-215.
- Soga K., Alonso E., Yerro A., Kumar K. e Bandara S. (2016). *Trends in large-deformation analysis of landslide mass movements with particular emphasis on the material point method*. Géotechnique, 66 (3), 248-273.
- Stancanelli L.M. e Foti E. (2015). *A comparative assessment of two different debris flow propagation approaches-blind simulations on a real debris flow event*. Natural Hazards Earth Syst. Science, 15, 735-746.

Approcci fisico-matematici e tecnologie di calcolo ad alte prestazioni per la stima della pericolosità dei fenomeni franosi

G. BILOTTA¹, C. DEL NEGRO¹, G. PAPPALARDO², G. RUSSO² e E. TRAMONTANA²

¹ *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania*

² *Dipartimento di Matematica e Informatica, Università di Catania*

1. Introduzione

La capacità di stimare l'intensità di una frana, ovvero del suo potere distruttivo, fa parte della previsione tipologica e riveste, ovviamente, una importanza fondamentale nella valutazione del rischio. Il potere distruttivo di una frana, in prima analisi, è funzione della velocità, del volume, delle caratteristiche della massa in movimento, del contenuto in acqua, dell'acclività del versante lungo il quale la massa si muove.

L'approccio monofase della meccanica del continuo è quello che maggiormente ha permesso, nell'ambito della modellazione teorica, di cogliere gli aspetti che regolano il comportamento di insieme del fenomeno.

I modelli di previsione dei fenomeni franosi, prevalentemente di tipo qualitativo e generalmente basati sulla valutazione di una soglia critica di piovosità, non possono predire, solo sulla base delle conoscenze spaziali di vecchi movimenti, quando una frana inizierà a muoversi. Inoltre, anche se questi metodi qualitativi si basano su opinioni di esperti, essendo spesso fondati sull'applicazione di regole decisionali soggettive per la definizione e la stima dei pesi, sono utili solo per valutazioni locali.

Le soglie, infatti, vengono usualmente determinate empiricamente attraverso l'analisi statistica di eventi storici e tali metodologie, ad esempio, non consentono di tenere conto dell'effetto di modifiche dell'uso del suolo, né dei cambiamenti climatici in atto.

Per rimuovere la soggettività nelle analisi è pertanto necessario impiegare metodi deterministici che permettano di effettuare simulazioni realistiche dei fenomeni franosi

2. Metodologia

Le colate rapide di fango e detriti possono essere considerate come misture di liquidi e solidi spinti dalla gravità. I modelli matematici che descrivono questi fenomeni sono basati sulle equazioni di Navier-Stokes della meccanica dei continui fluidi per problemi a frontiera libera. Da queste equazioni si possono ottenere modelli che descrivono le diverse fenomenologie con vari gradi di accuratezza.

I flussi di fango e detriti sono spesso modellati come materiali visco-plastici con regime di flusso laminare (fluidi viscosi alla Bingham), ma sono possibili anche modelli che tengono conto della dissipazione per mezzo della legge di attrito di Coulomb (Zhu *et al.*, 2005). Un'ulteriore semplificazione al modello si ottiene nell'ipotesi che lo spessore del flusso sia piccolo rispetto alle lunghezze caratteristiche nella direzione del flusso.

In queste condizioni la velocità verticale del fluido è piccola, cosicché il gradiente di pressione verticale è approssimativamente idrostatico. Questo permette una descrizione bidimensionale

del flusso, evitando la più complessa formulazione tridimensionale, ed il problema a frontiera libera.

Questi modelli sono chiamati equazioni generalizzate di Saint-Venant, e sono stati impiegati con successo nello studio della propagazione delle onde in acque poco profonde in fiumi e laghi ed anche per le colate di fango e detriti (Begueria *et al.*, 2009).

Dal punto di vista della modellazione, le colate di fango e detriti sono fenomeni multiscala, poiché avvengono su dimensioni che vanno da pochi centimetri (dimensioni dei detriti più piccoli) a centinaia di metri (dimensione del fronte della colata). Un parametro molto importante ai fini della soluzione numerica è il costo computazionale, che è fortemente correlato alla scala in cui si opera ed al dettaglio del modello.

In particolare sono stati presi in considerazione alcuni modelli per il trasporto dei detriti. Il modello eterogeneo consiste nella simulazione del trasporto di ciascun solido immerso nel fluido. Una descrizione lagrangiana del trasporto di oggetti solidi (detriti) in un fluido si ottiene mediante una discretizzazione alle particelle: sia il fluido che i solidi in esso immersi sono descritti da un insieme di particelle. Le particelle del fluido evolvono seguendo le equazioni di Navier-Stokes per un fluido newtoniano, mentre le particelle del solido soddisfano le equazioni cardinali della dinamica dei solidi.

Questa discretizzazione si può ottenere utilizzando schemi quali “*Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)*” (Bilotta *et al.*, 2011; Hérault *et al.*, 2011).

Modelli così dettagliati possono essere utilizzati solo in regioni relativamente piccole, e risultano utili soprattutto quando si è interessati ad una descrizione accurata del moto delle parti solide del flusso (detriti), nonché alla loro interazione con eventuali ostacoli (impatti fluido/struttura, edifici, ecc.).

3. Risultati ottenuti

L’obiettivo dell’attività ha riguardato lo sviluppo di un codice di simulazione di fenomeni franosi basato su una modellazione del mezzo descritto come fluido non-newtoniano, in grado di valutare i rischi di danneggiamento delle strutture investite dalla frana (*modello omogeneo*), ed un codice per il trasporto di detriti in un fluido capace di tenere conto dell’interazione fluido-struttura (*modello eterogeneo*).

Il modello omogeneo si ottiene supponendo che la mistura di liquido e detriti si comporti come un fluido omogeneo, con una opportuna equazione di stato che legghi il tensore degli sforzi con la velocità di deformazione (fluido non-newtoniano). Dal punto di vista computazionale il modello risulta meno oneroso rispetto a quello eterogeneo, ed è comunque in grado di simulare l’impatto fluido/struttura.

Nello studio condotto l’attenzione si è focalizzata sulla dinamica di propagazione delle colate detritiche, fenomeni naturali di elevata pericolosità e forza distruttiva.

I parametri reologici adottati, essendo spesso empirici e quindi non fisicamente basati, possono essere definiti tramite il confronto con analoghi studi di letteratura relativi alla modellazione di colate detritiche nelle quali è coinvolto un materiale con caratteristiche geotecniche similari.

Ulteriori approfondimenti sono tuttavia necessari per la individuazione di soglie di concentrazione volumetrica, ovvero indici di composizione granulometrica (come la percentuale

di materiale fine), per identificare efficacemente i comportamenti reologici attribuibili alle colate detritiche.

BIBLIOGRAFIA

- Beguiria S., Van Asch W.J., Malet J.P., Groendahl S. (2009). *A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain*. Natural Hazards Earth Syst. Science, 9, 1897-1909.
- Bilotta G., Russo G., Hérault A., Del Negro C. (2011). *Moving least-squares corrections for smoothed particle hydrodynamics*. Annals of Geoph. 54 (5), 622-633.
- Hérault A., Bilotta G., Vicari A., Rustico E., Del Negro C. (2011). *Numerical simulation of lava flow using a GPU SPH model*. Annals of Geoph. 54 (5), 600-620.
- Zhu H., Kim Y.D., De Kee D. (2005). *Non-Newtonian fluids with a yield stress*. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 129 (3), 177-181.

Implementazione di modelli per il supporto alle decisioni

F. CASTELLI e V. LENTINI

Facoltà di Ingegneria e Architettura, Università "Kore", Enna

1. Introduzione

Il costo relativo al ciclo di vita del patrimonio edificato è un importante parametro nella analisi prestazionale. Esso comprende, in termini economici, diversi fattori quali: il rischio, la vulnerabilità e l'*exposed asset* per l'intera vita utile.

Chiaramente la valutazione del costo del ciclo di vita di un'opera esistente è soggetta all'incertezza relativa ai futuri eventi che potrebbero verificarsi, oltre che alle incertezze connesse alla sua caratterizzazione (geometrica, materiali, ecc.). Per queste ragioni il costo del ciclo di vita di un'opera è generalmente analizzato in termini probabilistici.

La strategia di adeguamento ottimale è allora quella che riesce a minimizzare il costo del ciclo di vita atteso, rispettando i vincoli legati alla sicurezza (Castelli, 2017).

In questo contesto, sia nel caso di condizioni di emergenza a seguito di un evento, che per la programmazione delle manutenzioni straordinarie o di eventuali riparazioni, con riferimento sia alla singola parte che all'intero complesso strutturale, possono essere impiegati sistemi di supporto alle decisioni basati sull'utilizzo di modelli (*DSS model-based*).

Inoltre, il sempre crescente sviluppo di piattaforme con elevatissime prestazioni, di database di grandi dimensioni e la forte espansione di modelli basati sull'impiego di calcolatori, hanno favorito l'utilizzo dei computer come supporto alle decisioni.

Questi strumenti informatici (*DSS*) differiscono dai tradizionali sistemi di trattamento delle informazioni: sono sistemi informativi interattivi sviluppati per supportare la soluzione di problemi di gestione, mediante la generazione di opzioni alternative e meccanismi per l'analisi comparativa, l'ordinamento e la selezione sulla base dei criteri, degli obiettivi e dei vincoli forniti dall'utilizzatore (*decision maker*). Ciascuna opzione di gestione determina una prestazione del sistema, che viene quantificata per mezzo di indicatori. I valori degli indicatori vengono valutati e confrontati per giungere ad un ordinamento finale delle opzioni di scelta.

Una decisione costituisce una scelta tra molteplici possibili alternative. Le decisioni prese possono riguardare, ad esempio, l'elaborazione di un piano strategico, le azioni e gli investimenti. Il processo decisionale si colloca nella tematica più generale del *problem solving*, in cui si cerca di colmare il divario tra le condizioni attuali del sistema e quelle da raggiungere.

2. Metodologia

Soprattutto nel caso delle Pubbliche Amministrazioni, che spesso hanno in gestione un numero rilevante di manufatti, il mantenimento della corretta funzionalità delle opere rappresenta un onere notevole e non solo dal punto di vista tecnico, dovendo essere subordinato all'ottimizzazione delle risorse economiche.

In questo contesto si inseriscono i "*Management Systems*", strumenti di ausilio alla gestione,

che stabiliscono quando e come intervenire sulla base di criteri derivanti da considerazioni tecniche ed economiche.

Questi vanno dalla semplice predisposizione di database per la catalogazione delle informazioni, a cui si affiancano soluzioni più evolute comprendenti la definizione di metodi dinamici, indicatori di prestazione, modellazioni del degrado e delle resistenze residue dei materiali (Fig. 1).



Fig. 1 - Indicatori strategici di rischio (ISPRA, 2015).

È questo, ad esempio, il caso dei ponti, per i quali in Italia l'approccio al problema ha previsto la strutturazione di sistemi dove l'opera viene identificata dall'andamento di specifici "indicatori di stato", in grado di tradurre quantitativamente le informazioni provenienti dalle ispezioni, consentendo la costruzione di curve di decadimento per la scelta di soglie di intervento ottimale (Franchetti *et al.*, 2003; Gori 2006).

La ricerca di specifici indicatori di stato che consentano la determinazione delle priorità di intervento, riconduce alla complessa problematica dell'ispezione e della manutenzione. Sistemi di questo tipo si configurano come corretti strumenti di caratterizzazione dello stato di degrado delle opere.

Tuttavia, per perseguire un continuo sviluppo delle tecniche di gestione, si deve ritenere che un metodo di più ampio respiro debba maggiormente evidenziare al suo interno la definizione dell'importanza strategica dell'opera nel contesto generale. Solo in questo caso l'indicatore di stato identificativo del grado di priorità d'intervento non risulta confinato ai soli aspetti del degrado strutturale, ma può cogliere più compiutamente la esigenza di funzionalità complessiva dell'opera e dell'impianto della quale fa parte.

Le problematiche possono essere affrontate in un'ottica multiscala:

- per singole opere;
- a livello di rete, complesso edilizio, infrastruttura di trasporto, *lifeline*, analizzando gli aspetti legati alla valutazione ed alla gestione complessiva dei rischi (Fig. 2).

L'implementazione di questi sistemi deve tenere presente:

- l'analisi della vulnerabilità dell'opera attraverso la caratterizzazione delle possibili azioni da intraprendere e lo sviluppo di tecniche per la valutazione dello "stato di salute";
- lo sviluppo di metodi e tecnologie di riduzione del rischio, che prevedano l'uso di tecniche tradizionali e/o innovative, strategie di controllo passivo, ecc.;
- l'impiego di tecniche di monitoraggio che consentano l'acquisizione *real time* di grandezze

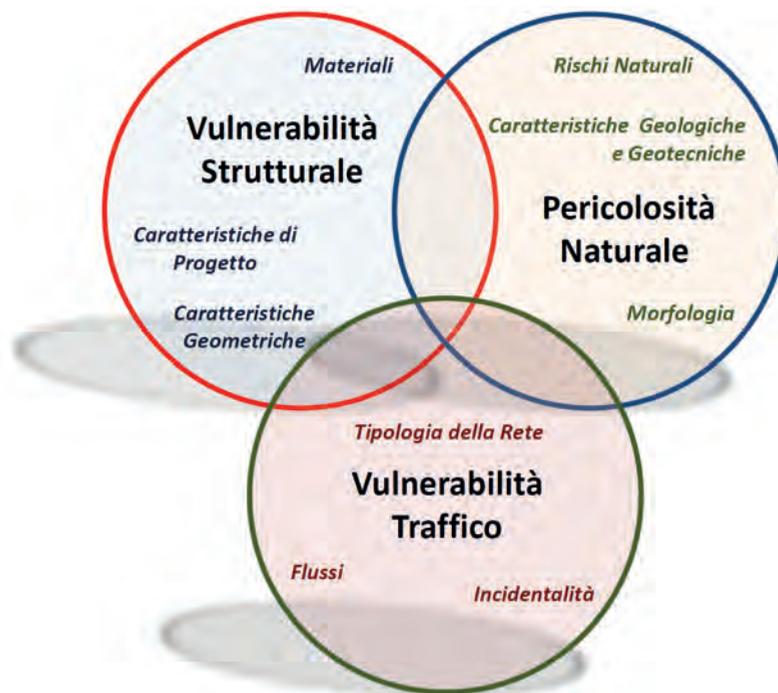


Fig. 2 - Aspetti della valutazione del rischio.

statiche e dinamiche, basate su algoritmi di controllo e sensoristica a basso costo ed a basso consumo;

- la gestione in tempo reale del rischio e della emergenza basata su sistemi *early warning*.

In tal modo un sistema di supporto decisionale di gestione si propone tra i suoi obiettivi di calcolare le perdite economiche nel caso di un danneggiamento significativo, di individuare le strutture/infrastrutture più vulnerabili (Castelli *et al.*, 2017) e determinare i criteri di prioritizzazione per la gestione della manutenzione in larga scala.

Questo strumento consente, pertanto, una rapida valutazione delle perdite attese per il sistema in esame, con la relativa disaggregazione dei costi e la prioritizzazione del rischio, sulla base di un prescelto scenario di danno. Possono così essere evidenziate le strutture che potenzialmente potrebbero contribuire ai costi di riparazione, e questo può essere considerato come un indice della loro vulnerabilità. Nella gestione post-evento un mezzo con queste caratteristiche consente la rapida valutazione della prestazione del sistema a valle dello scenario accaduto, la conoscenza dello stato di efficienza e la sua affidabilità in termini di sicurezza strutturale e/o funzionale.

I passaggi successivi di questo schema metodologico di riferimento saranno finalizzati all'accertamento di un possibile stato di crisi dell'opera connesso al raggiungimento di uno stato limite ultimo o di esercizio, oppure all'esigenza di migliorarne la prestazione. Quest'ultima può derivare da un incremento della domanda, dall'analisi della funzionalità globale in dipendenza ad aspetti strategici fondamentali, oppure dalla necessità di adeguamento alle nuove normative tecniche.

3. Applicazioni

La struttura di un *Decision Support System (DSS)* prevede la presenza di alcuni moduli operativi specifici, ovvero: *a)* un'interfaccia utente per indicare all'operatore che il sistema ha individuato la presenza di uno o più scenari attivi per i quali è possibile un intervento tramite l'attuazione di una determinata misura; *b)* un database per la raccolta dei dati registrati, e che trasmetta anche le informazioni necessarie per il funzionamento dei modelli. Il sottosistema è completato da un centro di acquisizione ed elaborazione dati che, sulla base delle grandezze misurate e delle indicazioni dei modelli, sia in grado di valutare la situazione di pericolo fornendo i relativi livelli di criticità.

Oltre alle basi di dati, un modello *DSS* è caratterizzato da "criteri di base", che contengono le procedure necessarie a risolvere il problema. La funzione è quella di fornire uno schema logico al processo di elaborazione, in modo da razionalizzare il processo decisionale basandolo su soluzioni analitiche. Il modello si basa sulla definizione di parametri numerici che rappresentano in modo sintetico il livello di rischio a cui è esposto un bene come combinazione dell'"indice di pericolosità" e dell'"indice di vulnerabilità".

La struttura decisionale è articolata in diverse parti: la prima sviluppa il calcolo di un "*indice di rischio*" attraverso la vulnerabilità e la pericolosità, ambedue ulteriormente articolate in altre attività; la seconda è rappresentata dalla scelta delle alternative. I dati di input del modello derivano da calcoli condotti sulla base dei valori necessari per definire l'esposizione, la pericolosità e la vulnerabilità di beni o opere soggetti, ad esempio, a fenomeni naturali come sismi o frane.

Il sistema fa riferimento a tre scenari, che possono scaturire in seguito all'attivazione di eventi significativi/rappresentativi in termini di intensità ed estensione, e che possono interessare strutture e/o infrastrutture individuate come strategiche:

- Allerta 1: previsione di un dissesto che rimane confinato e che non ha impatto sulla viabilità e/o su edifici strategici;
- Allerta 2: previsione di un dissesto con un marginale interessamento di strutture strategiche;
- Allerta 3: previsione di un dissesto che potrebbe causare gravi danni alle strutture strategiche.

Il rischio dipende da una serie di informazioni disponibili, come la localizzazione territoriale del fenomeno, i dettagli dell'area interessata, il livello di esposizione.

La scelta della misura gestionale si basa sul livello di rischio associato ad uno specifico scenario instauratosi in seguito all'innescio dell'evento dannoso.

Il sistema *DSS* permette di aumentare l'efficacia dell'analisi e di individuare la soluzione più appropriata. L'operatore, in base alle evidenze, sceglierà di adottare la misura gestionale corrispondente e di supportare le conseguenti misure di riduzione del rischio. Il sistema, infine, deve permettere di estrarre rapidamente ed in maniera versatile le informazioni utili ai processi decisionali provenienti dall'elaborazione dei dati, nonché di definire schematicamente l'organizzazione delle grandezze memorizzabili, modificarle, gestirle permettendo una semplice estrazione e valutazione, con l'obiettivo di aiutare l'utilizzatore a prendere decisioni, senza però sostituirsi ad esso. Alla decisione, infatti, bisogna pervenire combinando le valutazioni umane con le informazioni elaborate dal sistema.

BIBLIOGRAFIA

- Castelli F. (2017). *Aspetti geotecnici nella valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto*. Relazione Generale XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica “La Geotecnica nella Conservazione e Tutela del Patrimonio Costruito”. Sessione 2: Infrastrutture di Trasporto. Roma 20-22 Giugno 2017, AGI Ed., 55-113.
- Castelli F., Lentini V., Distefano G., Basile G., Panebianco M. (2017). *Una procedura semplificata per la valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture di trasporto: applicazione alla rete viaria siciliana*. XXVI Convegno Nazionale di Geotecnica “La Geotecnica nella Conservazione e Tutela del Patrimonio Costruito”. Roma, 20-22 Giugno 2017, AGI Ed., 879-886.
- Franchetti P., Pellegrino C., Soffiato A., Modena C. (2003). *La manutenzione programmata di ponti e viadotti: criteri per la valutazione dell'efficienza in servizio*. Atti XIII Convegno Nazionale della Società Italiana Infrastrutture Viarie (SIIV), Padova, Italia.
- Gori R. (2006). *Preservation of historical metal bridges: evaluation of their structural reliability*. Proceedings TICCIH Congress, September 2006, Terni, Italia.
- ISPRA - Istituto Superiore per la Ricerca e la Protezione Ambientale (2015). *Rapporto di sintesi sul dissesto idrogeologico in Italia*. Marzo 2015, RT/SUO-IST 014/2015, 15 p.

OR2

**Fiducia sociale
e prevenzione collettiva
dei rischi naturali:
due studi sperimentali**

Fiducia sociale e prevenzione collettiva dei rischi naturali: due studi sperimentali

F. PAGLIERI, R. FALCONE, S. FELLETTI e A. SAPIENZA

Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione, CNR, Roma

1. Introduzione

In questo contributo presentiamo, a titolo esemplificativo, due dei numerosi studi sperimentali condotti dal gruppo ISTC-CNR all'interno del progetto CLARA, in particolare nell'ambito dell'Obiettivo Realizzativo 2, "Fiducia, percezione del rischio e partecipazione attiva nel monitoraggio e nella prevenzione dei rischi naturali: modelli e simulazioni". Questo approccio sperimentale è servito da naturale complemento ai lavori di taglio modellistico, simulativo e partecipativo a loro volta compresi in OR2, nonché da necessario prerequisito alla fase applicativa del progetto CLARA. Per una rassegna più esaustiva sui contributi del gruppo ISTC-CNR al progetto, rimandiamo alle numerose pubblicazioni prodotte in merito negli scorsi anni, e in particolare: Giardini *et al.* (2015); Rissotto *et al.* (2015); Bonelli *et al.* (2016); Falcone *et al.* (2016); Felletti *et al.* (2017); Sapienza e Falcone (2017) e Felletti e Paglieri (2019).

La ricerca sul tema del rischio ha conosciuto un notevole impulso negli anni Settanta del secolo scorso, e a tutt'oggi continua a ricevere contributi da diverse discipline, dalle scienze naturali all'economia, dalla sociologia alla psicologia [per una panoramica generale sul tema, si veda Renn (2008)]. La vitalità dell'interesse per il tema riflette come, nelle moderne società, la questione riguardante la mitigazione dei rischi legati a tecnologie, attività, o calamità naturali, sia tra le principali preoccupazioni tanto dei cittadini quanto delle istituzioni.

Le istituzioni che si occupano della gestione del rischio svolgono un compito molto delicato, come dimostra il clima di scontento e sfiducia da parte dei cittadini che si viene spesso a creare in seguito a falsi allarmi o a episodi di crisi mal gestiti (Slovic, 1993). I frequenti conflitti tra cittadini e istituzioni sul tema della gestione del rischio sono dovuti principalmente a due questioni, riconducibili a due fasi distinte del processo di *risk management*.

La prima questione riguarda la valutazione del rischio: se da una parte i tecnici e gli esperti utilizzano evidenze sperimentali, dati statistici e calcoli complessi per fornire stime del rischio che siano il più possibile obiettive, analitiche, razionali, e quindi più vicine al rischio 'reale', la stima del rischio da parte del pubblico si basa invece sull'intuizione, che per definizione è soggettiva. La percezione del rischio è influenzata da una serie di fattori interni ed esterni ad esso: caratteristiche dell'evento rischioso e del contesto, fattori psicologici e background culturale dell'individuo, asimmetrie informative ed epistemiche (il cittadino, inevitabilmente, ha informazioni e competenze diverse rispetto all'esperto).

La marcata incongruenza tra la stretta limitazione dell'analisi tecnica alle sole conseguenze materiali e misurabili (perdita di vite umane, danni economici) e l'ampia gamma di variabili prese in considerazione – più o meno volontariamente – dai cittadini (incertezza, temibilità, controllabilità, potenziale catastrofico, familiarità con il rischio, equa o iniqua distribuzione di rischi e benefici) è spesso causa del deterioramento della fiducia dei cittadini nei confronti sia degli esperti che delle istituzioni (Slovic, 1999).

Un altro problema riguarda la fase della comunicazione istituzionale del rischio, che non sempre riesce nel suo intento di rendere la società consapevole dei rischi, a causa di sviste, errori o leggerezze da parte delle fonti istituzionali (p. es. la sovrastima della comprensione del rischio nel pubblico: Sjöberg, 1999, 2000) o a causa di un basso grado di fiducia da parte del pubblico nella competenza e nella *fairness* delle istituzioni nella gestione di quel dato rischio (Slovic, 1993; Lion, 2001; Joffe, 2003). Questa mancanza di fiducia può intervenire sia come problema a monte (ovvero: le istituzioni devono far fronte alla comunicazione del rischio consapevoli di avere scarsa fiducia da parte del pubblico), sia come effetto collaterale (la scarsa abilità nel comunicare efficacemente i rischi può deteriorare la fiducia del pubblico nei confronti delle istituzioni che li comunicano e, di conseguenza, la motivazione del pubblico a cooperare). Questo problema ci dà un'ulteriore indicazione del fatto che la fiducia e la credibilità delle fonti dei messaggi costituiscono un aspetto fondamentale del processo di comunicazione del rischio ed entrambe dovrebbero essere co-costruite e mantenute prima e durante qualsiasi comunicazione o gestione di un rischio.

2. La valutazione del rischio: stima oggettiva o costruzione sociale?

La questione che sta alla base della ricerca sulla percezione del rischio, e anche una delle più dibattute, riguarda la definizione dell'esatta natura del rischio.

Tutti i numerosi approcci alla ricerca sul rischio, derivanti dal contributo di diverse discipline, ricadono in una di due principali categorie, a seconda dallo status attribuito al concetto di rischio. Mentre gli approcci più 'scientifici', derivanti dai campi dell'economia, dell'ingegneria e delle scienze naturali, vedono il rischio come un fenomeno extra-mentale, oggettivo e misurabile, i contributi provenienti dalle scienze sociali e dalla psicologia lo concepiscono come un oggetto mentale o un concetto socialmente costruito, suscettibile quindi di influenze derivanti da inclinazioni individuali e contestuali e da fattori culturali (Renn, 1998).

Qualunque sia l'interpretazione che se ne vuole dare, la variabilità nella percezione del rischio sia tra gruppi di popolazione che tra singoli individui resta un fenomeno innegabile (Brehmer, 1994), così come il fatto che la percezione del rischio dei non esperti, per quanto non in linea con le stime tecniche, è ciò che sta alla base dei loro giudizi sulla tollerabilità dei rischi, e sull'opportunità di adottare misure di prevenzione suggerite a livello istituzionale.

Nel gestire i rischi per la società si dovrà quindi tener conto di entrambe le visioni di rischio, e di entrambe le interpretazioni di quali rischi richiedano interventi di mitigazione e protezione.

Alcuni pionieristici lavori in quello che viene definito "approccio psicometrico" allo studio della percezione del rischio (Fischhoff *et al.*, 1978; Slovic *et al.*, 1980) hanno riscontrato come le caratteristiche qualitative dei rischi (volontarietà, fatalità, controllabilità, potenziale catastrofico, livello di conoscenza personale del fenomeno, novità della pratica o dell'evento, imprevedibilità) siano riconducibili a due macro-fattori, su cui le persone si basano principalmente per stimare i rischi e classificarli semanticamente: la "minacciosità" (risultante da una serie di fattori quali incontrollabilità, potenziale catastrofico, pericolo per le future generazioni) e la conoscibilità del rischio (novità, consapevolezza da parte degli individui ad esso esposti, ritardo nella comparsa degli effetti negativi).

Altri studi si sono concentrati poi sugli effetti di fattori individuali come età, genere, livello di educazione, valori, attitudini e status socio-economico (Gustafson, 1998; Rohrmann, 2000;

Barnett e Breakwell, 2001). In una rassegna di lavori sulla percezione dei rischi naturali, Wachinger e colleghi (Wachinger *et al.*, 2013) sostengono però che mentre gli aspetti di tipo culturale ed individuale agiscono generalmente come moderatori o amplificatori della percezione del rischio, ci sono due fattori che più di tutti sono determinanti nel formare la percezione del rischio dei cittadini: l'esperienza pregressa con un disastro e la fiducia nelle istituzioni e nelle loro strategie di mitigazione del rischio.

Il modo in cui esperienza e fiducia influenzano la percezione del rischio e i conseguenti comportamenti non è univoco, e può apparire talvolta paradossale (Wachinger *et al.*, 2013). L'esperienza diretta può avere l'effetto di aumentare il livello di rischio percepito (Plapp e Werner, 2006; Grothmann e Reusswig, 2006), rinforzando l'attitudine ad adottare misure preventive, ma in alcuni casi può generare l'effetto opposto: la scarsa severità del rischio esperito o l'assenza di danni, ad esempio, possono portare ad un falso senso di sicurezza o a sovrastimare le proprie capacità di far fronte al pericolo, e di conseguenza ad una sottostima del rischio (Mileti e O'Brien, 1993; Halpern-Felsher *et al.*, 2001).

D'altro canto, la fiducia negli scienziati e nei tecnici, nelle istituzioni che gestiscono i rischi e nelle misure di protezione adottate ha un ruolo importante nella percezione dei cittadini, che si affidano al parere esperto soprattutto quando ritengono di non essere sufficientemente informati per prendere le loro decisioni in modo indipendente. La fiducia diventa quindi una 'scorciatoia' per ridurre l'incertezza, per cui quando vi è scarsa conoscenza del rischio, e quindi maggiore incertezza, i cittadini sono più inclini a seguire le direttive delle istituzioni e dei tecnici che ritengono affidabili (Siegrist e Cvetkovic, 2000; Visschers e Siegrist, 2008). Il paradosso in questo caso sta nel fatto che, soprattutto nei casi in cui si attribuisce alle istituzioni gran parte della responsabilità nel creare e mantenere misure di contenimento del rischio, un alto livello di fiducia può portare a un eccessivo senso di sicurezza, e quindi a trascurare l'importanza dell'adozione di misure preventive a livello individuale (Whitmarsh, 2008).

Queste ambiguità suggeriscono che l'effetto causale dell'esperienza diretta e della fiducia nelle istituzioni sui comportamenti di prevenzione dei rischi ambientali sia *mediato da rappresentazioni cognitive*, anziché configurarsi come causazione diretta e rigida. In particolare, esperienza passata e fiducia istituzionale avranno effetti diversi sul comportamento a seconda delle specifiche interpretazioni di tali fattori (disastri passati come segno di pericolosità vs. superamento favorevole di tali disastri come indicatore di sicurezza; fiducia come soluzione all'incertezza vs. fiducia come incentivo a delegare ad altri la prevenzione), nonché delle conseguenze ulteriori di tali comportamenti che il soggetto anticipa e che possono, eventualmente, motivarne la condotta. Per esempio, un comportamento di prevenzione può, nelle adeguate circostanze, segnalare ad altri la natura virtuosa dell'agente (o viziosa, qualora faccia *free riding* sulla cooperazione altrui), e proprio tali considerazioni reputazionali potrebbero spingere ad adottare tale comportamento, in aggiunta o persino a prescindere dagli effetti preventivi dell'azione.

Tutto ciò dimostra l'importanza di studi sperimentali sulle specifiche variabili considerate, analizzate in diversi contesti sociali. Gli studi qui presentati partono dal modello socio-cognitivo della fiducia elaborato da Castelfranchi e Falcone (2010) e lo applicano al contesto dei rischi naturali, per indagare il ruolo della fiducia nel formare la percezione individuale del rischio e nell'influenzare la decisione in situazioni rischiose, nel contesto di rischi sismici e alluvionali. Nello specifico, viene presa in esame la fiducia dei soggetti testati verso altri cittadini coinvolti nel processo di prevenzione del rischio.

Il primo studio utilizza un compito di decisione cooperativa ispirato al paradigma del *public goods game* dell'economia sperimentale, per indagare gli effetti della fiducia nei pari quando questa è coinvolta direttamente nel processo di valutazione di una situazione rischiosa. Le dinamiche di cooperazione che si osservano in presenza di fiducia vengono poi approfondite nel secondo studio.

3. Primo studio: Fiducia e prevenzione del rischio

PARTECIPANTI: Questo studio è stato condotto su 96 studenti universitari reclutati presso l'Università degli Studi di Roma Tre (66 femmine, 30 maschi, età media: 20.9), senza precedenti esperienze traumatiche di catastrofi naturali.

PROCEDURA E MATERIALI: La somministrazione del test è avvenuta su supporto video, tramite l'utilizzo del software E-Prime 2.0. I test si sono svolti in laboratorio e singolarmente.

Lo studio prevedeva quattro compiti, di cui tre corrispondevano alla realizzazione in formato elettronico di varie scale psicometriche standard (lotterie equitili e scala della fiducia sociale di Yamagishi, vedi Yamagishi, 1986), più una messa a punto specificamente nell'ambito del progetto CLARA per la rilevazione della fiducia nelle istituzioni preposte alla gestione dei rischi naturali (Natural Risk Trust scale, NaRT): per dettagli su queste scale, si rimanda a Felletti *et al.* (2017).

Lo studio introduceva poi un nuovo compito per indagare la percezione e le attitudini al rischio nel dominio dei disastri naturali: un gioco reiterato simile al *public goods game*, un paradigma standard dell'economia sperimentale (Camerer, 2003). La particolarità del gioco consisteva nel fatto che, al fine di prendere la decisione migliore (in termini di utilità attesa), i soggetti dovevano compiere valutazioni sia sulla rischiosità della situazione, sia sull'affidabilità della loro controparte.

Ad ogni turno, il partecipante insieme alla sua controparte, che veniva presentata come il vicino di casa ed era operata dal computer, dovevano decidere indipendentemente e contemporaneamente se investire o meno del denaro per mettere in sicurezza l'edificio dove risiedevano e che condividevano, in vista di un possibile imminente terremoto o alluvione. I partecipanti venivano informati che la loro abitazione si trovava in un'area ad alto rischio sismico o alluvionale, e che ad ogni turno vi era una probabilità del 10% che avvenisse un terremoto o un'alluvione, che avrebbe provocato gravi danni se la casa non fosse stata preventivamente messa in sicurezza.

Ai due giocatori venivano assegnate, all'inizio di ogni turno, 15 unità di denaro (UD), che potevano essere tenute e accumulate al fine di vincere un premio destinato ai migliori giocatori, o da cui si poteva attingere per contribuire ai lavori di messa in sicurezza dell'edificio. L'investimento rendeva la casa sicura per un singolo turno di gioco e per entrambi i giocatori, e aveva un costo totale di 10 UD. In caso di evento disastroso, se la casa era stata messa al sicuro i partecipanti non subivano alcuna perdita; in caso contrario, entrambi pativano un danno pari a 135 UD.

Il gioco si ripeteva per 10 turni e in due condizioni (within-subjects):

- Nella *condizione Baseline*, i giocatori potevano decidere di investire 10 UD (e quindi tenere i restanti 5 per sé) o di tenere l'intera somma (15 UD). In questa condizione perciò, bastava che uno solo dei giocatori decidesse di investire per mettere al sicuro entrambi;
- Nella *condizione Cooperativa*, in aggiunta alle due opzioni presenti nella Baseline vi era l'ulteriore possibilità di investire 5 UD (tenendone 10 per sé). Abbiamo etichettato questa

sceita ‘investimento cooperativo’, dal momento che la sua utilità dipendeva dal fatto che anche l’altro giocatore investisse almeno 5 UD. Infatti, se l’investimento totale non avesse raggiunto 10 UD, i lavori di messa in sicurezza non avrebbero avuto luogo, lasciando entrambi i soggetti esposti al rischio ambientale e facendo comunque sprecare i 5 UD investiti.

Dopo ogni turno i partecipanti venivano informati della scelta effettuata dal loro vicino, del verificarsi o meno dell’evento catastrofico, e degli esiti conseguenti in termini di payoff: i vari esiti possibili sono riportati in Fig. 1, relativamente alla condizione Cooperativa con rischio sismico.

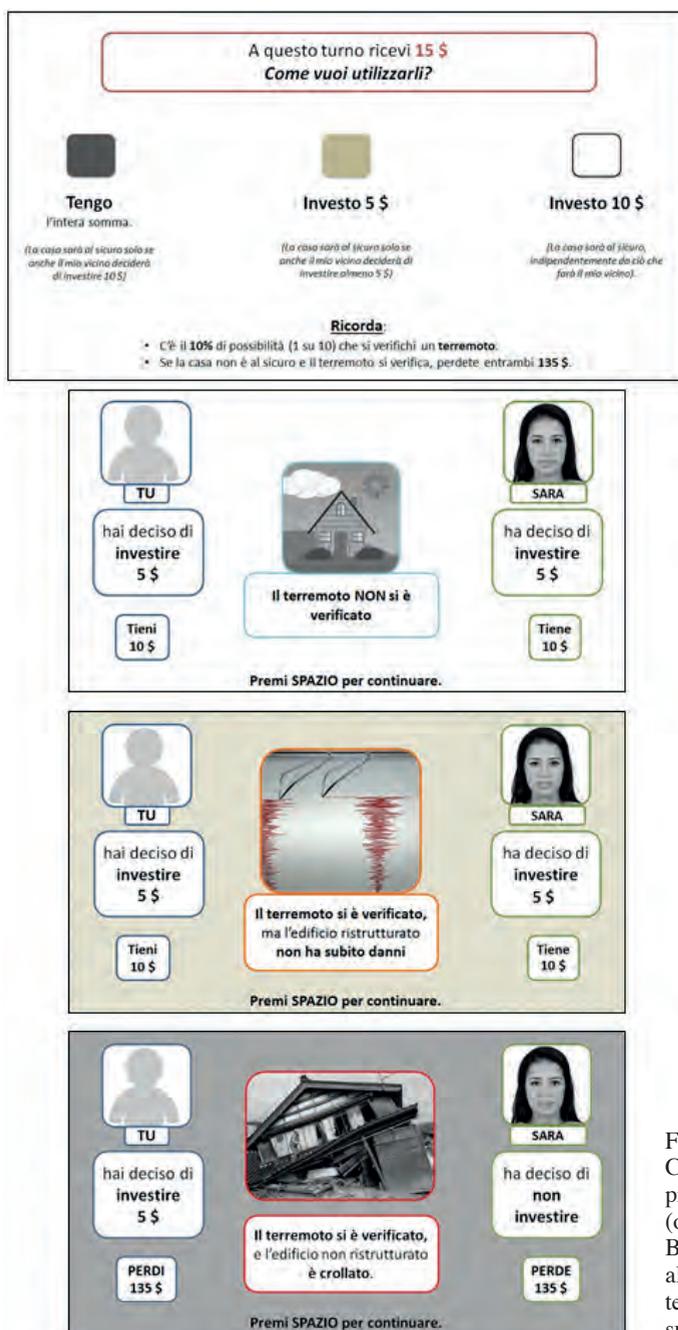


Fig. 1 - Schermate del compito nella condizione Cooperativa. Dall’alto: domanda con presentazione delle alternative di decisione (opzione 5 UD non disponibile nella condizione Baseline), e i tre diversi feedback conseguenti alla scelta del soggetto: assenza di terremoto, terremoto con danni evitati, terremoto con danni subiti (studio 1).

Sia l'aspetto che il comportamento del vicino erano controllati dal software, ed erano manipolati in modo tale da rispecchiare l'aspetto e il comportamento di individui affidabili o inaffidabili.

I vicini *affidabili* investivano nella quasi totalità dei casi:

- Condizione Baseline: 10 UD nell'80% dei casi e comunque sempre al primo turno, 0 UD nel 20%;
- Condizione Cooperativa: 10 UD nel 20% dei casi, 5 UD nel 60% e comunque sempre al primo turno, 0 UD nel 20%.

I vicini *inaffidabili* invece investivano raramente:

- Condizione Baseline: 10 UD nel 20% dei casi, 0 UD nell'80% e comunque sempre al primo turno;
- Condizione Cooperativa: 10 UD nel 20% dei casi, 0 UD nell'80% e comunque sempre al primo turno.

I visi dei vicini, utilizzati per indurre un sentimento di affidabilità o inaffidabilità in accordo con la loro condotta, provenivano da un database già testato con soggetti americani (Ma, Correll e Wittenbrink, 2015), ed erano stati preventivamente sottoposti dagli autori ad un'ulteriore selezione mediante uno studio pilota su un campione di 57 soggetti italiani. Per escludere effetti di genere, sono stati usati sia volti maschili che femminili: in Fig. 2 riportiamo i volti utilizzati nelle varie condizioni.

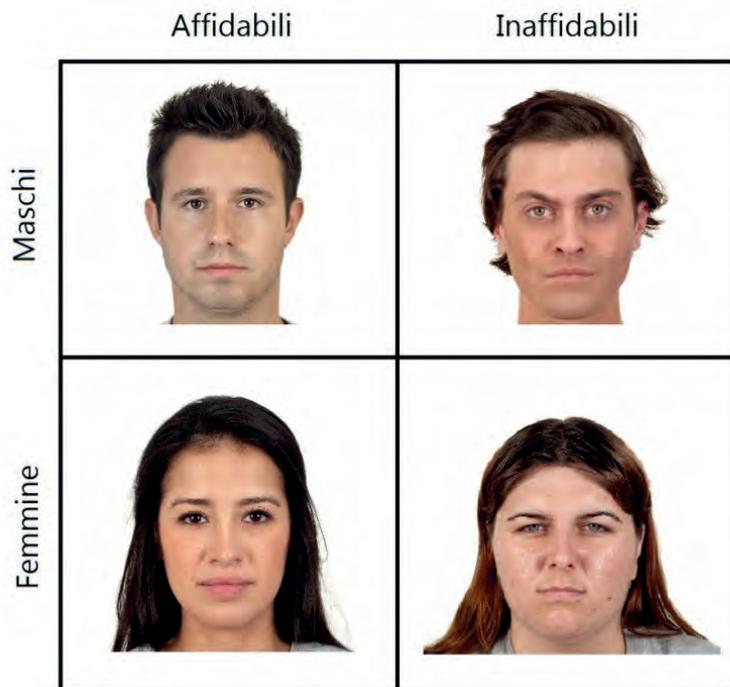


Fig. 2 - Visi maschili e femminili, affidabili e inaffidabili, utilizzati nel compito (studio 1).

Ogni soggetto partecipava a due sessioni di gioco da 10 turni ciascuna, una nella condizione Baseline e una in quella Cooperativa, ognuna con un vicino di diverso genere e affidabilità, controbilanciando abbinamento e ordine di presentazione.

IPOTESI DI RICERCA: Le principali ipotesi di ricerca riguardavano le relazioni fra fiducia nella controparte e scelte di investimento in sicurezza. In particolare, ci si aspettava di osservare:

- *maggiori investimenti in sicurezza in presenza di vicini affidabili* anziché inaffidabili, sia nella condizione Baseline che in quella Cooperativa, in contrasto con un modello di massimizzazione dell'utilità attesa (che indica il *free riding* su individui collaborativi come strategia ottimale) e in linea con precedenti risultati sperimentali in giochi analoghi, quali il trust game (Camerer, 2003);
- *aumento di investimenti in sicurezza e contemporanea riduzione di spreco collettivo di risorse quando si consentono soluzioni cooperative*, ma solo in situazioni caratterizzate da mutua fiducia: la tendenza a investimenti maggiori con vicini affidabili, sopra ipotizzata, porta ad allocazione inefficiente di risorse nella condizione Baseline, giacché spesso entrambi investiranno quando basterebbe che lo facesse uno (*over-investment*); ci si aspetta che le possibilità di convergenza su una soluzione sicura e più conveniente (investire entrambi 5 UD) vengano sfruttate dai partecipanti, ma anche che ciò possa avvenire solo in presenza di fiducia – giacché investire 5 UD quando l'altro non investe nulla è il peggiore degli esiti possibili.

RISULTATI: Il gioco di investimento cooperativo, includendo nello stesso processo decisionale sia valutazioni sulla rischiosità della situazione, sia giudizi circa l'affidabilità della controparte, ha permesso di testare l'ipotesi di un rapporto tra i due costrutti di fiducia e rischio. Un'ANOVA 2x2 (Vicino: Affidabile/Inaffidabile x Condizione: Baseline/Cooperativa) ha mostrato come un alto livello di fiducia nel co-decisore portasse i partecipanti ad investire più spesso in sicurezza (qualunque cifra), in entrambe le condizioni ($F(1,94) = 9,941$, $p = 0,002$; Fig. 3, grafico a sinistra). Inoltre, nella condizione Cooperativa la disponibilità di un'alternativa meno costosa ma potenzialmente efficace per mettere in sicurezza la casa (investire 5 UD) ha fatto sì che in questa condizione si investisse in generale più spesso rispetto alla condizione Baseline ($F(1,94) = 21,861$, $p < 0,0001$; Fig. 3, grafico a sinistra).

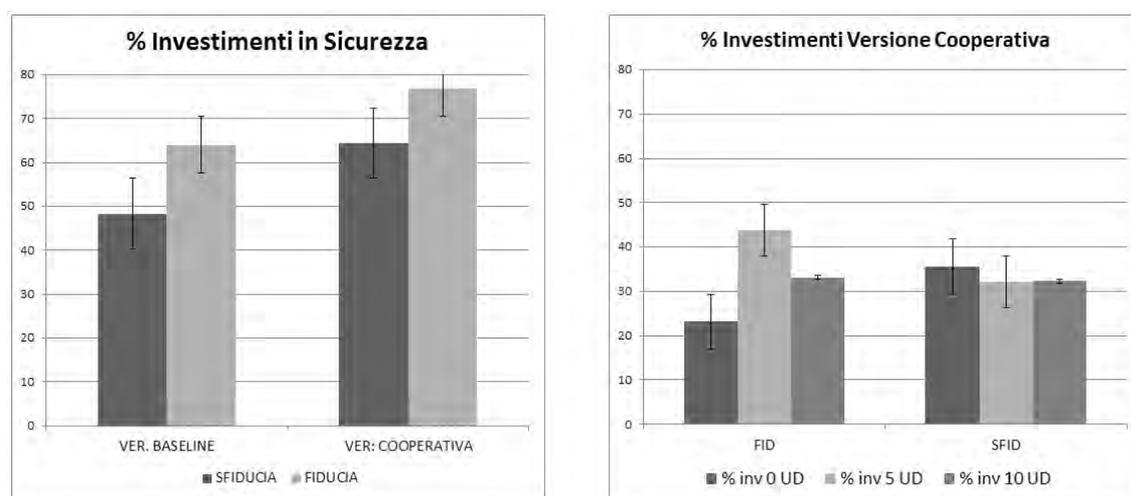


Fig. 3 - Investimenti in sicurezza nelle condizioni Baseline e Cooperativa (studio 1).

In Fig. 3, il grafico a destra si concentra sulle scelte nella condizione Cooperativa: qui l'opzione di investimento cooperativo da 5 UD, che più di tutti richiedeva una valutazione circa l'affidabilità della controparte, senza il cui contributo l'investimento sarebbe stato vano, veniva preferita più spesso nelle sessioni di gioco con vicino affidabile rispetto a quelle con vicino inaffidabile (rispettivamente, il 43,75% delle volte contro il 32,1%; $t(94) = +2,4$, $p = 0,018$). In questa condizione, quindi, la presenza di fiducia spingeva i partecipanti ad adottare la soluzione più conveniente "quando ci si fida che l'altro farà la sua parte", mettendo al sicuro l'edificio con metà della spesa necessaria a farlo individualmente.

Tale interpretazione non può però giustificare la propensione dei soggetti ad investire più spesso in sicurezza con co-decisorî affidabili nella versione *Baseline* del gioco, dove non vi era alcun vantaggio nell'investire con chi lo faceva a sua volta. In questo caso, infatti, i vicini affidabili provvedevano da soli a mettere in sicurezza l'intero edificio a loro spese, in 8 round su 10. In questa condizione era perciò semplice e piuttosto allettante approfittare dei vicini affidabili (*free riding*), ed era possibile e strategicamente vantaggioso tenere per sé il denaro senza correre un eccessivo rischio. Ciononostante i partecipanti, anziché agire come *free rider*, sceglievano sistematicamente di investire più spesso con vicini affidabili, anche quando la tendenza di questi ad investire, nelle fasi avanzate del gioco, diveniva chiara ($t(94) = +2,73$, $p < 0,001$): tale apparente "irrazionalità della fiducia" è peraltro ben documentata in quasi tutti i giochi economici di tipo cooperativo, a cominciare proprio dal cosiddetto *trust game* (Fehr e Gächter, 2000).

L'aspetto svantaggioso di questo fenomeno è tuttavia la dispersione di risorse: la tendenza a investire di più con un vicino affidabile, anche quando non ce ne sarebbe bisogno per mettere in sicurezza la casa, porta non solo a rinunciare a un vantaggio personale (il che può essere encomiabile), ma anche a uno spreco oggettivo di denaro (il che può facilmente tradursi in uno sperpero di risorse collettive). Inoltre, la scelta di investire, nella condizione *Baseline*, rimane di ambigua interpretazione rispetto alla dimensione della fiducia, giacché può indicare sia sfiducia (investo io perché penso che tu non lo farai), sia fiducia (investo perché non voglio mostrarmi meno cooperativo di quanto mi aspetto tu sia). I risultati suggeriscono che la seconda interpretazione sia più vicina alle intenzioni dei partecipanti: presumibilmente i soggetti, avendo a disposizione una sola opzione per contribuire, preferivano usare tutto il denaro pur di non dare un segnale di scarsa collaborazione o iniquità ad un vicino affidabile.

I dati riguardanti la condizione Cooperativa del gioco dimostrano come, dando la possibilità ai soggetti di operare una scelta che segnali cooperazione ma che sia anche meno onerosa ed eviti inutili sprechi, questi sfruttano sistematicamente l'opportunità. In particolare, un'ANOVA *within-subjects* Condizione (*Baseline/Cooperativa*) × Fiducia (*Affidabile/Inaffidabile*) sul numero di volte in cui le azioni dei partecipanti hanno consentito la messa in sicurezza della casa rivela un effetto della fiducia ($F(1,47) = 24,27$, $p < 0,0001$), coerentemente con quanto già osservato sulle scelte di investimento, ma anche un'interazione significativa ($F(1,47) = 5,13$, $p = 0,028$): con vicini affidabili, la condizione Cooperativa porta ad un aumento di casi (da 307 a 335) in cui il soggetto agisce in modo da mettere in sicurezza la casa rispetto alla condizione *Baseline*, mentre tale tendenza è invertita con vicini inaffidabili (da 232 a 194). Contemporaneamente, un'ANOVA 2×2 con le stesse variabili sulla spesa media complessiva per ottenere tale risultato (spesa complessiva sostenuta nei casi in cui il soggetto investe in sicurezza e la casa è in effetti al sicuro, divisa per il numero di tali casi) rivela, ovviamente, costi maggiori con vicini affidabili ($F(1,47) = 91,18$, $p < 0,0001$), ma anche costi inferiori nella condizione Cooperativa rispetto alla *Baseline*

($F(1,47) = 28,46, p < 0,0001$), nonché un'interazione significativa ($F(1,47) = 33,41, p < 0,0001$): in particolare, la condizione Cooperativa consente un abbattimento dei costi della sicurezza solo con vicini affidabili (da 17,8 a 12,7 UD), mentre ciò non avviene con vicini inaffidabili (da 11,4 a 11,1 UD). Ciò dimostra come in casi simili, non rari fuori dal laboratorio (si pensi al sistema tributario), la fiducia può promuovere dinamiche cooperative meno onerose e più efficienti: infatti nella condizione Cooperativa si osserva una *maggior sicurezza ambientale causata dalle scelte dei partecipanti* a fronte di una *minore spesa complessiva*, ma esclusivamente nelle condizioni in cui si ha fiducia nel partner.

Dallo studio emerge quindi un quadro in cui la fiducia è efficace nel promuovere la cooperazione: i soggetti sceglievano più spesso di investire quando si confrontavano con un vicino che faceva lo stesso. Ciò accadeva anche nei casi in cui questi erano consapevoli di poter sfruttare la situazione a proprio vantaggio, evitando di investire con chi ritenevano fosse disposto a sostenere interamente l'investimento. Anche in questi casi, i partecipanti sceglievano di investire le loro risorse, non solo per mettersi al sicuro da eventuali disastri, ma probabilmente anche per segnalare alla controparte la loro disponibilità a cooperare.

Ci sono due possibili interpretazioni del meccanismo che guida questo comportamento. Una prima è che gli individui siano mossi da *considerazioni di equità* o da un senso di dovere verso chi si mostra collaborativo. In questo caso i soggetti coopererebbero con una controparte affidabile per reciprocare il suo sforzo. Una seconda ipotesi è invece che i soggetti tendano ad investire più spesso con i vicini affidabili per *ragioni strategiche*, ossia per mostrarsi cooperativi e suscitare nell'altro un comportamento altrettanto cooperativo, sfruttando il meccanismo dell'altruismo reciproco (Trivers, 1971; Delton *et al.*, 2011). Scopo del secondo studio è dunque stato approfondire le motivazioni dell'atteggiamento cooperativo riscontrato nel primo studio.

4. Secondo studio: Fiducia e cooperazione nella prevenzione del rischio

PARTECIPANTI: Per investigare quale fosse il meccanismo che spingeva gli individui a collaborare con controparti affidabili senza alcun ritorno economico, abbiamo sottoposto la sola versione Cooperativa del test, con tre possibilità di investimento (0, 5 o 10 UD), ad un nuovo gruppo di 56 partecipanti (27 femmine, 29 maschi; età media: 22.0), senza alcuna particolare esperienza passata con catastrofi naturali.

PROCEDURA E MATERIALI: Abbiamo utilizzato lo stesso compito di scelta rischiosa, nella sola versione Cooperativa, per due sessioni di gioco da 10 round ciascuno, una con vicino affidabile, l'altra con vicino inaffidabile, controbilanciandone l'ordine di presentazione fra i soggetti. Abbiamo inoltre utilizzato due nuove condizioni, manipolate between-subjects:

- Una *condizione con Stesso Vicino (SV)*, con una controparte fissa per ogni sessione di gioco, una affidabile (stesso volto affidabile, investe 10 UD per due volte, 5 UD per sei volte, 0 UD per due volte), l'altra inaffidabile (stesso volto inaffidabile, investe 10 UD due volte e 0 UD otto volte), con genere e ordine di presentazione controbilanciati;
- Una *condizione con Diversi Vicini (DV)*, in cui ogni sessione era giocata con un partner differente ad ogni turno, tutti con lo stesso livello di affidabilità ma genere variabile, con un ordine di presentazione controbilanciato: quindi in una sessione il soggetto interagiva con 10 partner affidabili diversi (volti affidabili differenti, due di loro investono 10 UD, sei

di loro investono 5 UD, due di loro investono 0 UD), e nell'altra con 10 partner inaffidabili diversi (volti inaffidabili differenti, due di loro investono 10 UD, otto di loro investono 0 UD).

IPOTESI DI RICERCA: L'ipotesi esplorativa era che, se mossi da un sentimento di *fairness* o giustizia, i partecipanti avrebbero dovuto contribuire sempre ai lavori di messa in sicurezza, soprattutto con controparti che facevano lo stesso: quindi si dovrebbe osservare un aumento dell'investimento generalizzato con vicini affidabili, a prescindere dal fatto che si tratti dello stesso (SV) o di persone diverse (DV). Al contrario, se l'atteggiamento cooperativo fosse stato mosso da considerazioni di tipo strategico (per dare un segnale della propria inclinazione a cooperare e spingere la controparte a fare lo stesso), allora avrebbero dovuto investire considerevolmente più spesso quando tutti i turni erano giocati con la stessa controparte e vi era possibilità di reciprocazione: quindi l'effetto della fiducia dovrebbe attenuarsi o sparire nella condizione DV, rimanendo invece presente in SV.

RISULTATI: Un'ANOVA mista Condizione (SV/DV, between-s) × Fiducia (Affidabile/Inaffidabile, within-s) sulla differenza fra investimenti da 5 UD (l'opzione genuinamente cooperativa individuata nello studio precedente) e investimenti a 10 UD (l'opzione che in questa versione del gioco indica inequivocabilmente sfiducia nelle intenzioni cooperative del vicino) rivela un effetto principale della fiducia ($F(1,56) = 7,94, p = 0,0067$), nessun effetto della condizione e un'interazione significativa ($F(1,54) = 4,05, p = 0,049$).

Le analisi post hoc hanno mostrato che l'interazione derivava dal fatto che mentre la presenza di fiducia aveva un effetto positivo sulla decisione di investire nella condizione SV ($p = 0,008$), incrementando significativamente il numero di investimenti cooperativi rispetto all'opzione 10 UD, nella condizione DV l'affidabilità della controparte non influenzava la decisione di investimento dei soggetti (per un sintesi grafica dei risultati, si veda Fig. 4). Questo risultato conferma l'interpretazione strategica della scelta di cooperare con vicini affidabili, già osservata nel secondo studio, anziché approfittarne con operazioni di *free riding*: il fatto che l'affidabilità del vicino aumenti le scelte di investimento solo quando a ogni turno si continua a interagire

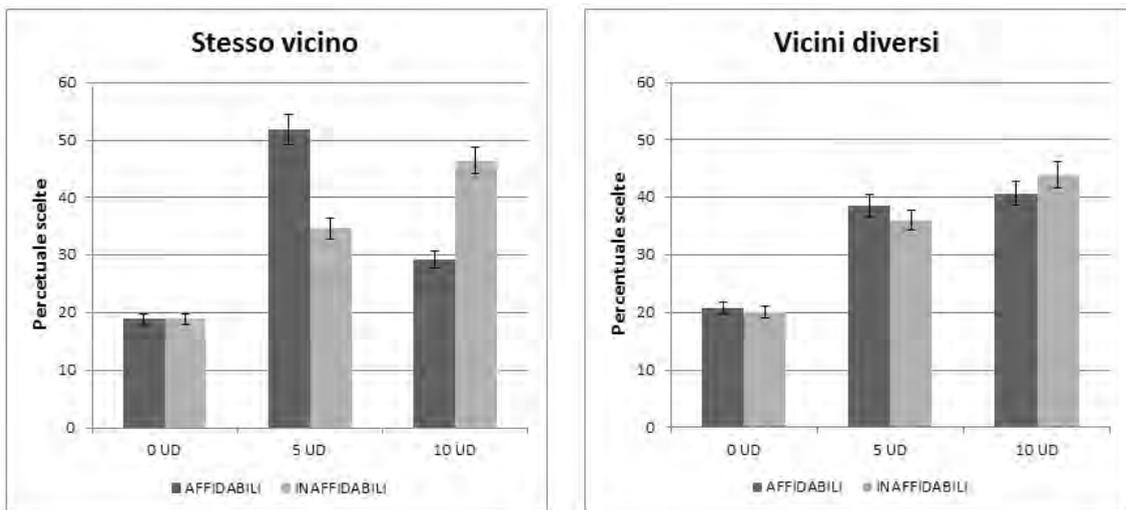


Fig. 4 - Investimenti in sicurezza in condizione con Stesso Vicino e con Diversi Vicini (studio 2).

con la stessa persona, mentre ciò non avviene cambiando di volta in volta vicini (nonostante rimanga immutata l'affidabilità), dimostra l'interesse a stabilire un regime di cooperazione con un partner stabile, consentendo al contempo di escludere motivazioni di equità o giustizia – che si applicherebbero anche alla condizione DV.

Sono state inoltre analizzate le reazioni dei partecipanti al disastro naturale, mediante un confronto tra la cifra media investita nei turni che precedevano e che seguivano il terremoto. Dall'analisi si è osservato che i partecipanti investivano in media di meno dopo il terremoto (media investimenti prima: 6,62 UD; media dopo: 5,58 UD; $t(99) = + 4,18$, $p < 0,0001$), mentre non vi era differenza fra le scelte di investimento successive al disastro in base al fatto che se ne fossero o meno subiti i danni. Il fatto che la riduzione degli investimenti dopo il disastro avvenisse sia in presenza che in assenza di danni esclude la possibilità che i partecipanti evitassero di investire con lo scopo di recuperare il denaro perso nel disastro. Invece, la nostra ipotesi è che i soggetti, nonostante avessero ricevuto precise istruzioni che la probabilità di accadimento del terremoto fosse costante ad ogni turno (10%), erano inconsciamente guidati da una *visione fatalista del rischio*, che li portava a credere che fosse meno probabile incappare nel terremoto quando questo era appena accaduto (al grido “un fulmine non cade due volte nello stesso posto!”). Questo meccanismo va ad aggiungersi alla lista di fallacie ed euristiche che possono distorcere la percezione del rischio (Finucane *et al.*, 2000; Kahneman *et al.*, 1982; Bar-Hillel, 1980), di cui le istituzioni che si occupano di prevenzione e comunicazione del rischio devono tenere conto affinché il messaggio sia efficace.

5. Discussione e conclusioni

Il contributo ha presentato due studi sperimentali che indagano il ruolo della fiducia nei processi di percezione del rischio e di comprensione dell'informazione sul rischio. Lo scopo del lavoro era duplice: da un lato, mostrare come la fiducia giochi un ruolo fondamentale nei processi di gestione del rischio, oltre ad essere un costrutto fondativo dell'interazione sociale, in cui contribuisce a promuovere conformità alle regole e cooperazione tra pari. Dall'altro lato, si intendeva anche mostrare come metodologie di tipo sperimentale possano dare un contributo importante alla conoscenza nel campo del rischio, con l'obiettivo di ridurre timori ingiustificati, aumentare la ricettività verso le comunicazioni di prevenzione e allerta, e favorire l'adozione di comportamenti adeguati nelle fasi di prevenzione e di crisi.

Nel primo studio, un compito cooperativo in cui fiducia e rischio erano coinvolti insieme nel medesimo processo decisionale ha messo in luce come i due costrutti possano effettivamente interagire in modi interessanti. In primo luogo, si è osservato come un sentimento di fiducia porti a maggiori investimenti economici in prevenzione di un rischio comune, in contrasto con quanto ipotizzato da modelli di massimizzazione dell'utilità attesa. Inoltre, si è visto come, introducendo soluzioni cooperative più economiche ma altrettanto efficaci, in presenza di fiducia (e solo in tal caso) si assiste ad un aumento degli investimenti e ad una contemporanea riduzione dello spreco di risorse collettive.

Il secondo studio ha voluto approfondire i meccanismi sottostanti l'aumento di investimenti e la cooperazione in condizioni di fiducia nella controparte: i dati hanno mostrato che i soggetti assumevano un comportamento significativamente più cooperativo in presenza di fiducia, ma solo

nel caso in cui era prevista un'interazione ripetuta con una stessa controparte con cui instaurare un rapporto di cooperazione. Al contrario, nel caso di interazioni ripetute ma con controparti differenti, la fiducia non aveva alcun effetto sulla tendenza a cooperare. Questo comportamento suggerisce che i partecipanti fossero spinti alla cooperazione non tanto da ragioni di equità o *fairness* (che avrebbero fatto registrare un risultato analogo nella condizione con controparti diverse), ma piuttosto da ragioni strategiche, ad esempio motivare la controparte a mantenere un atteggiamento cooperativo.

Nel complesso, tali risultati illustrano bene come studi sperimentali possano integrare studi basati su *survey* in popolazioni a rischio e non, al fine di fornire a istituzioni e comunità informazioni utili ad una più efficace gestione dei rischi sociali, derivanti non solo da catastrofi naturali, ma anche dalle moderne tecnologie o in ambito di salute pubblica.

In particolare, gli studi presentati forniscono due principali indicazioni in ottica applicativa:

- Nel progettare la prevenzione ai rischi naturali, favorire la creazione di *gruppi di scambio e dialogo* ristretti all'interno delle comunità, nei quali si possa instaurare un clima di cooperazione ai fini di un comune interesse per la sicurezza.
- Assicurarsi inoltre che tali gruppi di cooperazione siano relativamente *stabili nella loro composizione*, per beneficiare al meglio degli effetti della fiducia tra pari.

BIBLIOGRAFIA

- Bar-Hillel, M. (1980). The base-rate fallacy in probability judgments. *Acta Psychologica*, 44(3), 211-233.
- Barnett, J., e Breakwell, G. M. (2001). Risk perception and experience: hazard personality profiles and individual differences. *Risk Analysis*, 21(1), 171-178.
- Bonelli, L., Felletti, S., e Paglieri, F. (2016). From argumentative crisis to critical arguments: how to argue in the face of danger. In G. Rogova e P. Scott (Eds.), *Fusion Methodologies in Crisis Management* (pp. 365-387). Berlin: Springer.
- Brehmer, B. (1994). Some notes on psychological research related to risk. In *Future risks and risk management* (pp. 79-91). Springer Netherlands.
- Camerer, C. (2003). *Behavioral game theory: Experiments in strategic interaction*. Princeton University Press.
- Castelfranchi, C., e Falcone, R. (2010). *Trust theory: A socio-cognitive and computational model* (Vol. 18). John Wiley e Sons.
- Delton, A. W., Krasnow, M. M., Cosmides, L., e Tooby, J. (2011). Evolution of direct reciprocity under uncertainty can explain human generosity in one-shot encounters. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(32), 13335-13340.
- Falcone, R., e Sapienza, A. (2017). Interactions among information sources in weather scenarios: The role of the subjective impulsivity. In: *International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems* (pp. 56-69). Springer, Cham.
- Falcone, R., Sapienza, A., e Castelfranchi, C. (2016). Which information sources are more trustworthy in a scenario of hydrogeological risks: a computational platform. In: *Advances in Practical Applications of Scalable Multi-agent Systems. The PAAMS Collection* (pp. 84-96). Springer, Cham.
- Fehr, E., e Gächter, S. (2000). Fairness and retaliation: The economics of reciprocity. *The journal of economic perspectives*, 14(3), 159-181.
- Felletti, S., e Paglieri, F. (2019). Trust your peers! How trust among citizens can foster collective risk prevention. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101082.
- Felletti, S., Bonelli, L., Sapienza, A., Falcone, R., e Paglieri, F. (2017). Fiducia e rischi naturali: inquadramento teorico e studi sperimentali. *Sistemi Intelligenti*, 29(2), 313-350.
- Finucane, M. L., Alhakami, A., Slovic, P., e Johnson, S. M. (2000). The affect heuristic in judgments of risks and benefits. *Journal of behavioral decision making*, 13(1), 1.
- Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S., Read, S., e Combs, B. (1978). How safe is safe enough? A psychometric study of attitudes towards technological risks and benefits. *Policy sciences*, 9(2), 127-152.

- Giardini, F., Vilone, D., e Conte, R. (2015). Consensus Emerging from the Bottom-up: the Role of Cognitive Variables in Opinion Dynamics. arXiv preprint arXiv:1502.06430. In press for *Frontiers in Physics*.
- Grothmann, T., e Reusswig, F. (2006). People at risk of flooding: why some residents take precautionary action while others do not. *Natural hazards*, 38(1), 101-120.
- Gustafson, P. E. (1998). Gender Differences in risk perception: Theoretical and methodological perspectives. *Risk analysis*, 18(6), 805-811.
- Halpern-Felsher B. L., Millstein, S.G., Ellen, J.M., Adler, N.E., Tschann, J.M., e Biehl, M. (2001). The role of behavioural experience in judging risks. *Health Psychology*, 20(2), 120-126.
- Joffe, H. (2003). Risk: From perception to social representation. *British journal of social psychology*, 42(1), 55-73.
- Kahneman, D., Slovic, P., e Tversky, A. (1982). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lion, R. (2001). *Security or opportunity: the effects of individual and situational factors on risk information preference*. Maastricht: Maastricht University
- Ma, Correll, e Wittenbrink (2015). The Chicago Face Database: A Free Stimulus Set of Faces and Norming Data. *Behavior Research Methods*, 47, 1122-1135.
- Mileti, D. S., e O'Brien, P. (1993). Public response to aftershock warnings. *US geological survey professional paper*, 1553, 31-42.
- Plapp, T., e Werner, U. (2006). Understanding risk perception from natural hazards: examples from Germany. *Risk*, 21, 101-108.
- Renn, O. (1998). Three decades of risk research: accomplishments and new challenges. *Journal of risk research*, 1(1), 49-71.
- Renn, O. (2008). *Risk governance: coping with uncertainty in a complex world*. Earthscan, London, UK.
- Rissotto, A., Coli, E., e Norcia, M. (2015). Ruolo del sapere tecnico e del vissuto di catastrofe naturale nella rappresentazione sociale del rischio: primi risultati di una ricerca svolta nella provincia di Ferrara. *NEA-SCIENCE - Giornale Italiano di neuroscienze, psicologia e riabilitazione*. 2, 9, 19-20.
- Rohrmann, B. (2000). Cross-cultural studies on the perception and evaluation of hazards. In B. Rohrmann, e O. Renn (Eds.), *Cross-Cultural Risk Perception* (pp. 103-143). Springer, US.
- Sabel, C. F. (1993). Studied trust: Building new forms of cooperation in a volatile economy. *Human Relations*, 46, 1133-117
- Siegrist, M., e Cvetkovich, G. (2000). Perception of hazards: The role of social trust and knowledge. *Risk analysis*, 20(5), 713-720.
- Sjöberg, L. (1999). Risk perception by the public and by experts: A dilemma in risk management. *Human Ecology Review*, 1-9.
- Sjöberg, L. (2000). Factors in risk perception. *Risk analysis*, 20(1), 1-12.
- Slovic, P. (1993). Perceived risk, trust, and democracy. *Risk analysis*, 13(6), 675-682.
- Slovic, P. (1999). Trust, emotion, sex, politics, and science: Surveying the risk-assessment battlefield. *Risk analysis*, 19(4), 689-701.
- Slovic, P., Fischhoff, B., e Lichtenstein, S. (1980). Facts and fears: Understanding perceived risk. *Societal risk assessment: How safe is safe enough*, 4, 181-214.
- Trivers, R. L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *The Quarterly review of biology*, 46(1), 35-57.
- Visschers, V. H., e Siegrist, M. (2008). Exploring the triangular relationship between trust, affect, and risk perception: A review of the literature. *Risk Management*, 156-167.
- Wachinger, G., Renn, O., Begg, C., e Kuhlicke, C. (2013). The risk perception paradox - implications for governance and communication of natural hazards. *Risk analysis*, 33(6), 1049-1065.
- Whitmarsh, L. (2008). Are flood victims more concerned about climate change than other people? The role of direct experience in risk perception and behavioural response. *Journal of Risk Research*, 11(3), 351-374.
- Yamagishi, T. (1986). The provision of a sanctioning system as a public good. *Journal of Personality and social Psychology*, 51(1), 110.

OR3

**Sviluppo ed integrazione
di metodi innovativi per la tomografia
2D e 3D del sottosuolo
in aree urbane ed industriali**

Misure geofisiche realizzate in Piazza San Giovanni e nella Villa dell'Unità d'Italia a Matera

F. SOLDOVIERI¹, S. PISCITELLI², A. PERRONE², J. BELLANOVA², G. CALAMITA²,
I. CATAPANO¹, G. GENNARELLI¹, G. LUDENO¹, G. MORELLI³, G. CATANZARITI³,
E. LAURITI³ e G. GRAZIANO³

¹ Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR, Napoli

² Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, CNR, Tito Scalo (PZ)

³ Geostudi Astier srl, Livorno

1. Introduzione

Il presente contributo riporta i risultati relativi all'integrazione e all'interpretazione di dati geofisici acquisiti in due aree della città di Matera: Piazza San Giovanni, situata ai margini dell'antico rione dei Sassi, e nella Villa dell'Unità d'Italia, situata nell'area urbana.

La campagna di misure geofisiche è stata effettuata utilizzando due diverse tecniche di indagine, la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) ed il *Ground Penetrating Radar* (GPR), con lo scopo di sperimentare un protocollo di lavoro finalizzato alla diagnostica del sottosuolo urbano, in un'ottica di mitigazione del rischio geologico, idrogeologico e archeologico.

Le due metodologie di indagine hanno permesso di ricostruire con estremo dettaglio l'assetto geologico-strutturale dei primi metri di sottosuolo e di individuare la presenza di target antropici (sottoservizi) e naturali (cavità).

2. Aree di indagine

Il territorio dell'area urbana di Matera ricade in un contesto geologico-strutturale di transizione fra l'Avampaese Apulo e l'Avanfossa Bradanica (Fig. 1). L'Avampaese Apulo consiste di una potente successione carbonatica di piattaforma, prevalentemente di età cretacea, che costituisce il substrato del Gargano, delle Murge e del Salento. La città di Matera sorge al margine orientale dell'Avanfossa Bradanica, un'ampia depressione impostasi, nel Pliocene medio, nel substrato mesozoico costituito dai Calcari di Altamura e caratterizzato dalla presenza di due alti strutturali, uno nella zona a sud-ovest della città, denominato Horst di Zagarella (Tropeano, 1994), e l'altro a sud-est, detto Horst di Matera (Fig. 2). Sul substrato calcareo si sono sedimentati, in discordanza, depositi calcarenitici (Calcareniti di Gravina) e, in successione, materiali clastici fini rappresentati da argille marine pleistoceniche. Sovrapposti a queste ultime si rinvengono, a chiusura del ciclo sedimentario pliocenico-pleistocenico bradanico, depositi terrazzati sabbiosi e conglomeratici.

La prima area oggetto di indagine, Piazza San Giovanni (Fig. 3a), è ubicata al di fuori delle mura della città antica, in un'area dove affiorano estesamente i depositi calcarenitici, che raggiungono spessori fino a circa 40 m. La piazza ospita la Chiesa di San Giovanni Battista, un edificio di culto risalente all'epoca medioevale e considerato un gioiello architettonico per la raffinata composizione architettonica e la fine decorazione.

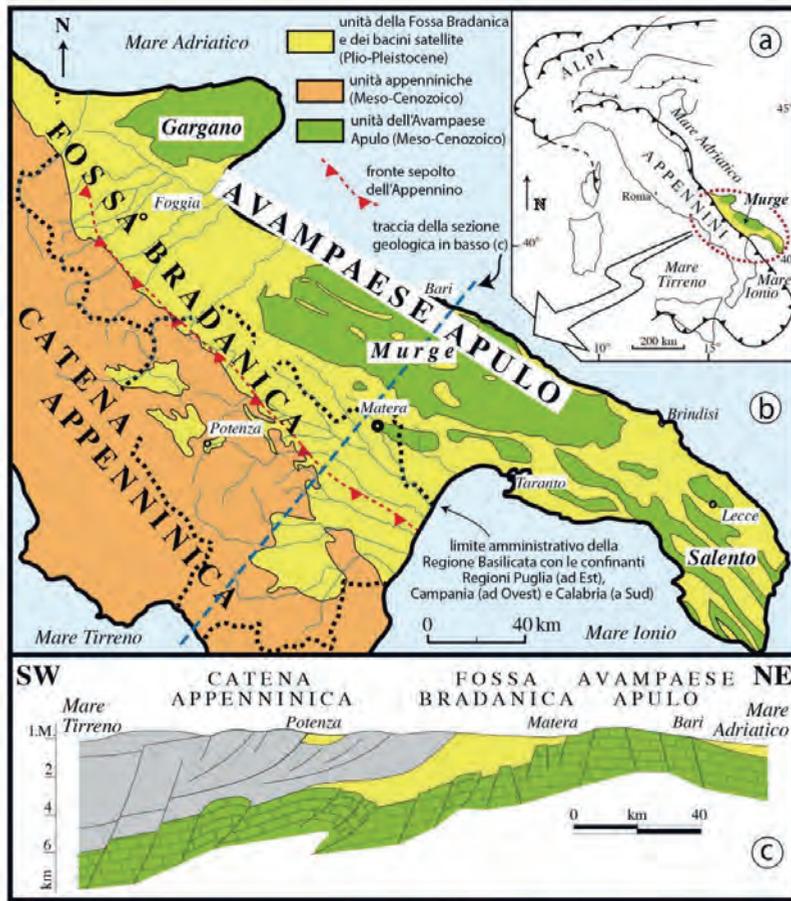


Fig. 1 - a) Posizione dell'Avampaese Apulo e della Fossa Bradanica lungo la penisola italiana; b) schema geologico dell'Italia meridionale (da Pieri *et al.*, 1997, mod); c) sezione geologica schematica dell'Italia meridionale (da Sella *et al.*, 1988, mod.).

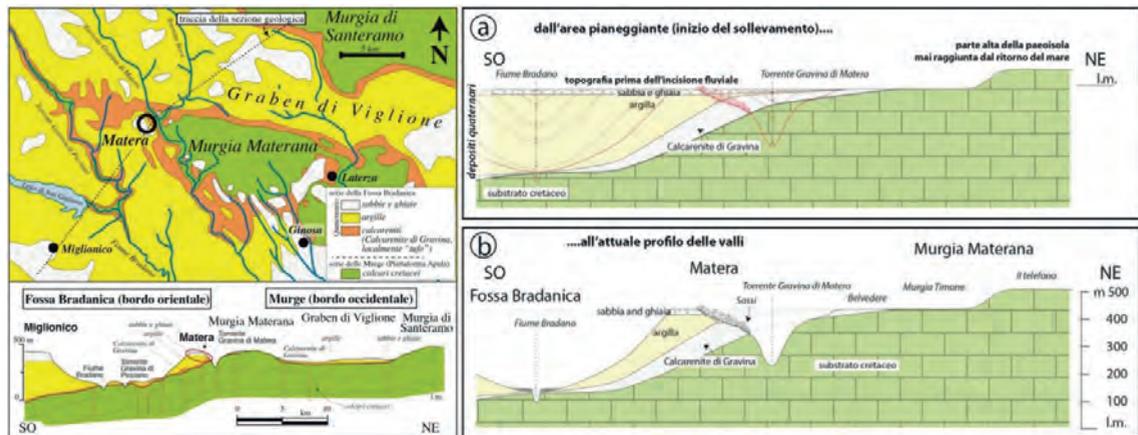


Fig. 2 - Mappa e sezione geologica schematica della Murgia Materana (a sinistra); a) schema stratigrafico con la originale distribuzione dei depositi quaternari sul fianco meridionale della paleoisola che sarebbe diventata la Murgia Materana; b) sezione geologica schematica (non in scala) dell'attuale fianco meridionale della Murgia Materana (da Beneduce *et al.*, 2004, Tropeano *et al.*, 2018, mod.).



Fig. 3 - Aree di indagine nella città di Matera: a) Piazza San Giovanni e Chiesa di San Giovanni Battista; b) Villa dell'Unità d'Italia.

Lo studio del sottosuolo nell'area di Piazza San Giovanni è stato finalizzato all'individuazione di cavità e/o ipogei di interesse archeologico e di aree potenzialmente interessate da fenomeni di micro-subsidenza e/o dissesto idrogeologico.

La seconda area, Villa dell'Unità d'Italia (Fig. 3b), è invece situata nella zona urbana della città dove affiorano terreni limoso-argillosi appartenenti ai depositi alluvionali e alla formazione delle Argille Subappenniniche che poggiano sui depositi calcarenitici. La Villa, realizzata intorno agli anni Trenta, occupa un'area di forma triangolare di circa 3.850 m². In quest'area, l'obiettivo dell'indagine geofisica è stato rivolto alla definizione dell'assetto geologico-strutturale dei primi metri di sottosuolo.

3. Acquisizione ed elaborazione dati geofisici

In Piazza San Giovanni, le indagini sono consistite nella realizzazione di rilievi GPR ad alta definizione, grazie ai quali sono stati caratterizzati i primi 3 m di sottosuolo, con un interesse principalmente rivolto alla ricerca di cavità, siano esse legate alla presenza di strutture interrato di origine antropica oppure a fenomeni naturali di tipo carsico. L'utilizzo del GPR ha anche permesso di determinare il grado di antropizzazione dell'immediato sottosuolo, ovvero la presenza di tubazioni, di strutture metalliche di rinforzo, quali tondini e reti elettrosaldate, di basamenti e solette in calcestruzzo, favorendo la pianificazione di indagini successive. Al fine di estendere le profondità d'investigazione ed ampliare lo studio con informazioni di tipo elettro-stratigrafico, legate dunque all'assetto litologico-strutturale del sottosuolo, le indagini GPR sono state integrate da prospezioni geoelettriche condotte con il metodo della Tomografia della Resistività Elettrica (ERT).

La campagna di misura GPR in Piazza San Giovanni è stata eseguita su un'area di circa 586 m², i cui lati hanno estensione di circa 35 m lungo l'asse y e di circa 17 m lungo l'asse x, secondo il sistema di riferimento di coordinate illustrato in Fig. 4. Per ottenere una copertura completa, sono stati effettuati 17 passaggi GPR utilizzando il sistema *Stream-X* dell'IDS, acquisendo, quindi, 255 profili (B-scan).

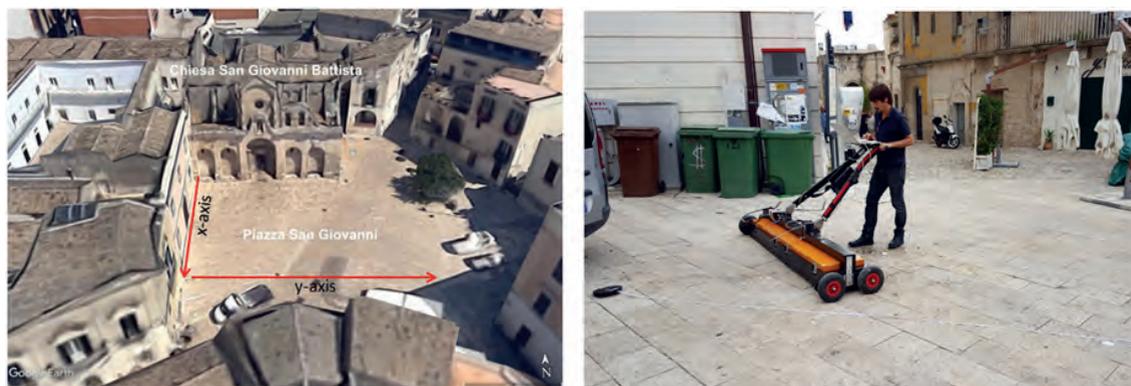


Fig. 4 - Acquisizione dati *georadar* in Piazza San Giovanni a Matera.

I dati GPR sono stati processati utilizzando sia i *software* commerciali (GRED(HD) di IDS SpA e *GPR-Slice* del Geophysical Archaeometry Laboratory di Los Angeles, USA), sia mediante un approccio di tomografia a microonde sviluppata dai ricercatori del CNR-IREA (Solimene *et al.*, 2014) L'approccio di tomografia a microonde è stato implementato in un *software* dotato di interfaccia grafica di semplice utilizzo anche da parte di *end-user* non esperti.

I dati *radar* sono stati raccolti dal sistema IDS Stream-X e, successivamente, processati utilizzando una strategia di elaborazione dati dedicata che è organizzata in tre passi principali: I) pre-elaborazione; II) inversione dei dati; III) rappresentazione pseudo 3D della scena.

La Fig. 5 mostra i passi di elaborazione con il dettaglio delle singole operazioni.

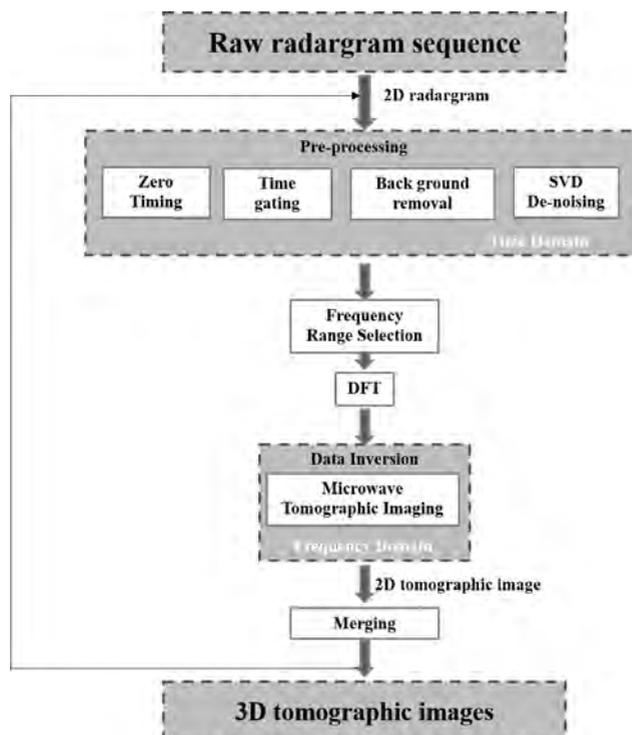


Fig. 5 - Schema di elaborazione dati *georadar*.

La pre-elaborazione è una sequenza di procedure *standard* del dominio del tempo (*Time Domain*), che mirano ad estrarre il segnale utile dai dati grezzi rimuovendo l'accoppiamento diretto tra l'antenna trasmittente e ricevente riducendo il rumore/*clutter* sui dati.

L'inversione dei dati pre-processati è poi effettuata attraverso un approccio di tomografia a microonde che è formulato nel dominio della frequenza e che assume un modello scalare 2D omogeneo del fenomeno di *scattering* elettromagnetico (Solimene *et al.*, 2014; Catapano *et al.*, 2019).

Infine, la rappresentazione pseudo 3D del volume investigato, mostrata nella sezione dei risultati, è ottenuta affiancando le immagini tomografiche a microonde 2D fornite dall'inversione dei dati. In tal modo, è possibile ottenere una rappresentazione 3D delle aree investigate.

In accordo al diagramma a blocchi in Fig. 5, l'interfaccia grafica (*GUI*) è sviluppata in tre parti, ciascuna corrispondente a una fase specifica dell'elaborazione dei dati GPR. Queste sono indicate sul lato destro della *GUI* e denominate: *Simulazione&ReferenceScenario*, *RawData&PreProcessing* e *OPL& Reconstruction* (Fig. 6).

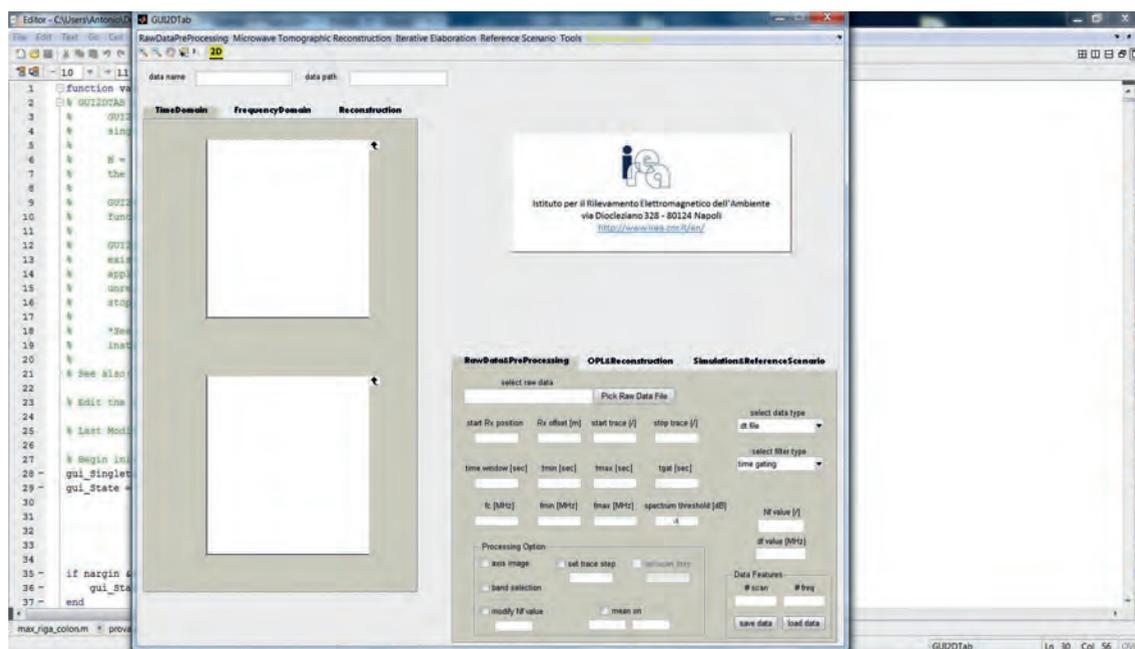


Fig. 6 - Immagine della interfaccia grafica (*GUI*) sviluppata.

Nella parte sinistra di Fig. 6, la *GUI* presenta i pannelli per gli *output* grafici denominati rispettivamente *TimeDomain*, *FrequencyDomain* e *Reconstruction*. Tali pannelli permettono di visualizzare i dati grezzi e filtrati nel dominio del tempo e il loro spettro di frequenze. L'ultimo pannello, *Reconstruction*, mostra la curva dei valori singolari e l'immagine di ricostruzione tomografica a microonde prodotta al termine dell'elaborazione.

Il pannello *RawData* e *PreProcessing* esegue il filtraggio dei *raw data*. In particolare, l'interfaccia permette di scegliere tre tipi di filtri selezionabili tramite un menu a tendina: *Time Gating*, *Back Ground Removal* e la loro combinazione.

L'utente può scegliere, inoltre, se elaborare tutti i dati grezzi o una parte di essi, impostare la finestra temporale di interesse e selezionare le tracce da mediare nella procedura di filtraggio di *BackGround Removal*. Selezionando le opzioni *RawDataPreProcessing* → *Filter RawData*, è possibile selezionare il filtro da applicare (Fig. 7). Ad esempio, come mostrato in Fig. 7, sia il *Time Gating* che il *BackGround removal* sono stati applicati su tutti i dati raccolti nella finestra temporale 1-10 ns.

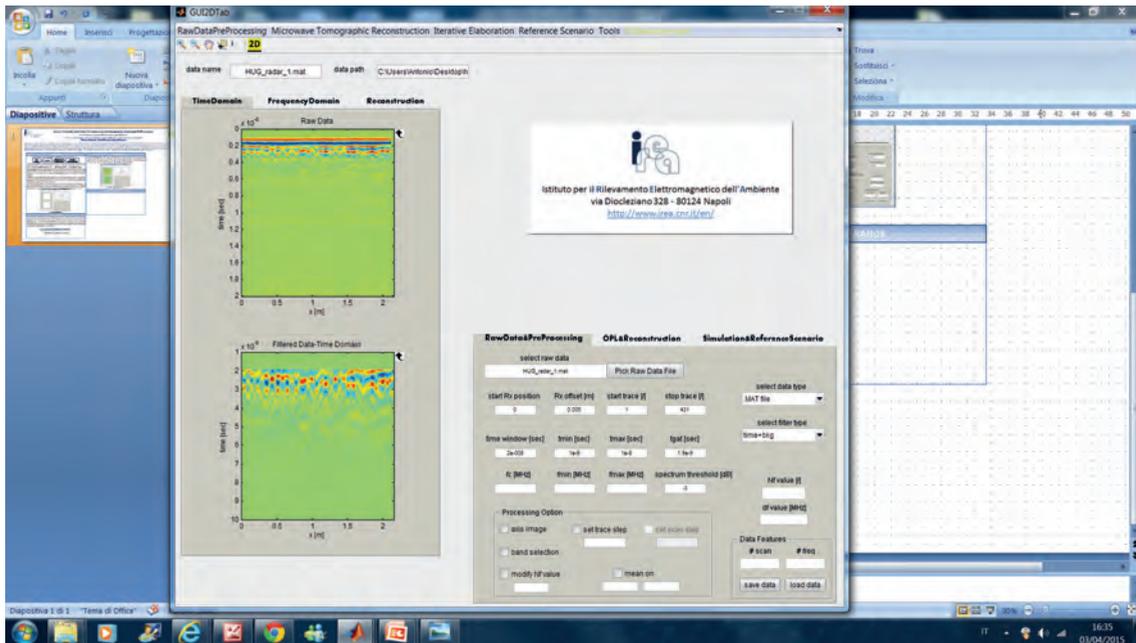


Fig. 7 - Definizione dei parametri di filtraggio e visualizzazione del dato raw e filtrato nell'interfaccia grafica.

Il passaggio dal dominio del tempo al dominio delle frequenze è effettuato tramite la trasformata discreta di Fourier (*DFT*) in quanto l'approccio di tomografia a microonde è formulato nel dominio della frequenza. Questo passaggio viene eseguito mediante il pulsante *RawDataPreProcessing* → *FrequencyDomain* (vedi Fig. 8). Nell'esempio in questione, è stato selezionato l'intervallo di frequenza 600-1700 MHz. Si noti che la scelta della banda di frequenze è avvenuta a valle dell'analisi dello spettro di dati. Lo spettro di dati è mostrato nell'immagine superiore del pannello *FrequencyDomain*, mentre i dati filtrati nel dominio della frequenza sono riportati nell'immagine in basso. Nei campi *Nf* e *df* vengono visualizzati rispettivamente il numero di frequenze nell'intervallo scelto e l'*offset* di frequenza.

Nel pannello *OPL & Ricostruzione* sono fissati i parametri per generare la matrice che lega i dati nel dominio della frequenza alla funzione contrasto che rappresenta l'incognita del problema inverso. La funzione contrasto rappresenta la differenza fra le proprietà elettromagnetiche dei bersagli e quelle del sottosuolo. La *GUI* implementa sia approcci di *imaging2D* che *3D* formulati su modelli basati sull'approssimazione del fenomeno *scattering*, dando la possibilità all'utente di scegliere il tipo di elaborazione da eseguire. Inoltre, sono contemplati due diverse configurazioni

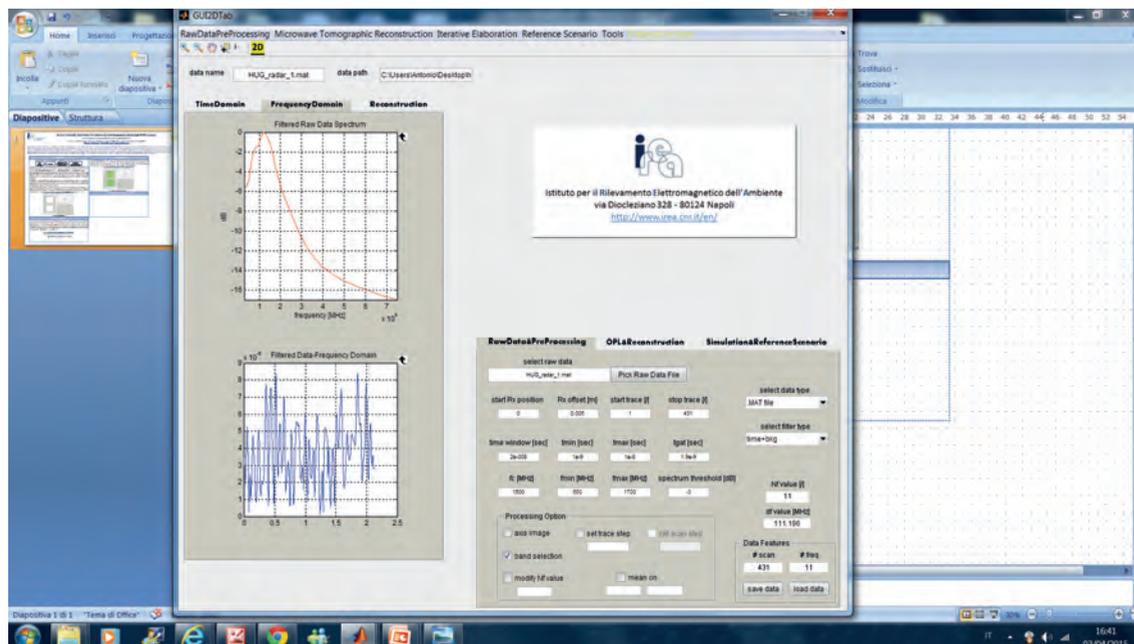


Fig. 8 - Area della GUI dedicata alla visualizzazione del dato raw e filtrato nel dominio della frequenza.

dell'antenna: *Down-Looking* e *Forward-Looking*. Per ogni configurazione, è possibile utilizzare il modello omogeneo o semi-spazio per lo scenario di riferimento (a seconda che l'interfaccia aria/suolo sia inclusa o meno nel modello).

L'utente fornisce come input la permittività dielettrica relativa e la conducibilità elettrica dello scenario di riferimento (*background*), la dimensione del dominio di indagine, l'altezza dell'antenna ed il passo di discretizzazione. La generazione dell'operatore discretizzato inizia cliccando sulle opzioni *Microwave Tomographic Reconstruction* → *Compute L-Operator*. L'utente può selezionare il valore in dB della soglia troncamento della Decomposizione ai Valori Singolari della matrice derivante dalla discretizzazione, osservando la curva di valori singolari mostrata nella casella immagine in alto nel pannello ricostruzione (Fig. 9). Facendo clic su *Microwave tomografica Reconstruction* → *Reconstruction*, è possibile visualizzare l'immagine tomografica corrispondente ad una singola traccia (Fig. 9).

Il tool dell'interfaccia grafica "*iterative elaboration*", mostrato in Fig. 10a, consente l'elaborazione automatica di tutte le scansioni GPR raccolte, che viene eseguita utilizzando gli stessi parametri. Alla fine dell'elaborazione, la GUI mostra la ricostruzione tomografica per ogni scansione nel grafico relativo. Inoltre, utilizzando il pulsante "*view slice*", l'interfaccia crea una ricostruzione pseudo 3D interpolando le ricostruzioni 2D (Fig. 10b). Vale la pena osservare che, se viene adottato il modello di scattering full 3D, i dati vengono elaborati adottando un modello 3D senza approssimazioni ed è possibile selezionare il tipo di visualizzazione ovvero le sezioni (x, y), (x, z) e (y, z).

I rilievi geoelettrici sono stati condotti con un georesistivimetro Syscal Pro Switch 96 (Iris Instruments), dotato di trasmettitore in grado di erogare correnti fino a 2.5 A e di applicare tensioni fino a 800 V (250 W). Lo strumento permette la gestione simultanea di un numero massimo di 96



Fig. 11 - Immagine che riporta la fase di acquisizione delle misure geoelettriche in Piazza San Giovanni; i picchetti sono stati posizionati lungo un grigliato indicato dai cavi gialli.

dovuta al passo elettrodico di base e, soprattutto, di evitare forti effetti locali tipici di quando si procede utilizzando linee parallele 2D con passo di campionamento più fitto.

Purtroppo, ad un'analisi approfondita, i dati geoelettrici sono stati ritenuti non-elaborabili per la presenza di una rete metallica al di sotto delle "pietre antiche", posata dopo lo scavo archeologico.

Per tale motivo, nel paragrafo dei risultati per Piazza San Giovanni, saranno riportati solo i risultati delle acquisizioni GPR, mentre per la Villa dell'Unità di Italia i risultati relativi alle misure geoelettriche.

Nella Villa dell'Unità di Italia si è invece proceduto alla sola realizzazione della tomografia di resistività elettrica 3D, raggiungendo una profondità di investigazione di circa 15 m; non è stato ritenuto opportuno applicare il metodo radar considerata la natura litologica dei terreni, prevalentemente argillosa, affioranti nell'area di indagine, che comporta una forte attenuazione del segnale radar che limita la profondità di indagine in maniera decisiva.

4. Risultati

4.1. Piazza San Giovanni

I dati geoelettrici e i dati GPR acquisiti in Piazza San Giovanni si sono rivelati dominati dagli effetti prodotti dagli interventi eseguiti nell'anno 2007 per il rifacimento della pavimentazione e la risistemazione delle infrastrutture interrato, cui si aggiungono quelli dovuti agli scavi delle strutture archeologiche ivi rinvenute e alle successive ricolmature. Per tale motivazione, e come già anticipato nel paragrafo precedente, i dati geoelettrici sono risultati particolarmente rumorosi e non è stato possibile applicare correttamente il programma di inversione. I dati GPR, elaborati

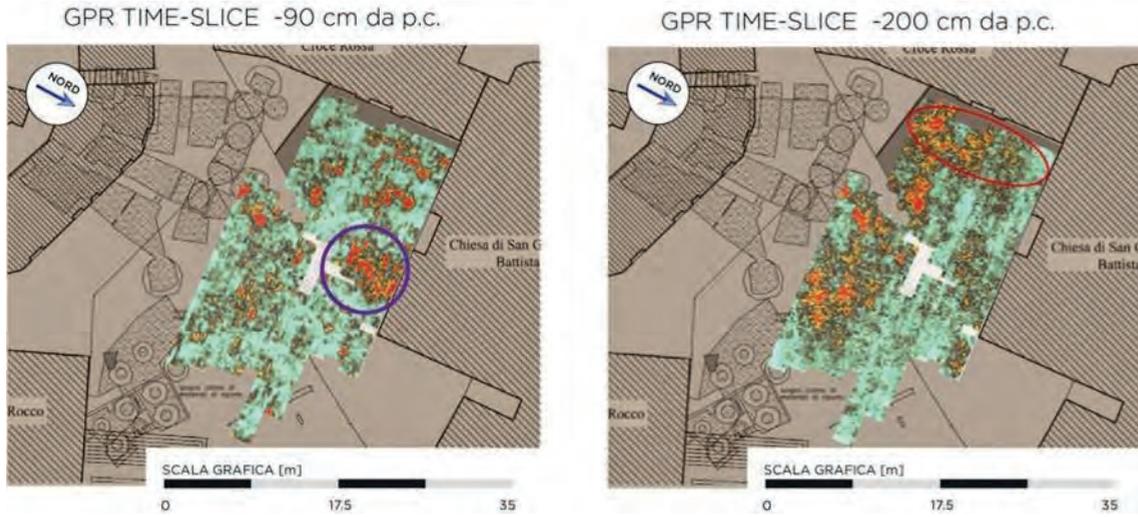


Fig. 12 - Mappe GPR (GPR Time Slices) sovrapposte alla pianta degli scavi archeologici (Colucci et al., 2008). La gamma giallo-rosso indica aree alta riflettività.

utilizzando i software commerciali, hanno mostrato invece anomalie ad alta riflettività legate a materiali di granulometria grossolana usati come riempimento e alla presenza di strutture murarie sepolte o di ipogei (Fig. 12).

Gli stessi dati sono stati rielaborati utilizzando l'approccio di tomografia a microonde. Di seguito si riportano i risultati ottenuti e il confronto con le informazioni dirette ricavate dagli scavi archeologici effettuati nell'area (Fig. 13).



Fig. 13 - a) Sovrapposizione di una "constant depth slice" tomografica all'immagine di Piazza San Giovanni; foto dall'alto scattate durante gli scavi archeologici effettuati nell'agosto 2006; b) strutture in muratura; c) tombe cimiteriali.

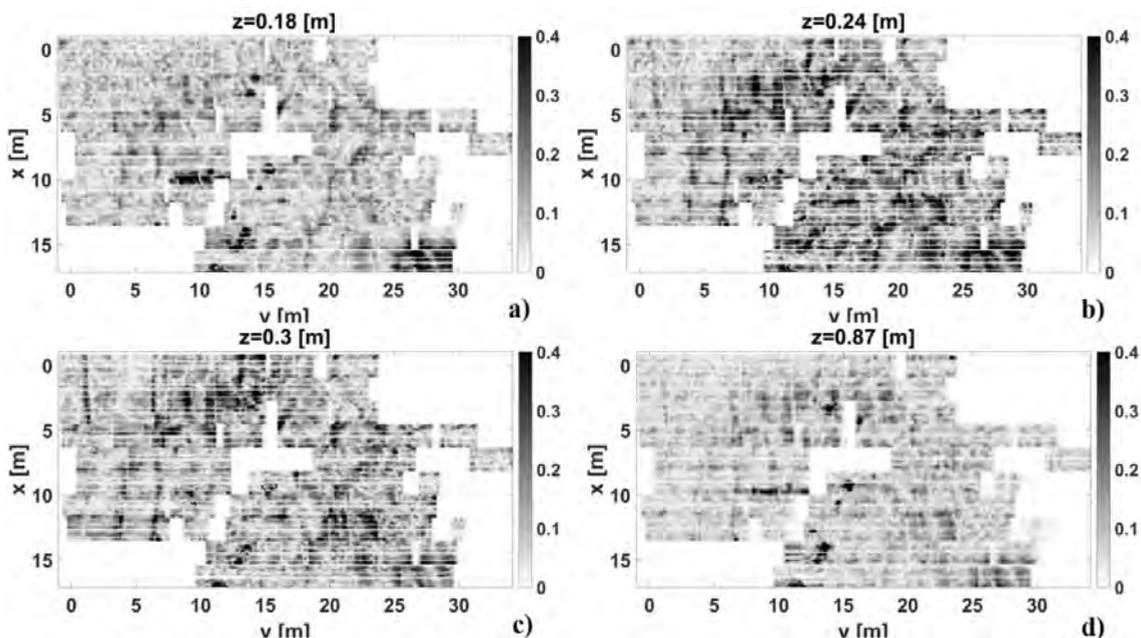


Fig. 14 - Ricostruzioni tomografiche di Piazza San Giovanni a diverse profondità. a) si evidenziano anomalie riconducibili a recenti interventi per la riqualificazione della pavimentazione e per la riorganizzazione delle infrastrutture sotterranee; b-c) strutture murarie e tombe cimiteriali presenti su entrambi i lati dell'ingresso della chiesa di San Giovanni Battista.

Le Figg. 14a-d mostrano i risultati più rilevanti ottenuti mediante la tecnica di inversione tomografica per profondità di $z = 0.18$ m, $z = 0.24$ m, $z = 0.30$ m e $z = 0.87$ m. È importante sottolineare che l'area investigata è antistante la chiesa di San Giovanni Battista la cui entrata, sulle immagini focalizzate, è posizionata alle coordinate $x = 0$ m e $y = 7$ m.

Alcune delle strutture allungate che si possono osservare nella parte sinistra dell'area investigata e fino ad una profondità di $z = 0.18$ m (Fig. 14a), sono riconducibili a recenti interventi per la riqualificazione della pavimentazione e per la riorganizzazione delle infrastrutture sotterranee, come ad esempio condotti per il passaggio di cavi elettrici.

In prossimità dell'entrata della chiesa, ed in particolare sul lato sinistro si osservano delle strutture sepolte allungate che si estendono lungo tutto l'asse x . Sul lato destro della chiesa, invece, si osserva la presenza di oggetti allungati di circa 2 m, la cui estensione orizzontale e verticale è minore rispetto alle strutture murarie visibili sul lato sinistro. Questi oggetti, rilevati su entrambi i lati dell'ingresso della chiesa (Figg. 14b e 14c), potrebbero essere strutture in muratura (Fig. 13b) e tombe cimiteriali (Fig. 13c) osservate durante gli scavi archeologici effettuati il 6 agosto 2006.

4.2. Villa dell'Unità d'Italia

I rilievi geoelettrici condotti in Villa dell'Unità d'Italia sono stati eseguiti mediante un georesistivimetro Syscal Pro Switch 96 della Iris Instruments, dotato di trasmettitore in grado di erogare correnti fino a 2.5 A e di applicare tensioni fino a 800V (250 W). Lo strumento permette la gestione simultanea di un numero massimo di 96 elettrodi, l'esecuzione in automatico della sequenza di misure e la compensazione del potenziale spontaneo. I dati geoelettrici sono stati

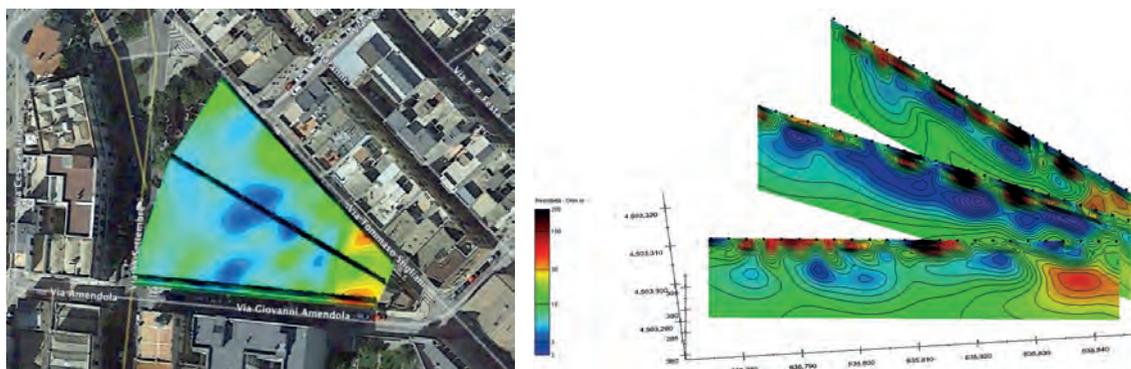


Fig. 15 - Esempio di *slice* orizzontale dell'indagine ERT eseguita nella Villa dell'Unità d'Italia (sinistra); modello di resistività elettrica 3D (destra).

successivamente elaborati ed invertiti mediante il software ERT Lab sviluppato da Geostudi Astier.

Da un punto di vista geologico, l'area di indagine è costituita da un substrato calcarenitico sottoposto a sedimenti limoso-argillosi di origine marina, a loro volta coperti da sedimenti alluvionali maggiormente limosi. Le tre sezioni ERT e la visione di insieme della rappresentazione grafica in 3D evidenziano principalmente tre aspetti (Fig. 15):

1. il primo riguarda la notevole presenza di terreni a bassa resistività riconducibili ai limi argillosi, fino ad una profondità di circa 15 m, con resistività apparente di 5-20 Ωm con sovrapposti, per circa 2 m e fino in superficie, da materiale di riporto (100-200 Ωm) interessato a luoghi da sottoservizi;
2. il secondo aspetto riguarda la presenza di "sacche" di acqua molto conduttiva (2-3 Ωm) poste con base a quote di circa 390-393 m s.l.m. e inserite nei terreni alluvionali poggianti sul substrato argilloso sopracitato; il loro sviluppo areale è meglio evidenziato nella ERT 3D;
3. infine, un terzo aspetto da evidenziare è l'individuazione del substrato calcarenitico nei primi tratti di ognuna delle sezioni e di conseguenza nella parte iniziale della ERT 3D, con valori attribuibili alla calcarenite pari a circa 30-50 Ωm , che ben evidenziano l'approfondimento di tali litologie al di sotto dei limi argillosi con una angolazione di circa 22°, come d'altronde riscontrato in altre zone di Matera.

Si conferma quindi la presenza di:

- un substrato argilloso a quota di 390 m s.l.m., sotto una coltre alluvionale spessa 8-10 m circa;
- una quota falda a 394-395 m s.l.m.;
- una faglia NE-SO che interessa il substrato calcareo e che, dalla parte ribassata, crea un maggiore inspessimento dei depositi calcarenitici e/o una diversa deposizione delle alluvioni che poggiano sulle argille.

Dal modello ERT 3D si può desumere l'angolo azimutale della scarpata calcarenitica condizionata a sua volta dalla faglia interessante i calcari di base.

5. Conclusioni

Le indagini effettuate nelle due aree di studio hanno permesso di approfondire la conoscenza sull'assetto geologico-strutturale del sottosuolo investigato e di individuare la presenza di strutture sepolte o di eventuali criticità di natura antropica e/o naturale.

In particolare, le rilevazioni radar effettuate su Piazza San Giovanni hanno fornito una diagnostica ad alta risoluzione del sottosuolo permettendo di individuare strutture sepolte, quali resti archeologici come strutture murarie e tombe cimiteriali, ma anche gli effetti dovuti alla ripavimentazione della piazza.

I risultati delle indagini effettuate nella Villa dell'Unità di Italia hanno permesso di verificare il contatto tra il materiale limoso-argilloso sovrastante e il substrato calcarenitico evidenziandone la geometria di approfondimento e suggerendo la possibilità di effettuare indagini a maggiore profondità di investigazione.

BIBLIOGRAFIA

- Beneduce P., Festa V., Francioso R., Schiattarella M., Tropeano M. (2004). *Conflicting drainage patterns in the Matera Horst area, Southern Italy*. Physics and Chemistry of the Earth, 29, 717-724. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2004.03.009>.
- Catapano I., G. Gennarelli, G. Ludeno, R. Persico, F. Soldovieri (2019). *Ground Penetrating Radar. Operation Principle and Data Processing*, in J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2019 John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/047134608X.W8383.
- Colucci, R., Marchetta, I., Osanna, M., Sogliani, F. (2008). *Un progetto di archeologia urbana a Matera*. Siris 9, 101-129.
- Pieri P., Festa V., Moretti M., Tropeano M. (1997). *Quaternary tectonic activity of the Murge area (Apulian foreland, southern Italy)*. Annali di Geofisica, 40, 1395-1404.
- Sella M., Turci C., Riva A. (1988). *Sintesi geopetrolifera della Fossa Bradanica (Avanfossa della catena Appenninica)*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 87-107.
- Solimene R., I. Catapano, G. Gennarelli, A. Cuccaro, A. Dell'Aversano, and F. Soldovieri (2014). *SAR imaging algorithms and some unconventional applications*, IEEE Signal Process. Mag., vol. 31, no. 4, pp. 90-98, 2014.
- Tropeano M. (1994). *Caratteri deposizionali della Calcarenite di gravina (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore) sul bordo orientale della Fossa Bradanica nell'area di Matera*. In: Guida alle escursioni del 77° Congresso della Società Geologica Italiana, Bari, Quaderni della Biblioteca Provinciale di Matera, 15, 67-86.
- Tropeano M., Sabato L., Festa V., Capolongo D., Casciano C.I., Chiarella D., Gallicchio S., Longhitano S.G., Moretti M., Petruzzelli M., Schiuma G., Spalluto L., Boenzi F., Pieri P. (2018). *"Sassi", the old town of Matera (southern Italy): first aid for geotourists in the "European Capital of Culture 2019"*. Alpine and Mediterranean Quaternary, 31 (2), 133-145. <https://doi.org/10.26382/AMQ.2018.09>

Integrazione di misure geofisiche in Piazza Duomo nei Sassi di Matera

S. PISCITELLI¹, F. SOLDVIERI², G. MORELLI³, A. PERRONE¹, J. BELLANOVA¹,
G. CALAMITA¹, I. CATAPANO², G. GENNARELLI², G. LUDENO², G. CATANZARITI³,
E. LAURITI³ e G. GRAZIANO³

¹ Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, CNR, Tito Scalo (PZ)

² Istituto per il Rilevamento Elettromagnetico dell'Ambiente, CNR, Napoli

³ Geostudi Astier srl, Livorno

1. Introduzione

Questa nota riporta i risultati ottenuti dalle indagini geofisiche realizzate nella città di Matera da ricercatori e tecnici di due Istituti del CNR, quali IMAA ed IREA, della Geostudi Astier di Livorno e di Ingegneria dei Sistemi (IDS) di Pisa. Grazie all'applicazione congiunta di due tecniche caratterizzate da una diversa risoluzione spaziale, quali la Tomografia di Resistività Elettrica (ERT) ed il Ground Penetrating Radar (GPR), è stato possibile ricostruire dettagliatamente l'assetto geologico-strutturale dei primi metri di sottosuolo ed individuare la presenza di oggetti di natura antropica (sottoservizi) e naturale (cavità) nell'area di Piazza Duomo, situata nel quartiere della Civita a ridosso dei Rioni Sassi.

2. Area di indagine

La città di Matera sorge al margine orientale della struttura tettonica nota come Fossa Bradanica, un'ampia depressione impostata nel Pliocene medio nel substrato mesozoico, costituito dai Calcari di Altamura, caratterizzato dalla presenza di due alti strutturali, uno nella zona a SO della città, denominato Horst di Zagarella (Tropeano, 1994), e l'altro a SE, detto Horst di Matera (Fig. 1a). Sul substrato calcareo si sono depositati, in discordanza, depositi calcarenitici (Calcareniti di Gravina) e, in successione, sedimenti clastici fini rappresentati da argille marine pleistoceniche. Sovrapposti a queste ultime si rinvengono, a chiusura del ciclo sedimentario pliocenico-pleistocenico bradanico, depositi terrazzati sabbiosi e conglomeratici (Fig. 1b).

L'area oggetto di indagine è ubicata a ridosso dell'antico rione dei Sassi dove affiorano

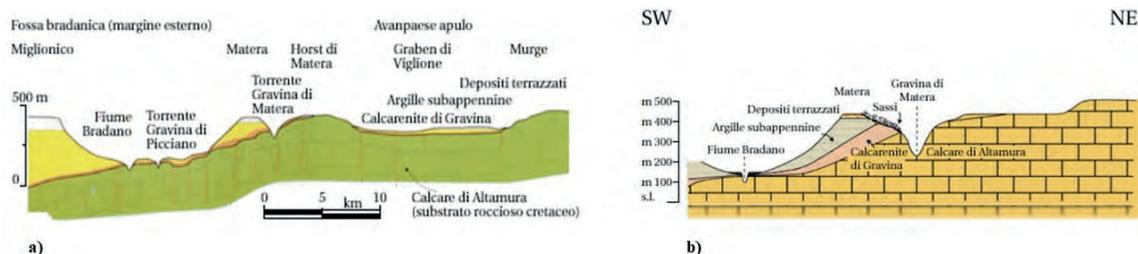


Fig. 1 - a) Sezione geologica che evidenzia la posizione dell'Horst di Matera rispetto alle Murge e alla Fossa Bradanica (da Tropeano, 2003); b) sezione geologica della Gravina di Matera.

estesamente i depositi calcarenitici, che raggiungono spessori di circa 40 m. In particolare, Piazza Duomo è ubicata sullo sperone più alto della Civita, ritenuta il più antico nucleo dell'abitato materano posizionato tra il Sasso Barisano e quello Caveoso. Nella piazza sorge la cattedrale della Madonna della Bruna e di Sant'Eustachio, costruita in stile romanico pugliese nel XIII secolo, che rappresenta il luogo di culto cattolico principale della città di Matera, chiesa madre dell'arcidiocesi di Matera-Irsina. Si tratta di un'area dall'enorme rilevanza storica ed architettonica che costituisce un fattore straordinario di attrazione turistica e che nel 1993 è stata riconosciuta dall'UNESCO, insieme all'intero antico rione dei Sassi, come uno dei luoghi nel mondo che costituiscono "patrimonio dell'umanità".

Lo studio del sottosuolo nell'area di Piazza Duomo assume, pertanto, una rilevanza strategica sia per l'individuazione di cavità e/o ipogei di interesse archeologico, sia per la delimitazione di aree potenzialmente interessate da fenomeni di micro-subsidenza e/o dissesto idrogeologico.

La realizzazione di rilievi GPR ad alta definizione ha permesso di caratterizzare i primi 3 m di sottosuolo, con un interesse principalmente rivolto alla ricerca di cavità, siano esse legate a fenomeni naturali di tipo carsico oppure alla presenza di strutture antropiche interrato. In particolare, la tecnica il GPR ha permesso di determinare il grado di antropizzazione degli strati superficiali del sottosuolo, ovvero la presenza di tubazioni, di strutture metalliche di rinforzo, quali tondini metallici e reti elettrosaldate, di basamenti e solette in calcestruzzo, favorendo la pianificazione di indagini successive. Al fine di estendere le profondità d'investigazione ed ampliare lo studio con informazioni di tipo elettro-stratigrafico, legate dunque all'assetto litologico-strutturale del sottosuolo, sono state realizzate prospezioni geoelettriche con la tecnica della Tomografia di Resistività Elettrica (ERT).

3. Metodo georadar: acquisizione e data processing avanzato

Le indagini radar sono state eseguite con l'impiego di un sistema *IDS Stream-X (Subsurface Tomographic Radar Equipment for Assets Mapping)* dotato di 16 canali operanti a 200 MHz, in grado di acquisire simultaneamente 15 profili radar paralleli, con una spaziatura costante di 12 cm.

Per ottenere una copertura completa dell'area investigata, avente una superficie di circa 534 m² con un lato di 13.45 m (asse x) e 39.80 m (asse y), sono stati effettuati 8 passaggi GPR tramite *Stream-X* (Fig. 2). I dati GPR, oltre che utilizzando software commerciali (GRED-HD di IDS SpA e *GPR-Slice* del Geophysical Archaeometry Laboratory di Los Angeles, USA), sono stati processati utilizzando un approccio di tomografia a microonde sviluppato dai ricercatori del CNR-IREA. Tale strategia di elaborazione dati si articola in tre passi principali: 1) pre-elaborazione; 2) inversione dei dati; 3) rappresentazione pseudo 3D della scena. La pre-elaborazione è una sequenza di procedure standard del dominio del tempo (*Time Domain*, TD) che mirano ad estrarre il segnale utile dai dati grezzi rimuovendo l'accoppiamento diretto tra l'antenna trasmittente e ricevente riducendo il rumore/*clutter* sui dati.

L'inversione dei dati pre-processati è poi effettuata attraverso un approccio di tomografia a microonde che è formulato nel dominio della frequenza considerando un modello scalare 2D omogeneo del fenomeno di scattering elettromagnetico (Solimene *et al.*, 2014; Catapano *et al.*, 2019).



Fig. 2 - Immagini relative all'acquisizione delle misure georadar con il Sistema *IDS Stream-x* in piazza Duomo. In alto a sinistra, sovrapposizione di una *constant depth slice* tomografica all'immagine della piazza.

Infine, la pseudo rappresentazione 3D del volume investigato, mostrata nella sezione dei risultati, è ottenuta affiancando le immagini tomografiche a microonde 2D fornite dall'inversione dei dati. L'elaborazione complessiva dei dati è dettagliata nelle seguenti sottosezioni.

3.1. Pre-elaborazione

L'elaborazione dei dati nel dominio del tempo inizia con la correzione dello *zero-time* e coinvolge successivamente procedure, come il *time gating* (TG) e il *background removal* (BKG), che consentono di rimuovere o attenuare il segnale dovuto all'accoppiamento diretto fra le antenne e all'interfaccia aria-suolo. In particolare, il tempo zero viene utilizzato per tagliare la prima parte del segnale, fino alla riflessione dell'interfaccia aria-suolo e viene fissato in corrispondenza dell'interfaccia aria-suolo.

La procedura *BKG*, invece, cancella l'interfaccia aria-suolo, solo parzialmente cancellata a seguito dell'operazione di *zero-timing*, e di solito fornisce un'immagine più pulita dei bersagli sepolti.

Infine, la procedura di *time-gating* viene applicata per selezionare la porzione della finestra temporale di osservazione del profilo (*B-scan*), in maniera da selezionare la porzione di radargramma che andrà poi processata dall'approccio tomografico.

3.2. Inversione dei dati

La procedura di inversione dei dati formula l'imaging come un problema inverso di diffusione elettromagnetica sotto l'ipotesi di un modello lineare della diffusione elettromagnetica (Solimene et al., 2014; Catapano et al., 2019). Nello specifico, l'approccio qui impiegato elabora un singolo

profilo georadar (*B-Scan*), assumendo come scenario di riferimento un mezzo omogeneo, non dispersivo e non magnetico 2D caratterizzato da una costante dielettrica relativa. Il fenomeno di *scattering* è attivato per mezzo di antenne, che sono qui modellate come sorgenti filamentari polarizzate lungo l'asse di invarianza del problema e alimentate da una corrente unitaria. In particolare, il modello di *scattering* è definito in una configurazione di misurazione multi-monostatica/multi-frequenza e, per lo scenario di tipo 2D ipotizzato, occorre invertire l'equazione integrale

$$E_s(x_m, \omega) = k_b^2 \iint_D g_e(x_m, z_m, x, z, \omega) E_{inc}(x, z, \omega) \chi_e(x, z) dS \quad (1)$$

dove E_s è il dato di campo diffuso, E_{inc} il campo incidente nel dominio di indagine, g_e la funzione di Green dello scenario, e χ_e la funzione contrasto incognita rappresentativa della posizione e forma dei bersagli nella scena (Solimene *et al.*, 2014; Catapano *et al.*, 2019).

Il problema lineare inverso definito dalla (Eq. 1) è mal-posto ed è necessario applicare uno schema di regolarizzazione al fine di ottenere una soluzione stabile. Un popolare schema di regolarizzazione è la Decomposizione ai Valori Singolari Troncata (TSVD), in base alla quale la soluzione è al problema è espressa come segue

$$\tilde{\chi}_e = \sum_{n=1}^{N_t} \frac{\langle E_s, u_n \rangle}{\sigma_n} v_n \quad (2)$$

dove σ_n sono i valori singolari e $\{v_n\}_{n=0}^{\infty}$ e $\{u_n\}_{n=0}^{\infty}$ sono, rispettivamente, funzioni di base ortonormali nello spazio delle incognite e dei dati. L'indice di troncamento dello spettro singolare N_t va scelto in modo tale da trovare un buon compromesso tra accuratezza e stabilità della soluzione.

La mappa spaziale definita dal modulo della funzione contrasto ricostruita $\tilde{\chi}_e$ è detta immagine tomografica e fornisce informazioni sulla posizione e la geometria degli oggetti sepolti come le zone in cui il modulo della funzione contrasto è significativo.

3.3. Visualizzazione 3D

A seguito della fase di inversione 2D che riguarda i singoli profili, le immagini tomografiche 2D sono affiancate in una griglia e le ampiezze interpolate tra le righe per produrre un volume pseudo-3D. Tale volume può essere visualizzato contemporaneamente come sezioni a profondità costante (*constant-depth slices*) e viste verticali (*transversal sections*).

4. Tomografia di Resistività Elettrica: acquisizione ed inversione dati

I rilievi geoelettrici sono stati condotti con un georesistivimetro Syscal Pro Switch 96 (Iris Instruments) dotato di trasmettitore in grado di erogare correnti fino a 2.5 A e di applicare tensioni fino a 800 V (250 W). Lo strumento permette la gestione simultanea di un numero massimo di 96 elettrodi, l'esecuzione automatica della sequenza di misure e la compensazione del potenziale spontaneo.

Considerate le condizioni logistiche (dimensioni della piazza e passaggio di pedoni e di auto durante l'acquisizione), non è stato possibile utilizzare una griglia di acquisizione molto fitta. In particolare, è stata utilizzata una griglia costituita da 4 stendimenti paralleli, distanziati di 5 m



Fig. 3 - Immagine che riporta la fase di acquisizione delle misure geoelettriche; i picchetti sono stati posizionati lungo un grigliato indicato dai cavi gialli.

e contenenti 24 elettrodi, con spaziatura interelettrodica di 2 m (Fig. 3). L'acquisizione dei dati di resistività apparente è stata eseguita con dispositivo elettrodico dipolo-dipolo e polo-dipolo, con trasmettitore (TX) e ricevitore (RX) diffusi su tutta la griglia. I dati geoelettrici sono stati successivamente corretti, con l'inserimento delle quote topografiche relative ad ogni elettrodo, elaborati ed invertiti mediante il *software ERT Lab* sviluppato da Geostudi Astier.

5. Risultati geofisici e loro integrazione

Le rilevazioni GPR effettuate su Piazza Duomo hanno consentito di effettuare una diagnostica ad alta risoluzione del sottosuolo, con lo scopo di ottenere informazioni sulla possibile presenza di strutture sepolte, quali cisterne e condotte per lo stoccaggio dell'acqua. Di seguito si riportano i risultati ottenuti con la catena di elaborazione basata sull'approccio tomografico a microonde.

Analizzando i dati radar grezzi (*raw data*), si è osservato che la parte utile delle forme d'onda acquisite si verifica nella finestra temporale da 7 a 50 ns. Di conseguenza, lo zero-time del radargramma, che definisce anche la profondità $z = 0$, è stato impostato all'istante in cui si verifica la riflessione dall'interfaccia aria-suolo cioè a 7 ns. Inoltre, la porzione di segnale rumoroso è stata filtrata dopo i 50 ns. Per la finestra temporale considerata, assumendo per il mezzo investigato (sottosuolo) una permittività dielettrica relativa pari a $\epsilon_b = 9$, la profondità massima di indagine risulta uguale a 2.50 m. Infine, si è effettuata un'operazione di *time-gating*, mettendo a zero la porzione del segnale fra 7 e 12 ns.

Per ogni traccia pre-processata è stata poi eseguita una *Fast Fourier Transform* (FFT) per ottenere i dati del dominio della frequenza da fornire in ingresso all'algoritmo di inversione

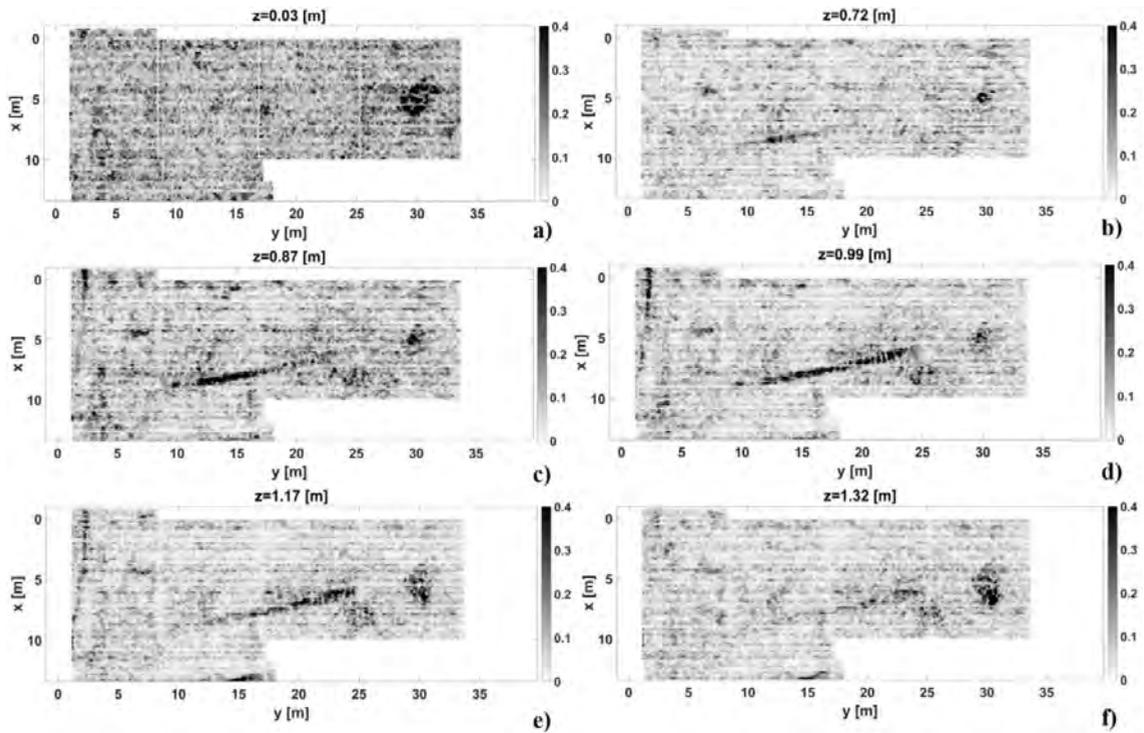


Fig. 4 - *Constant depth slices* ottenute applicando l'approccio tomografico ai dati *georadar* acquisiti in piazza Duomo.

tomografica. In particolare, per l'inversione, si è considerata una banda di frequenza che va da 100 a 600 MHz, campionata con passo di 20 MHz. I risultati presentati sono stati ottenuti impostando nell'inversione una soglia per la TSVD in modo tale da filtrare tutti i valori singolari, il cui valore è inferiore di 25 dB rispetto a quello del massimo valore singolare.

La Fig. 4 mostra le *constant depth slices* ottenute tramite l'approccio tomografico dell'area indagata, alle profondità di $z = 0,03$ m, $z = 0,72$ m, $z = 0,87$ m, $z = 0,99$ m, $z = 1,17$ m, $z = 1,32$ m.

Le immagini rivelano la presenza di numerose strutture sepolte allungate e circolari che rappresentano i condotti e le cisterne utilizzate per immagazzinare l'acqua.

In particolare, la cisterna visibile sul pavimento di Piazza Duomo può essere osservata sia nell'immagine tomografica a $z = 0,03$ m, che per tutte le successive sezioni di profondità, alle coordinate trasverse di circa $x = 5$ m, $y = 30$ m.

Alla profondità $z = 0,72$ m (Fig. 4b), oltre alla cisterna è possibile osservare una parte di un condotto a circa $x = 9$ m, $y = 12$ m, la cui evidenza migliora con l'aumentare della profondità fino a $z = 0,99$ m (Figg. 4b-4d). Questo fenomeno è dovuto alla pendenza del condotto per portare l'acqua nella cisterna. Inoltre, a profondità superiori a $z = 0,90$ m, è visibile un'altra struttura circolare a $x = 8$ m, $y = 25$ m. Questa struttura potrebbe essere una cisterna probabilmente collegata alla fine del condotto situato nella parte centrale dell'area investigata.

Il modello 3D-ERT (Fig. 5a), che raggiunge una profondità massima di 10 m, ha evidenziato il contatto stratigrafico tra il materiale resistivo ($\rho > 300 \Omega\text{m}$), posto più in profondità e correlabile con il substrato calcareo, e il materiale conduttivo ($\rho < 300 \Omega\text{m}$) più superficiale. I valori di

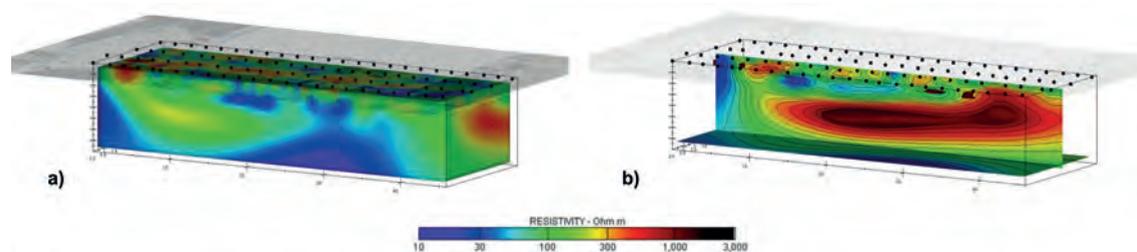


Fig. 5 - a) Modello di resistività elettrica 3D; b) modello 2D di resistività elettrica relativo alle misure ottenute nella parte centrale di Piazza Duomo.

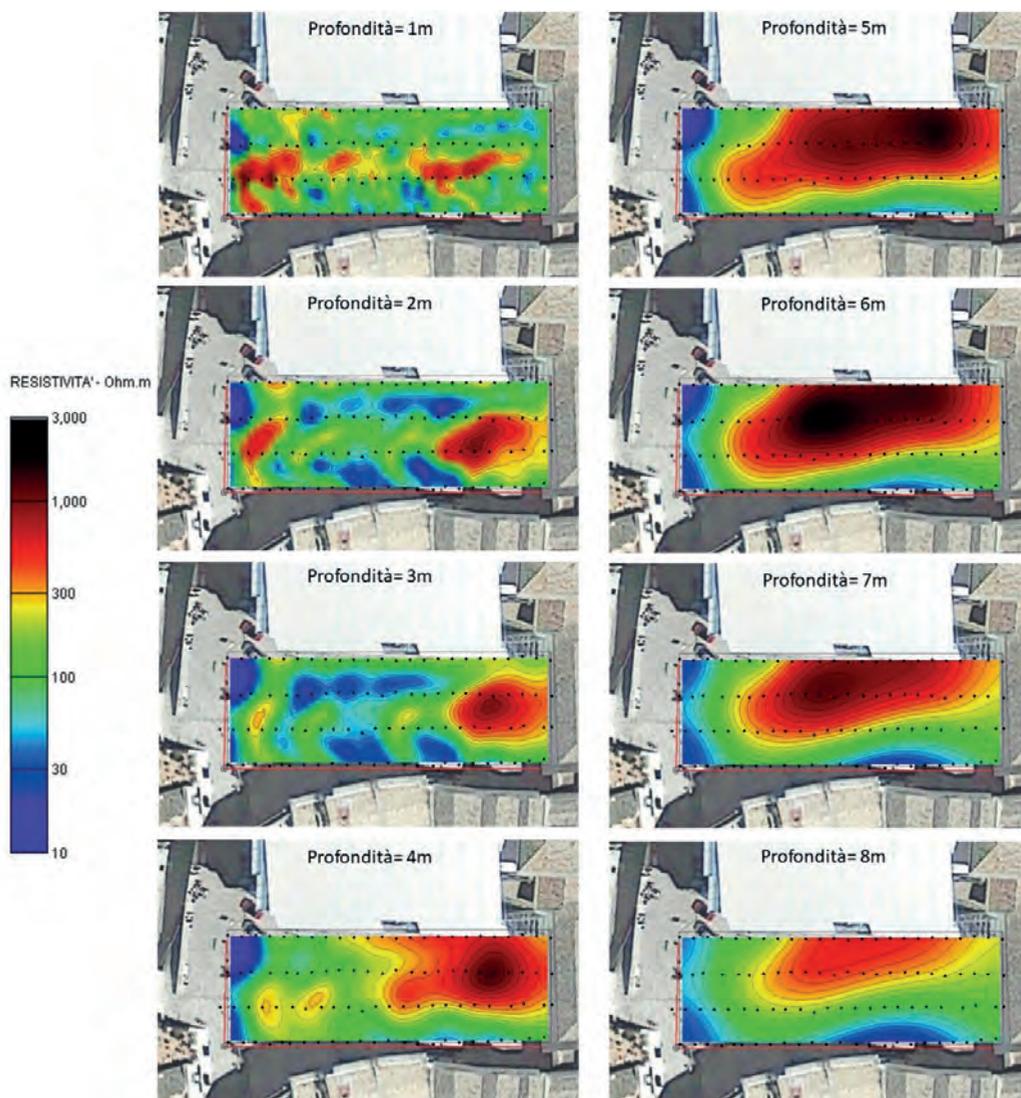


Fig. 6 - Constant depth slices orizzontali di resistività posizionate a profondità crescenti di 1 m.

resistività minori in superficie potrebbero essere dovuti sia alla diversa natura litologica dei terreni affioranti sia alla presenza di un'area a maggior contenuto di acqua. Il contatto tra il materiale conduttivo superficiale e quello resistivo posto più in profondità è ben visibile nella sezione verticale 2D di resistività elettrica (Fig. 5b) ricavata al centro della piazza.

Le sezioni orizzontali di resistività (Fig. 6), ricavate a profondità crescenti di 1 m, consentono sia di individuare la cisterna, posizionata nei primi 3 m di sottosuolo nella porzione ovest della piazza, sia di verificare il passaggio, intorno ai 5 m, tra materiale conduttivo superficiale e materiale resistivo in profondità.

6. Conclusioni

L'indagine GPR condotta nella Piazza Duomo ha permesso di determinare la presenza di una grande cisterna circolare e di diverse canalizzazioni che corrono lungo i lati sud ed ovest della Piazza tra circa 1 e 2.5 m di profondità dal piano campagna (Fig. 7). I rilievi ERT hanno inoltre fornito la successione elettrostratigrafica della porzione di sottosuolo indagata da cui si evince con chiarezza la profondità a cui si attesta il contatto tra il substrato calcareo, elettricamente resistivo, e i sovrastanti materiali.

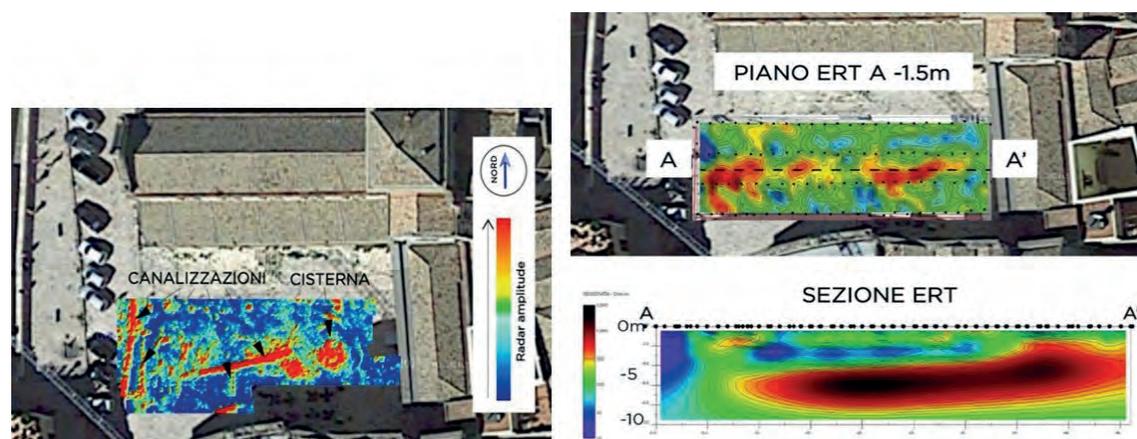


Fig. 7 - Ricostruzione radar posizionata sull'area investigata in piazza Duomo (a sinistra); esempio di slices orizzontale e verticale della ERT in piazza Duomo (a destra).

L'approccio proposto ha evidenziato vantaggi e svantaggi delle metodologie utilizzate rafforzando il concetto che, soprattutto nel caso di investigazioni effettuate in aree urbane, l'integrazione di più metodologie e lo sviluppo di algoritmi di analisi innovativi migliorino in modo evidente la conoscenza del sottosuolo investigato e l'individuazione di specifici *target*.

BIBLIOGRAFIA

- Catapano I., G. Gennarelli, G. Ludeno, R. Persico, F. Soldovieri (2019). *Ground Penetrating Radar. Operation Principle and Data Processing*, in J. Webster (ed.), Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2019 John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/047134608X.W8383.
- Solimene R., I. Catapano, G. Gennarelli, A. Cuccaro, A. Dell'Aversano, and F. Soldovieri (2014). *SAR imaging algorithms and some unconventional applications*, IEEE Signal Process. Mag., vol. 31, no. 4, pp. 90-98, 2014.
- Tropeano M. (1994). *Caratteri deposizionali della Calcarenite di gravina (Pliocene superiore - Pleistocene inferiore) sul bordo orientale della Fossa Bradanica nell'area di Matera*. In: Guida alle escursioni del 77° Congresso della Società Geologica Italiana, Bari, Quaderni della Biblioteca Provinciale di Matera, 15, 67-86.
- Tropeano M. (2003). *Il parco Archeologico, Storico, Naturale delle Chiese Rupestri del Materano, (un ricco parco geologico regionale in Basilicata)*. - Geologia dell'Ambiente, suppl. al n.1/2003, 239-254.

Metodi sismici speditivi per la diagnostica non-invasiva delle caratteristiche dinamiche del sottosuolo nei centri urbani utilizzando onde di Rayleigh: il caso della città di Ferrara

N. ABU ZEID, S. BIGNARDI e G. SANTARATO

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Un obiettivo dell'attività di ricerca nell'ambito del progetto CLARA è l'integrazione di tecnologie sismiche ed elettromagnetiche per la diagnostica non invasiva nella zona di sottosuolo a media profondità (fino a -100 m), partendo dal presupposto che la conoscenza delle caratteristiche litostratigrafiche, idrogeologiche e geofisiche di questa zona del sottosuolo è fondamentale in ogni intervento di mitigazione del dissesto idrogeologico e di micro-zonazione sismica. In particolare, una delle azioni previste all'interno dell'attività di ricerca è l'integrazione di metodi sismici attivi e passivi per la caratterizzazione del sottosuolo e per la valutazione di fenomeni di amplificazione sismica locale.

È noto che le onde di taglio si propagano nella fase solida dei terreni e, nota la densità, la conoscenza della velocità delle onde di taglio (V_s) permette di ricavare il modulo di rigidità dinamico, che rappresenta la massima resistenza posseduta dai terreni agli sforzi di taglio. Il legislatore, sia a livello nazionale (NTC08-NTC18), sia a livello europeo (EC08) ed internazionale, utilizza il valore medio ponderato della V_s nei primi 30 m (" V_{s30} ") al fine di determinare la categoria sismica del sottosuolo, così da poter definire, in prima approssimazione, il fattore di amplificazione dell'azione sismica locale atteso in superficie.

Nella pratica professionale corrente tale valore viene determinato o mediante specifiche prove geotecniche puntuali (SCPT) o mediante indagini geofisiche. Di queste ultime, la più utilizzata è quella basata sull'inversione di segnali sismici, sia che questi vengano prodotti *ad hoc* (artificiali) o che si tratti di rumore sismico ambientale. Il principio di base consiste nel ricavare lo spettro di dispersione delle onde superficiali in esso contenute. La tecnica più popolare consiste nel considerare le cosiddette onde di Rayleigh. Il fattore chiave che consente l'inversione è che la profondità di penetrazione dell'onda di Rayleigh è proporzionale alla sua lunghezza d'onda. Onde di Rayleigh a corta lunghezza d'onda portano informazione geofisica legata ad una porzione di terreno più superficiale rispetto alle lunghezze d'onda maggiori e di conseguenza viaggiano, di norma, a velocità V_R più basse, visto che la velocità delle onde S, da cui soprattutto dipende la V_R , in genere dipende dal tipo e grado di compattazione del terreno e generalmente, cresce con la profondità (Fig. 1). Tali spettri sono utilizzati per ricavare la "curva di dispersione" sperimentale.

Successivamente, l'inversione consiste nel ricavare un modello monodimensionale (1D) di sottosuolo la cui risposta sismica riproduca in modo ottimale tale curva sperimentale. Tra le tecniche più diffuse ritroviamo la cosiddetta MASW, che consiste nell'utilizzare una sorgente impulsiva artificiale (Park *et al.*, 1999) e la tecnica Re.Mi. (Louie, 2001) che sfrutta il rumore sismico ambientale. In entrambi i casi, i segnali sismici vengono acquisiti per mezzo di uno stendimento lineare di geofoni, la cui lunghezza è scelta in funzione della profondità di indagine

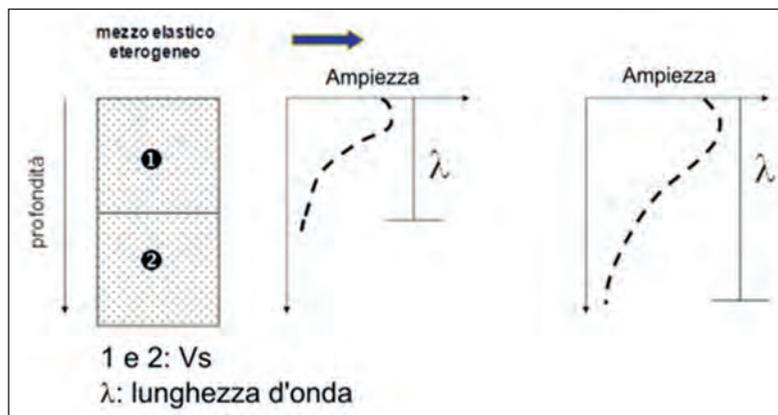


Fig. 1 - Propagazione delle onde superficiali (Rayleigh) in mezzi, 1D, eterogenei ($V_{s1} < V_{s2}$).

desiderata. Il risultato finale consiste nella distribuzione verticale della V_s , sotto lo stendimento, in termini di strati piano-paralleli, dalla quale è poi facile calcolare la V_{s30} come media pesata. Questo modello può però risultare troppo semplicistico qualora siano presenti nel sottosuolo anche variazioni laterali della V_s , peraltro comunissime anche in aree alluvionali, dove il cambio di litologie a diversa risposta elastica può talvolta avvenire su distanze inferiori alla lunghezza dello stendimento. Diviene dunque di cruciale importanza la valutazione della sua variabilità laterale locale, oltre che verticale, in particolare in quei centri abitati dove per la limitata accessibilità alle indagini, sia dirette che indirette, tale informazione è assente.

Lo scopo della presente nota è quello di descrivere il contributo, anche innovativo, sviluppato dall'Unità operativa dell'Università di Ferrara, sub-unità di Geofisica Applicata, per raggiungere l'obiettivo della caratterizzazione geofisica dei parametri dinamici dei terreni in termini di distribuzione della V_s nel sottosuolo, utilizzando come test alcuni siti scelti nell'area urbana della città di Ferrara, sia su indicazione dell'Amministrazione Comunale sia per la disponibilità di informazioni litostratigrafiche dirette per il raffronto delle informazioni.

Per raggiungere questo obiettivo, sono stati intrapresi studi approfonditi sia metodologici che su dati sintetici e poi su profili campione per arrivare alla costruzione di una sezione 2D della V_s . Operativamente, considerato che l'informazione contenuta nelle onde di Rayleigh è strettamente locale (Bignardi *et al.*, 2014), sono state eseguite acquisizioni multiple di tipo MASW con modalità *roll-along*. In sede di acquisizione la variazione laterale del dato è stata valutata tramite l'algoritmo *Direct Interpretation of Phase Lags* – DIPL (Bignardi *et al.*, 2016). Questo algoritmo consente di analizzare l'insieme di acquisizioni MASW nella loro interezza e di ricostruire, immediatamente dopo l'acquisizione, la distribuzione laterale e verticale della V_R ad una scala inferiore alla lunghezza dei singoli stendimenti. Il risultato che si ottiene è una pseudo-sezione, in quanto l'ordinata non è la profondità, ma una porzione della lunghezza d'onda; ciò consente tuttavia una rapida e realistica valutazione della possibile presenza di variabilità laterali. Maggiori dettagli si possono trovare in Abu Zeid *et al.* (2019)

Successivamente, la sezione 2D, questa volta espressa in termini di vera profondità, viene ricavata assemblando modelli 1D adiacenti ottenuti come risultato del più elaborato processo di inversione.

2. Materiali e metodi

In questa nota si focalizza l’attenzione sulla parte sperimentale legata all’acquisizione dei dati presentando un profilo, scelto come esempio della procedura applicata e dei risultati che se ne possono ottenere. Normalmente, la tecnica MASW richiede l’installazione di un certo numero di geofoni verticali, nel nostro caso 24 (con frequenza propria $f = 4,5$ Hz) lungo uno stendimento lineare, la cui lunghezza è funzione della massima profondità d’indagine che si intende raggiungere. L’installazione dei geofoni nel centro urbano, e specialmente il loro accoppiamento rigido con il terreno, comporta evidenti difficoltà, non solo perché richiede un’occupazione prolungata delle aree da investigare, con evidenti disagi per la cittadinanza, ma addirittura per l’impossibilità di conficcarli al suolo qualora l’area da investigare sia pavimentata. Al fine di ovviare a questi problemi, è stato progettato e costruito un “*land-streamer*” (Fig. 2), composto di una serie di piastre di alluminio ($0,2 \times 0,2 \times 0,03$ m³), collegate l’una all’altra a distanza fissa di 3 m tramite una catena di acciaio. A ciascuna piastra è stato saldamente connesso un geofono verticale, ovviando così alla difficoltà di ottenere un adeguato accoppiamento suolo-geofono senza compromettere la qualità dei dati. Il peso considerevole (circa 3,2 kg) delle piastre ha infatti permesso di ottenere un eccellente accoppiamento meccanico. Inoltre, la capacità di mobilitare l’intero stendimento ha permesso di operare in modalità “*roll-along*”, con spostamenti tra le diverse posizioni di acquisizione di 12-18 m. Ciò ha consentito un’acquisizione ridondante, che ha permesso la visualizzazione bi-dimensionale dell’evoluzione sia verticale che laterale della velocità delle onde sismiche.

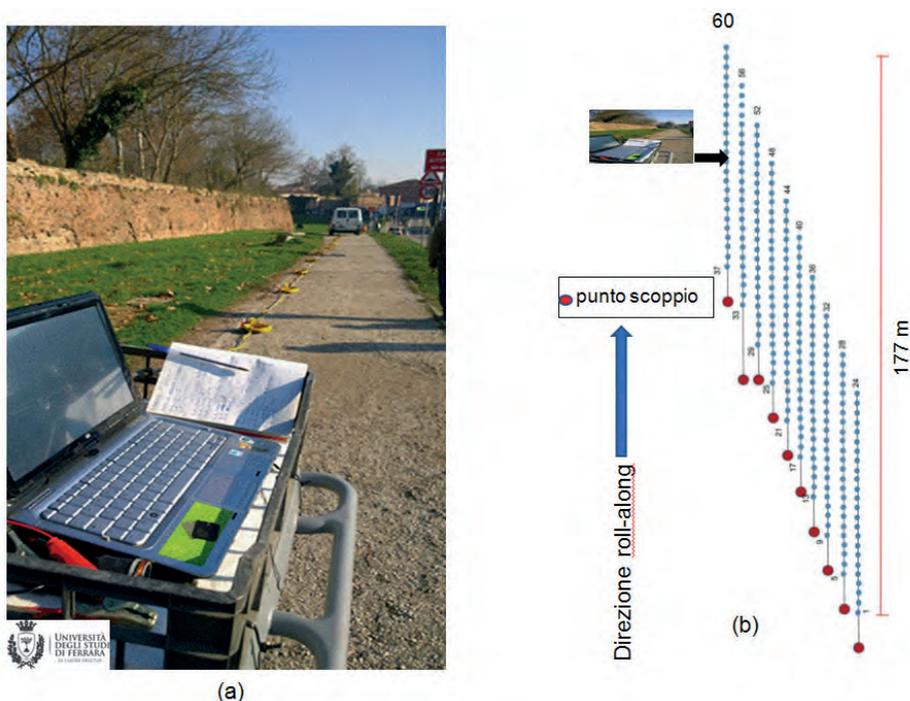


Fig. 2 - a) Particolare della strumentazione *land-streamer* sviluppata presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra della Università di Ferrara; b) dettagli dello schema di acquisizione dati in modalità *roll-along*. I numeri da 1-60 indicano le posizioni geofoniche.

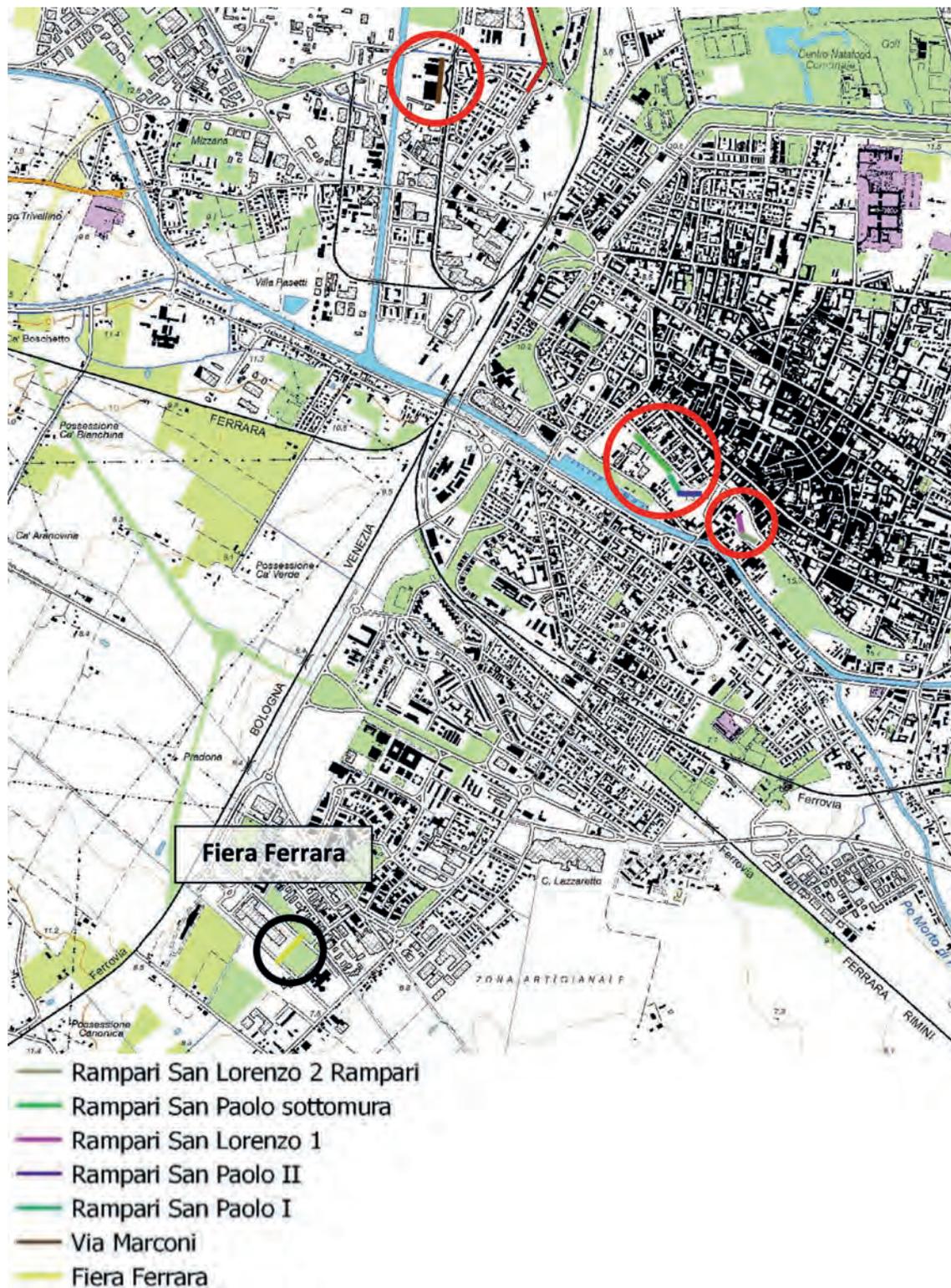


Fig. 3 - Ubicazione dei siti test dove sono stati acquisiti i profili MASW con modalità *roll-along* utilizzando il *land-streamer*. Cerchio nero: profilo eseguito nell'area della Fiera di Ferrara; cerchi rossi: profili eseguiti in altre zone del centro abitato di Ferrara.

Questa visualizzazione è stata ottenuta in due modi:

1. producendo direttamente una pseudo-sezione 2D delle velocità delle onde di Rayleigh, V_R , mediante l'algoritmo DIPL. Questo metodo, pur producendo una pseudo-sezione 2D in termini di velocità di onde Rayleigh (anziché di V_S), è particolarmente utile perché innanzitutto, com'è noto, la V_S dipende principalmente dalla V_R . Inoltre, permette di elaborare tutte le acquisizioni collettivamente, integrando le informazioni in un unico profilo, in tempi molto rapidi (pochi secondi). Tale risultato permette di visualizzare la pseudo-sezione, in tempo quasi reale, fornendo quindi all'operatore un'informazione suggestiva, anche se indiretta, circa le variazioni verticale e laterale della V_S . Poiché libero da interpolazione, il dato è posizionato esattamente in corrispondenza dell'effettiva variazione di V_S nel sottosuolo;
2. invertendo gli spettri di velocità di fase delle onde di Rayleigh di ciascuna acquisizione secondo la procedura consolidata MASW e producendo per ogni avanzamento, lungo il profilo, un modello 1D di V_S . Successivamente, i vari modelli 1D, ciascuno associato alla posizione centrale del corrispondente stendimento, sono interpolati per formare il modello 2D.

Per quanto riguarda i profili investigati, sono stati eseguiti 7 profili sismici, in modalità *roll-along*, per complessivi 156 punti di energizzazione e la copertura di 2169 m. La loro ubicazione è riportata in Fig. 3.

3. Esempio: il profilo "Fiera di Ferrara"

Per quasi tutti i profili, con l'esclusione dei profili "San Lorenzo", si disponeva di informazioni litostratigrafiche desunte da sondaggi meccanici eseguiti nelle immediate vicinanze. Presentiamo qui, a titolo di esempio, i risultati ottenuti dal profilo "Fiera di Ferrara".

In Fig. 4, sono rappresentate due sezioni sismiche ottenute dall'interpretazione quantitativa dei dati acquisiti nell'area della Fiera di Ferrara. La prima immagine (Fig. 4a) illustra la pseudo-sezione della distribuzione della velocità di fase delle onde di Rayleigh ottenuta con la tecnica DIPL. La seconda immagine, mostra la sezione interpolata 2D della velocità delle onde S, ottenuta come introdotto in precedenza mediante l'inversione delle curve di dispersione.

Si notino le diverse profondità massime dei due grafici. Ciò è dovuto al fatto che con l'algoritmo *DIPL* si possono avere informazioni sul valore della V_R , seppur con minore risoluzione laterale al crescere della lunghezza d'onda, fino a lunghezze d'onda comparabili con l'intera lunghezza della base sismica (cioè 69 m), mentre l'inversione 1D propria della tecnica MASW diventa inaffidabile a profondità confrontabili o superiori alla metà della lunghezza del profilo. In altre parole, la lunghezza degli stendimenti è stata tarata allo scopo di ottenere un'affidabile valutazione della V_{S30} . Si noti poi che l'inversione 1D (Fig. 4b) ha localizzato verso l'estremo sinistro un'inversione di velocità a circa 25-27 m dal piano campagna e che la V_S , molto bassa fino alle profondità maggiori, cresce in modo relativamente brusco intorno alla progressiva 125 m. Nella pseudo-sezione ottenuta con la tecnica DIPL (Fig. 4a) l'inversione di velocità non viene vista (il potere risolutivo del DIPL è basso alle profondità maggiori di $L/3$ e tale inversione non è necessariamente evidente in termini di V_R), mentre si registra un graduale aumento della velocità in profondità, procedendo verso l'estremo destro, in accordo con la sezione 2D di V_S (Fig. 4b).

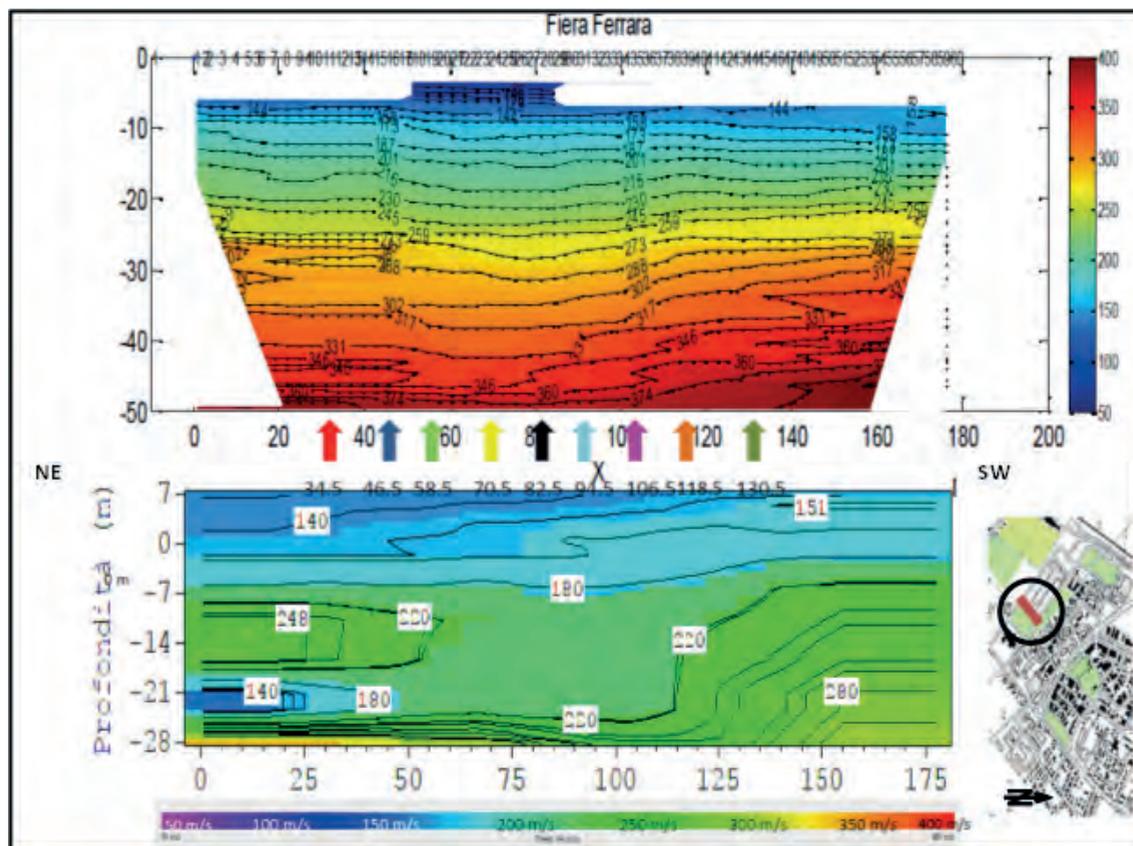


Fig. 4 - Profilo MASW di Fiera di Ferrara acquisito con il *land-streamer*: a) pseudo-sezione della velocità delle onde di Rayleigh; b) sezione 2D della velocità delle onde S ottenuta dall'interpolazione di modelli 1D ottenuti per le diverse posizioni dello stendimento di geofoni ed associate al centro dello stesso. Tali posizioni lungo il profilo sono indicate dalle frecce.

4. Conclusioni

Le indagini sismiche effettuate nell'ambito del Progetto CLARA sono state tutte effettuate in aree aperte e non trafficate, per minimizzare il disagio per la cittadinanza, trattandosi di test che dovevano soprattutto indicare una metodologia di lavoro. Naturalmente il *land-streamer* permette di eseguire misure anche nel centro storico, purché si disponga dei tratti rettilinei liberi lunghi almeno 80 m, necessari a mantenere una profondità d'indagine consistente con una adeguata valutazione della V_{s30} .

Il lavoro presentato in questa nota fornisce dunque un concreto contributo per una corretta ed approfondita microzonazione sismica anche in centri abitati, in quanto consente l'individuazione di variazioni laterali, oltre che verticali di V_s , a livello di singolo edificio.

Ringraziamenti. Si ringraziano: E. Oratelli che ha coadiuvato nell'acquisizione ed elaborazione dei dati, V. Carassiti per lo sviluppo del progetto del "*land streamer*", i tecnici del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, in particolare P. Chiarelli e F. Droghetti per la realizzazione pratica dello stesso.

BIBLIOGRAFIA

- Abu Zeid N., Bignardi, S., Santarato G., Dall'Olio L. (2019). *Rapid surface-waves acquisition in urban centers in alluvial context: the 2D reconstruction of lateral variations of S-waves velocity*. Engineering Geology. [submitted]
- Aki K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors*. Bull. Earthquake Res. Inst. 35, 415-457.
- Bignardi S., Santarato G., Abu Zeid N. (2014). *Thickness Variations in Layered Subsurface Models - Effects on Simulated MASW*. Extended abstract WS6-P04, 76th EAGE Conference & Exhibition 2014 Amsterdam RAI, The Netherlands, 16-19 June 2014, DOI: 10.3997/2214-4609.20140540.
- Bignardi S., Abu Zeid N., Santarato G. (2016). *Direct Interpretation of Phase Lags (DIPL) of MASW data. An example for evaluation of (Jet grouting) for soil stiffening enhancement against soil liquefaction*. Society of Exploration Geophysicists, International Exposition and 85th Annual Meeting, New Orleans (USA), 18-23/10-2015, 2218-2223 (6 pages), <http://dx.doi.org/10.1190/segam2015-5925998.1>.
- Louie. N. (2001). *Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth from Refraction Microtremor Arrays*. Bulletin of the Seismological Society of America 91 (2): 347-364.
- Park C.B., Miller R.D., Xia J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves (MASW)*. Geophysics, 64:800-808.

Prospezioni sismiche in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - parte profonda

A. AFFATATO¹, L. BARADELLO¹, L. PETRONIO¹, A. BARBAGALLO¹, D. SORGO¹, G. CRISTOFANO¹, M. LOVO¹, S. MAFFIONE¹, V. PASCIULLO¹, R. CAPUTO², M. STEFANI³ e N. ABU ZEID²

¹ OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

² Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

³ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

L'esplorazione del sottosuolo nei centri urbani riveste grande importanza per fornire elementi utili alla pianificazione territoriale. In questi siti il contesto fortemente antropizzato, edificato e ricco di infrastrutture e sottoservizi può condizionare fortemente l'esplorazione. La sismica a riflessione è una metodologia di indagine che consente di ottenere informazioni del sottosuolo con penetrazioni e risoluzioni difficilmente raggiungibili con altre tipologie di indagini geofisiche.

Nell'ambito del progetto CLARA e come sperimentazione delle possibilità offerte, in un contesto urbano, da questo tipo di prospezione è stata condotta una campagna di sismica a riflessione nella città di Ferrara con l'utilizzo di onde compressionali (P).

L'obiettivo principale di questa indagine è stata la ricostruzione della geometria delle principali discontinuità sismo-stratigrafiche presenti nel sottosuolo della città di Ferrara fino ad una profondità di circa 1000 m con il fine ultimo di incrementare le conoscenze geologiche nel contesto urbano, fornendo anche all'Amministrazione Comunale di Ferrara conoscenze, dati e informazioni utili per sviluppare e aggiornare gli strumenti destinati alla mitigazione del rischio sismico. Si intende fornire infatti al Comune di Ferrara i parametri ottimizzati della metodologia sviluppata in questo lavoro, permettendo di estendere la sua applicazione ad altri settori del territorio comunale da includere nei nuovi strumenti di pianificazione territoriale ed urbanistica.

2. Localizzazione e metodi di indagine

L'indagine è stata condotta ad oriente del centro storico, lungo il fossato delle mura rinascimentali, a partire dall'angolo sud-orientale (Fig. 1), nei pressi del Baluardo del Montagnone, fino al loro angolo nord-orientale, nei pressi della Punta della Montagnola degli Angeli. Nel fossato, attualmente asciutto, è stata effettuata una linea di sismica a riflessione, lunga 2.630 m. In corrispondenza del tracciato passano alcune tubature, in particolare dell'acquedotto e del sistema fognario, ma nel complesso la densità dei sottoservizi incontrati lungo il percorso è stata bassa e sotto pochi metri di materiale di riporto si trovano i sedimenti naturali sciolti ed indisturbati. Sul lato interno delle mura scorrono strade con traffico urbano (via Alfonso I d'Este e Rampari di San Rocco), all'esterno, a circa 75 m ad oriente della linea sismica, vi sono strade con più intensa circolazione (via Caldirolo e via Gramicia), tracciate sul terrapieno esterno del sistema fortificato.



Fig. 1 - Linea sismica onde P effettuata lungo il fossato delle mura orientali della città di Ferrara.

Le vibrazioni indotte dall'intenso transito veicolare e dalle molteplici attività antropiche hanno condizionato l'acquisizione sismica che, per consentire di ottenere dati di buona qualità, è stata svolta in ore notturne, con parziale chiusura alla circolazione di alcuni tronchi stradali, grazie alla collaborazione della Polizia Municipale. Lo svolgimento dell'indagine in ambiente urbano, ha comportato una serie di ricadute sull'organizzazione del lavoro, la sua tempistica e sicurezza



Fig. 2 - Particolare dello stendimento di geofoni della linea sismica a riflessione (onde P) e della sorgente vibroseis (MiniVib T-2500) in corrispondenza dell'estremità meridionale del profilo sismico.

del sito, anche per contenere eventuali atti di danneggiamento teppistico. Si è quindi proceduto alla richiesta di permessi per lavoro in suolo pubblico, permessi per accessi privati, ottenimento di un'ordinanza comunale per la chiusura al traffico, controllo e guardiania all'attrezzatura, etc.

La linea sismica a riflessione è stata acquisita con un sistema di registrazione telemetrico DMT Summit II/IIplus con convertitore A/D a 24 bit. Come sorgente sismica di onde P è stato utilizzato un vibroseis MiniVib T-2500 (Fig. 2). Si è optato per una sorgente vibrazionale e non impulsiva perché più adatta al contesto urbano. Come ricevitori, sono stati utilizzati *pattern* lineari di 6 geofoni a 10 Hz con distanza tra i gruppi di 10 m. I parametri di acquisizione sono stati definiti in base ai risultati dei test effettuati (Vincent *et al.*, 2006). L'utilizzo di *pattern* permette, in fase di acquisizione, di attenuare sia il rumore casuale, spesso presente in ambiente urbano, sia il rumore coerente, quale il *ground-roll* (Savit *et al.*, 1958).

Tabella 1 - Parametri di acquisizione.

Sistema di acquisizione	Summit DMT II e II plus
conversione A/D	24 bit - tecnologia Delta Sigma
formato di registrazione	SEG-2
ricevitori	10 Hz (verticali) - <i>pattern</i> lineare da 6 geofoni
intertraccia	10 m
numero canali attivi	264 (stendimento fisso)
lunghezza linea sismica	2630 m
intretraccia sorgente	20 m
sorgente sismica	Vibroseis MiniVib T-2500 (IVI)
parametri sorgente (P mode)	Upsweep 16s, 8 -140 Hz
forza	2500 lb
lunghezza registrazione	19 s
passo di campionamento	2 ms

In considerazione del contesto di particolare pregio storico ed architettonico del sito e della vicinanza delle mura urbane rinascimentali, l'acquisizione sismica è stata accompagnata da un monitoraggio vibrometrico. Questa misura è stata eseguita durante l'intera fase di acquisizione e ha permesso di monitorare in continuo i livelli di velocità prodotti dalla sorgente sismica in modo da rispettare il non superamento delle soglie previste dalla normativa DIN 4150-3 nelle aree sensibili.

La forma d'onda immessa nel terreno della sorgente MiniVib è costituita da un segnale sinusoidale a frequenza variabile (*upsweep*) compresa tra 8 e 140 Hz e durata di 16 s (Tabella 1). I dati sono stati registrati con finestre temporali di 19 s e, successivamente, il dato è stato correlato con il segnale pilota *Ground Force*. Il *dataset* così ottenuto corrisponde alla convoluzione tra una ondina di Klauder e la serie dei coefficienti di riflessione generati dai contrasti di impedenza acustica delle diverse discontinuità presenti nel sottosuolo. Nel dato sono presenti disturbi sia coerenti che incoerenti (Fig. 3); l'elaborazione ha puntato ad eliminare quest'ultimi incrementando il rapporto segnale/rumore per poi facilitare la fase di interpretazione.

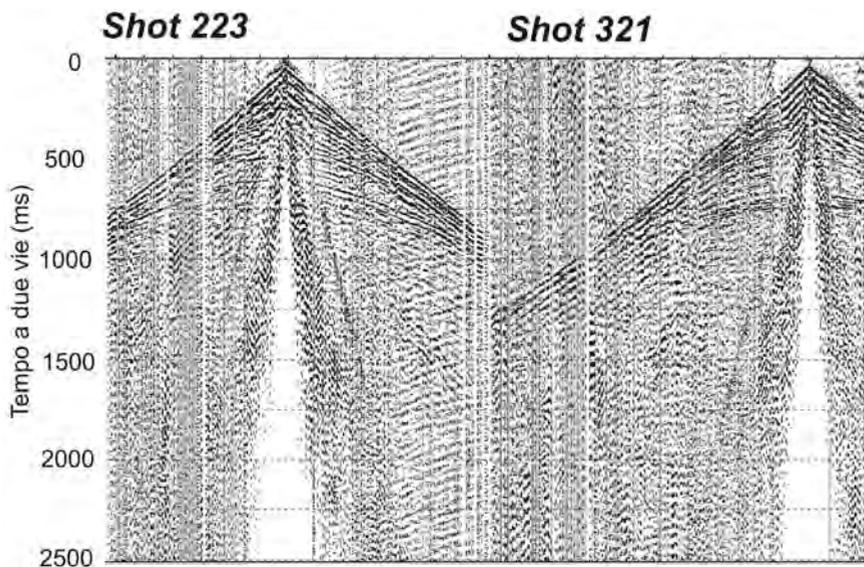


Fig. 3 - Esempio di registrazione di due energizzazioni dopo la correlazione di *ground force*. Si noti sullo *shot* 223, il disturbo periodico indotto dal passaggio di automobili a fondo linea (destra), che comunque non maschera la forte riflessione in corrispondenza del TWT a 750 s. Lo *shot* 321 registra solo presenza di rumore casuale.

Dopo il recupero d’ampiezza ed un primo filtraggio passa-banda effettuato per eliminare i rumori al di fuori dei limiti di frequenza dello *upsweep*, si è proceduto alla deconvoluzione per incrementare la risoluzione verticale. Essendo i dati acquisiti a fase zero, viene violato uno dei principi su cui si fonda l’algoritmo della deconvoluzione classica, quello dell’ondina a fase minima (Yilmaz, 2001). Per questo motivo si è applicata una deconvoluzione “a fase zero” che, per modellare lo spettro dei dati in uscita, utilizza operatori derivati dagli spettri di ampiezza dei dati in *input* (Fig. 4).

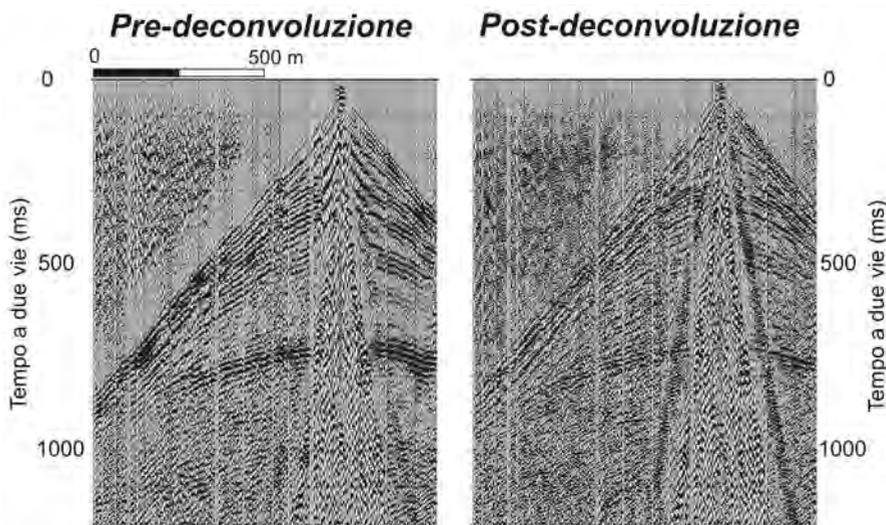


Fig. 4 - Esempio di registrazione di uno *shot* a cui è stata applicata la deconvoluzione a fase zero. A destra si può notare il notevole incremento della risoluzione verticale delle riflessioni prodotto dall’algoritmo.

I dati così ottenuti sono stati organizzati in *Common Mid Point* e utilizzati per calcolare la velocità delle onde P nel terreno, utilizzando nell'analisi di velocità il metodo della *semblance* che permette di identificare le velocità di *stack* (Fig. 5).

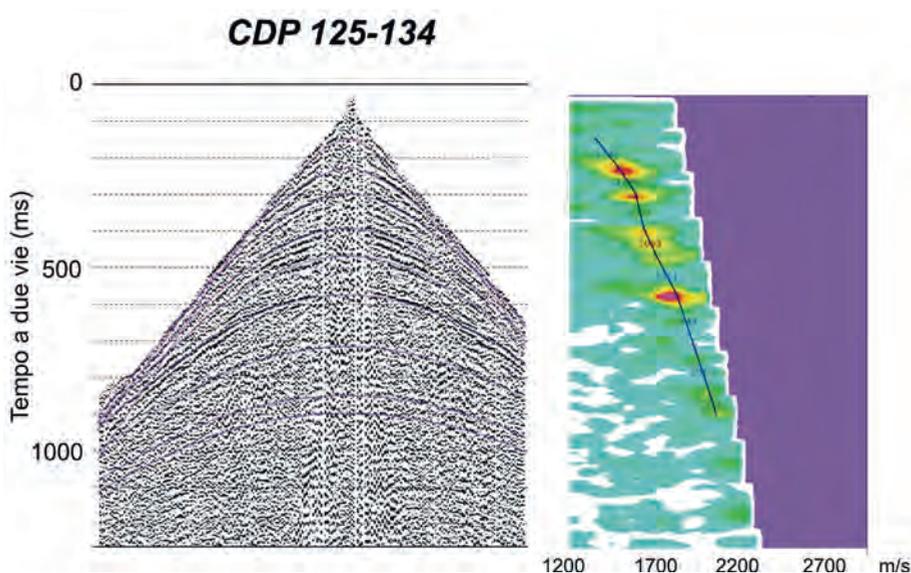


Fig. 5 - Esempio di analisi di velocità di un *supergather* di CDP. A destra il pannello *semblance* su cui sono visibili i massimi locali di correlazione che corrispondono ai valori di V_p delle diverse discontinuità delle superfici riflettenti nel sottosuolo (velocità onda P in m/s, TWT in s.).

L'analisi di velocità ha fornito i valori per la correzione di *Normal-Move-Out*, da applicare per l'ottenimento della sezione *stack*. Contestualmente, utilizzando la formula di Dix, sono state ricavate le velocità intervallari per ottenere la conversione dei tempi a due vie in profondità. Prima della conversione è stata applicata una migrazione di Kirchhoff nel dominio dei tempi (Yilmaz, 2001). La Fig. 6 mostra la sezione sismica a riflessione convertita in profondità.

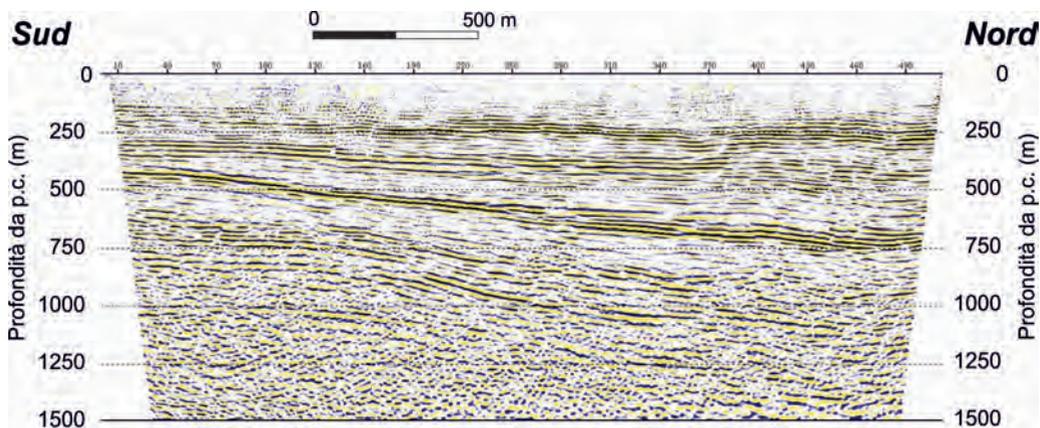


Fig. 6 - Sezione finale migrata in tempo e successivamente convertita in profondità.

3. Interpretazione

La sezione sismica ottenuta rivela l'organizzazione stratigrafica delle unità sedimentarie quaternarie e terziarie dei primi 1500 m di sottosuolo e le superfici di discontinuità sismo-stratigrafica ad esse associate. Questi dati sono particolarmente significativi, dato che in questa porzione urbanizzata del territorio non erano mai state effettuate le prospezioni sismiche per ricerca di idrocarburi che formano invece un fitto reticolo attraverso la circostante pianura. I risultati della ricerca mostrano l'importanza della deformazione tettonica sin-deposizionale quaternaria nell'evoluzione stratigrafico-deposizionale.

L'area indagata si trova a nord della cresta di una piega anticlinale, associata ai sovrascorrimenti della parte frontale dell'Appennino sepolto, che generano una significativa attività sismica. La crescita di questa struttura ha causato l'immersione verso nord delle unità stratigrafiche indagate, e l'evoluzione deformativa sin-sedimentaria è documentata dalla progressiva riduzione di pendenza al diminuire dell'età geologica dei sedimenti. Un importante riflettore sismico è associato ad una marcata discordanza stratigrafica, posta alla profondità di circa 450 m nella parte meridionale e che si abbassa verso nord, raggiungendo la profondità di poco meno di 750 m, all'estremità settentrionale del profilo. La pendenza apparente della superficie di discordanza sul piano del profilo sfiora quindi il 10%, mentre quella reale, verso NE, ne è certamente maggiore. La discordanza tronca le sottostanti successioni marine, molto probabilmente con una relazione di discordanza angolare e con una maggiore erosione nella parte meridionale. Questa superficie di discordanza ha estensione regionale e si riconosce attraverso buona parte delle pieghe ferraresi sepolte. Sulla superficie di discordanza si appoggiano successioni quaternarie, con una relazione geometrica detta di *on lap*.

I corpi "trasparenti" e le strutture lenticolari visibili nei pressi della terminazione settentrionale del profilo, fra 400 e 700 m, corrispondono verosimilmente ad argille marine, seguite da corpi deltizi lenticolari progradanti in direzione trasversale al piano del profilo. Si tratta dei depositi del "Quaternario Marino", che qui registra un'evoluzione globalmente trasgressivo-regressiva, alimentata da corpi deltizi, verosimilmente alimentati da fiumi provenienti inizialmente dalle Alpi Meridionali e successivamente dal Po. Questi corpi sedimentari mostrano un chiaro aumento di spessore verso nord, registrando gli effetti della subsidenza differenziale, legata alla deformazione sin-deposizionale. I corpi che si appoggiano sulla principale superficie di discordanza registrano verosimilmente condizioni marino-deltizie che passano verso l'alto a successioni continentali la cui deposizione fu fortemente influenzata dalle grandi fluttuazioni glacio-eustatiche. I gruppi di riflettori visibili intorno alla profondità di 250 m, nella parte meridionale del profilo, sono attribuibili al Sintema Emiliano Romagnolo Inferiore e a quello Superiore, alle cui basi è attribuita un'età di circa 650.000 e 450.000 anni (Regione Emilia-Romagna *et al.*, 1998). La parte superiore, mal registrata nel profilo a causa delle frequenze utilizzate, è interamente formata da corpi continentali, alimentati in gran parte dal Po, che registrano gli ultimi cicli di fluttuazione glacio-eustatica.

4. Conclusioni

Lo sviluppo di queste indagini geofisiche ha dimostrato come, utilizzando con attenzione le più adatte e moderne tecniche di acquisizione ed elaborazione dei segnali, sia possibile ottenere

dati sismici di elevata qualità anche all'interno di un complesso contesto urbano, caratterizzato da una difficile accessibilità e da un notevole livello di disturbo antropogenico e di connesso rumore di fondo.

Il profilo sismico ottenuto ha inoltre rivelato l'importanza della deformazione tettonica sin-sedimentaria nel sottosuolo della città di Ferrara, causata dall'attività persistente e recente delle pieghe frontali dell'Appennino. Si osserva una marcata discordanza nel Quaternario inferiore, a quota assai più bassa della corrispettiva superficie di discordanza nota sull'Alto di Casaglia. Le successive successioni marine e continentale registrano gli effetti della deformazione in atto e di una subsidenza arealmente differenziata. I risultati di queste indagini arricchiscono quindi in modo assai significativo le nostre conoscenze sulla geologia e sulla stratigrafia sismica del sottosuolo urbano, in un'area precedentemente priva di indagini sismiche. Questo rappresentava uno degli obiettivi principali del Progetto CLARA che è stato pienamente raggiunto. Una migliore conoscenza delle proprietà sismiche e stratigrafiche del sottosuolo permetterà inoltre di migliorare la nostra comprensione della risposta sismica locale, perfezionando così le mappe di microzonazione sismica del territorio comunale di Ferrara. I dati risultano pertanto particolarmente utili anche per una migliore comprensione e mitigazione del rischio sismico in questa area urbana, ricca di valori economici e storico-artistici..

BIBLIOGRAFIA

- Regione Emilia-Romagna - Servizio Geologico Sismico e dei Suoli, ENI-AGIP, 1998, *Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna*, 119 pp., Bologna.
- Savit C.H., Brustad J.T. e Sider J., 1959, *The moveout filter*. *Geophysics*, 23, pp. 1-25.
- Vincent P.D., Tsoflias, G.P., Steeples D.W. e Sloan S.D., 2006, *Fixed-source and fixed-receiver walkaway seismic noise tests: A field comparison*. *Geophysics* 71 (6), pp. W41-W44.
- Williams R.A., Stephenson W.J. e Odum J.K., 2006, *Seismic imaging in urban areas: examples and lessons learned*. In: *Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems*, EEGS Conference Proceedings, 2006 Annual Mtg, Seattle, Wash., April 2-6, p. 10.
- Yilmaz O., 2001, *Seismic Data Analysis*. Society of Exploration Geophysicists. Pages: 2065.

Prospezioni sismiche a riflessione onde SH ad alta risoluzione in ambiente urbano a supporto della pianificazione territoriale - obiettivi superficiali (< 100 m)

A. AFFATATO¹, L. BARADELLO¹, L. PETRONIO¹, A. BARBAGALLO¹, D. SORGO¹, R. CAPUTO², M. STEFANI³ e N. ABU ZEID²

¹ OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

² Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

³ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Le prospezioni geofisiche sono tecniche di investigazione non invasive di tipo indiretto utili per ottenere informazioni sulla natura e sulla struttura del sottosuolo. Sono utilizzate per ridurre al minimo le operazioni di ricerca basate su interventi diretti nel sottosuolo (perforazioni) e quindi per ridurre i costi della ricerca stessa. Si avvalgono di diversi metodi (gravimetrico, magnetico, sismico, elettrico o geoelettrico, elettromagnetico, radioattivo, termico o geotermico), che presentano caratteristiche proprie e vengono utilizzati in relazione alla profondità ed alle caratteristiche degli obiettivi.

Nel presente contributo è presentata un'applicazione del metodo sismico a riflessione con onde di taglio polarizzate trasversalmente (SH). Questa metodologia offre notevoli vantaggi nella caratterizzazione dinamica dei terreni in quanto le onde SH mantenendo la polarizzazione nel corso della propagazione non generano conversioni in corrispondenza di discontinuità elastiche. Inoltre, la propagazione delle onde SH è limitata ai mezzi solidi e quindi le velocità che si ottengono sono quelle della fase solida dei sedimenti. Le onde di taglio (S) avendo una velocità minore rispetto le onde compressionali (P) permettono, a parità di spettro di frequenza, una risoluzione maggiore e quindi immagini sismo-stratigrafiche di miglior dettaglio (Garotta, 2000). La determinazione dei valori di propagazione delle onde di taglio riveste un ruolo fondamentale anche nella caratterizzazione dinamica dei materiali (modulo di taglio) e per lo studio della Risposta Sismica Locale, come approccio semplificato per la classificazione del sottosuolo per gli studi di Microzonazione Sismica del territorio italiano (NTC2018 e EC08).

Le prime applicazioni ingegneristiche della sismica a riflessione onde S risalgono alla metà degli anni '90 (Ghose *et al.*, 2018), ma solo recentemente la disponibilità di sorgenti sismiche anche vibrazionali che generano onde di taglio ha permesso l'applicazione del metodo sismico a riflessione anche per applicazioni ingegneristiche con obiettivi poco profondi.

In particolare, queste sorgenti di tipo vibrazionale non sono invasive e risultano particolarmente adatte ad acquisizioni in ambienti urbani dove è spesso presente un elevato rumore antropico (Krawczyk, 2012; Krawczyk e Polom, 2018).

2. Approccio utilizzato e risultati

Nell'ambito del progetto CLARA è stata verificata l'applicabilità della sismica a riflessione con onde S in un contesto urbano. Per l'esecuzione del test è stato individuato un'area residenziale



Fig. 1 - Mappa dell'area oggetto di indagine. La linea sismica (in giallo) è posta all'interno del Campo Scuola di via Portacatena (Ferrara).

sita nella parte nord-occidentale della città di Ferrara. La Fig. 1 mostra l'area dove sono state ubicate le indagini geofisiche.

L'obiettivo del test consisteva nel verificare l'applicabilità del metodo sismico a riflessione con onde SH, in un contesto urbano, valutandone le capacità penetrative e risolutive. E' stata acquisita una linea sismica lunga 140 m con sorgente vibrazionale in modalità onde SH e ricevitori singoli

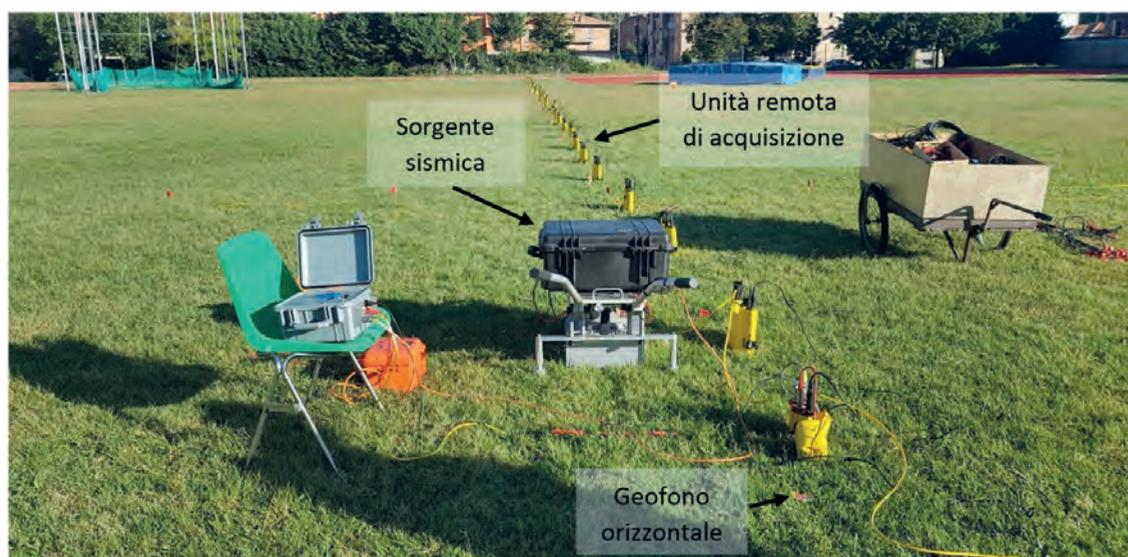


Fig. 2 - Particolare della linea sismica onde SH e della sorgente vibrazionale Elvis III.

orizzontali a frequenza propria di 14 Hz posizionati con una distanza di intertraccia di 1 m e con asse perpendicolare allo stendimento.

Per l'energizzazione è stata utilizzata la sorgente Elvis III – Geosym, un minivibratore portatile e facilmente trasportabile, tale da essere movimentato da un singolo operatore, anche in aree non adatte al transito di mezzi. In Fig. 2 sono raffigurati lo stendimento e la sorgente durante le fasi di acquisizione.

Per il rilievo è stato selezionato uno *sweep* con una banda di frequenza 20-120 Hz, 14 s. Per attenuare le eventuali componenti compressionali, sono state eseguite due energizzazioni (stessa direzione e verso opposto) e le registrazioni successivamente sommate in fase. Nella Tabella 1 sono riportati i principali parametri di acquisizione.

Tabella 1 - Parametri di acquisizione.

Sistema di acquisizione	Summit DMT II e II plus
conversione A/D	24 bit - tecnologia Delta Sigma
ricevitori	14 Hz (orizzontali – onde S, tipo LGT-20D40)
sorgente sismica	Elvis III S8 - Geosym
parametri sorgente (SH mode)	Upsweep 10 s, 20-120 Hz
lunghezza record	1 s
passo di campionamento	0,125 ms
formato di registrazione	SEG-2

La Fig. 3 mostra un esempio di dato sismico con la relativa interpretazione del campo d'onda. Il dato sismico è stato poi elaborato utilizzando una sequenza di tipo standard che consiste nei seguenti passaggi principali:

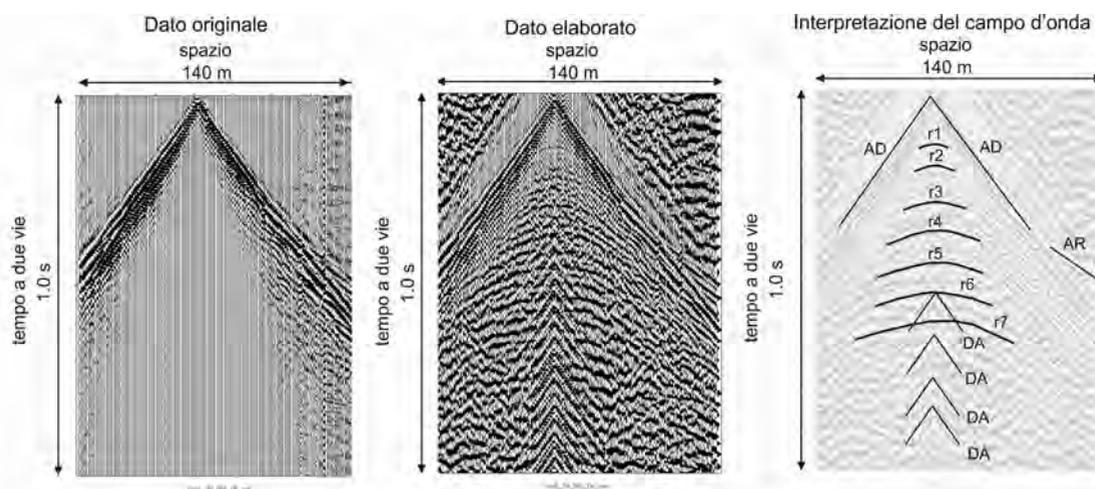


Fig. 3 - Esempio di *Common-Shot-Gather*. A sinistra è rappresentato il dato originale; al centro, lo stesso dato dopo l'applicazione di un filtraggio in frequenza (passabanda 14 - 80 Hz) ed un operatore di guadagno (AGC 0.2 s); a destra l'interpretazione del campo d'onda dove sono riportati i principali eventi presenti nel *Common-Shot-Gather* (AD =arrivi diretti, AR = arrivi rifratti; r1 – r7 = principali riflettori, DA = rumore associato alla distorsione armonica e/o al disaccoppiamento tra sorgente e terreno).

- editing dei dati;
- *stack* verticale;
- applicazione delle geometrie;
- recupero della divergenza sferica;
- filtraggio in frequenza;
- analisi di velocità con la tecnica *Semblance*;
- correzione dinamica NMO (*Normal Move Out*);
- *stack*.

La Fig. 4 riporta un esempio di analisi di velocità delle onde SH su CDP ottenuta applicando la funzione *Semblance* e dove sono evidenziati i massimi di coerenza e le relative velocità intervallari.

L'elaborazione dei dati ha quindi consentito di ottenere la sezione *stack* come riportata in Fig. 5.

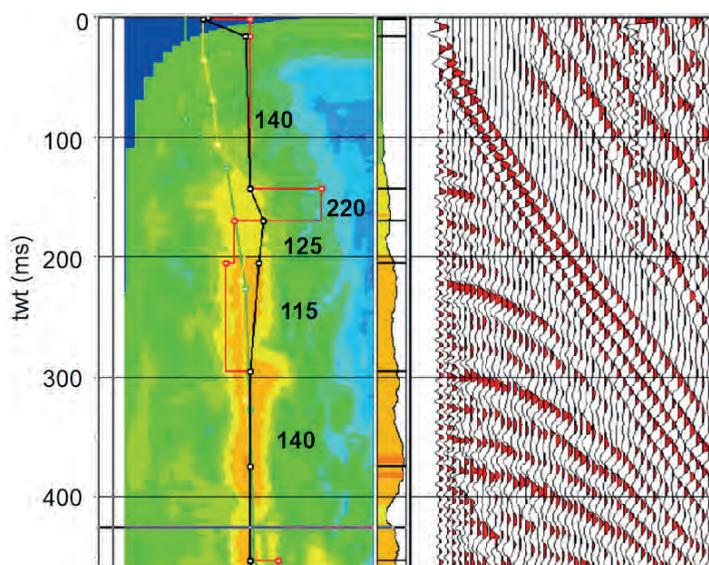


Fig. 4 - Analisi di velocità delle onde SH su CDP. A sinistra la funzione *Semblance* con evidenziati i massimi di coerenza e le relative velocità intervallari espresse in m/s. La linea nera indica l'andamento della velocità di *stack*, mentre quella rossa la velocità intervallare calcolata con Dix. A destra un raggruppamento di CDP dove sono ben evidenti le iperboli corrispondenti ad una serie di riflessioni.

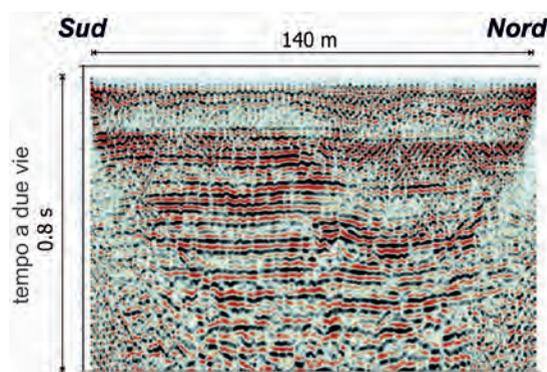


Fig. 5 - Sezione sismica SH ottenuta all'interno dell'anello di atletica lungo l'asse maggiore.

3. Interpretazione geologica

Nel sito test di Ferrara la sismica a riflessione con onde SH ha fornito dati attendibili ed interpretabili confermando l'applicabilità di questa metodologia di prospezione. Nel dato originale (*Common-Shot-Gather*) sono riconoscibili gli eventi riflessi che trovano conferma nella sezione *stack*. Considerando una frequenza centrale di 50 Hz, una velocità media di 150 m/s ed il criterio di Widess (1973), la risoluzione verticale, è metrica.

La stratigrafia della sezione è stata interpretata (Fig. 6) sulla base delle conoscenze geologiche sul sottosuolo urbano, derivate dallo studio di centinaia di prove penetrometriche e sondaggi stratigrafici geognostici disponibili nelle aree circostanti. I primi 12 m di sottosuolo sono formati da prevalenti argille, accumulate in un'area di piana alluvionale e depressione interalvea attiva durante l'Olocene. Le riflessioni visibili nella parte superiore di questa unità sono influenzate dalla superficie topografica e dal consolidamento dei sedimenti presenti nella fascia vadosa. La maggior parte dell'unità si trova invece in falda freatica, anche se con una permeabilità relativamente bassa. In questi fanghi teneri, quindi, le velocità sismiche sono particolarmente basse. Secondo la terminologia adottata dal Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, questi sedimenti coesivi appartengono al Subsistema di Ravenna, AES8, parte del Sistema Emiliano-(Molinari *et al.*, 2009). In questa area, i sedimenti sono di età pre-medievale, per cui non è presente l'Unità di Modena AES8a.

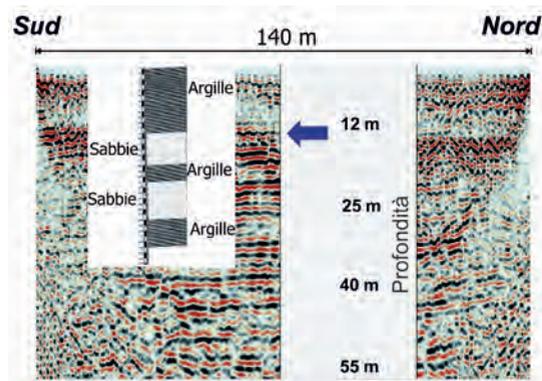


Fig. 6 - Sezione sismica a riflessione SH interpretata.

A 12 m di profondità, è presente una netta riflessione che corrisponde ad una netta discontinuità stratigrafica corrispondente al tetto delle sabbie fluviali singlaciali. Questa superficie è associata ad una lacuna stratigrafica in concomitanza dello sviluppo di un paleosuolo con concrezioni calcaree, che induriscono l'orizzonte, accentuando il contrasto sismico con i fanghi sovrastanti. La lacuna ha carattere non deposizionale, localmente erosivo. La superficie di discontinuità ha carattere regionale ed è riconoscibile attraverso tutto il bacino sedimentario padano. In Emilia-Romagna marca il tetto del Subsistema di Villa Verrucchio, AES7.

Fra 12 e 25 m circa di profondità vi sono prevalenti sabbie medio-grossolane, deposte dal fiume Po, durante le fasi singlaciali fredde e di basso stazionamento del livello del mare, legate all'ultima glaciazione (Würmiana). Vi è una subordinata intercalazione limoso-argillosa, che si ritrova anche in altre vicine successioni, ma che è comunque arealmente discontinua. Questo

intervallo presenta un'elevata permeabilità e trasmissività idraulica e costituisce il primo corpo acquifero semi-confinato con parziale ricarica laterale dall'attuale Po. Questi corpi sabbiosi presentano velocità sismiche decisamente superiori a quelle dei sovrastanti fanghi olocenici. Questi corpi sabbiosi formano la parte medio alta di Subsintema AES7.

Fra 25 e 55 m si trova una successione di fanghi continentali, contenenti corpi nastriformi di sabbie di riempimento di canale fluviale. Nella parte bassa l'accuratezza dei dati sia geofisici che stratigrafici si degrada relativamente, dato anche il minor numero di indagini dirette che raggiungono queste profondità. Si tratta comunque certamente di depositi fluviali del Pleistocene superiore, che formano la parte medio-bassa del Subsintema AES7, nella parte più bassa dell'intervallo potrebbe essere presente il tetto del Subsintema di Bassano AES6.

Le conoscenze così acquisite sulla stratigrafia e le proprietà meccaniche delle prime decine di metri di sottosuolo permetteranno sicuramente una migliore comprensione della risposta sismica locale e della correlazione fra storia deposizionale, assetto stratigrafico, caratteri petrofisici e proprietà sismiche del sottosuolo urbano.

BIBLIOGRAFIA

- Garotta, R., 2000, *Shear waves from acquisition to interpretation: Distinguished Instructor Series*, 3, SEG, Tulsa.
- Ghose, R., Nijhof, V., Brouwer, J., Matsubara, Y., Kaida, Y., and Takahashi, T., 1998, *Shallow to very shallow, high-resolution reflection seismic using a portable vibrator system*: *Geophysics*, 63(04)1295–1309.
- Krawczyk, C.M., Polom, U., Trabs, S., Dahm, T., 2012. *Sinkholes in the city of Hamburg-New urban shear-wave reflection seismic system enables high-resolution imaging of subsrosion structures*. *Journal of Applied Geophysics*, 78, pp. 133-143.
- Krawczyk, C. M. and Polom, U., 2018. *Detection of Potential Slide Planes in Onshore Urban Areas Using Shear Wave Reflection Seismics*. In *Atlas of Structural Geological Interpretation from Seismic Images* (eds A. A. Misra and S. Mukherjee). doi: 10.1002/9781119158332.ch32.
- Prado, R. L., Malagutti, F.W., Dourado, J.C., 2001. *The use of shallow seismic reflection technique in near surface exploration of urban sites: an evaluation in the city of São Paulo, Brazil*. *Revista Brasileira de Geofísica*, 19(3), pp. 293-302.
- Widess, M., 1973, *How thin is a thin bed?*: *Geophysics*, 38, 1176–1180.

Il Quaternario superiore nel sottosuolo di Ferrara: penetrofacies ed architettura deposizionale

M. STEFANI¹, L. MINARELLI² e A. PAVANATI³

¹ Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

² INGV Roma1, Sede L'Aquila

³ Studio Geologico Pavanati, Porto Tolle

1. Finalità e metodi della ricerca

Nelle città e aree urbanizzate occorre prevenire o mitigare i rischi indotti da fenomeni pericolosi quali alluvioni, frane e terremoti. In questo contesto, gli strumenti urbanistici esistenti non si sono sempre dimostrati efficaci nel garantire la sicurezza degli insediamenti. Per contenere i rischi indotti dalle accelerazioni sismiche è fondamentale valutare la risposta sismica locale, associata a fenomeni quali l'amplificazione e la liquefazione di sedimenti granulari saturi d'acqua. Per fare ciò, è necessario ricostruire nel miglior modo possibile la stratigrafia del sottosuolo superficiale. La ricerca qui illustrata è stata perciò finalizzata alla ricostruzione della stratigrafia delle prime decine di metri di sottosuolo. La ricerca fornisce un supporto geologico utile alla microzonazione sismica, in un'area caratterizzata da un'importante sismicità storica (Guidoboni, 1987; Caputo *et al.*, 2016), da significativi fattori di amplificazione sismica e da un elevato potenziale di liquefazione, nelle vaste aree in cui sabbie sature sono presenti nei primi 20 m di sottosuolo. Questa ricerca fornisce anche un supporto all'interpretazione delle indagini geofisiche, discusse in questo volume, come le indagini sismiche ad alta frequenza effettuate nell'area del Campo Scuola (Affatato *et al.*, 2019).

La ricostruzione dei caratteri geologici dei primi 100 m di sottosuolo si è basata sulla raccolta, valutazione, correlazione stratigrafica e interpretazione geologica di oltre 4000 indagini, effettuate precedentemente, per prevalenti finalità idriche o geotecniche. Questa banca dati è stata calibrata da nuove penetrometrie a sismocono e prove a dilatometro sismico, progettate in base all'analisi critica dei dati pregressi. La documentazione delle precedenti prove si trovava prevalentemente dispersa presso svariati uffici pubblici e privati, o in parte raccolta, con criteri disomogenei, presso l'Amministrazione Comunale di Ferrara e il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Le prove raccolte presentano una buona densità nelle aree di recente espansione edilizia o in siti ove sono state progettate infrastrutture, ma sono carenti in aree a vocazione agricola. Nel centro storico, sono state recentemente realizzate numerose nuove prove, a seguito dei danni sismici del 2012. Fino a 30-40 m, le indagini sono abbondanti, a profondità maggiori, i dati si rarefanno e peggiorano di qualità. Particolare attenzione è stata posta alla localizzazione spaziale delle prove, ma nonostante gli sforzi, non è stato sempre possibile giungere a un posizionamento preciso. Le prove di sottosuolo sono state, ove possibile, acquisite in formato numerico informatizzato. Ove fosse disponibile il solo dato numerico cartaceo, esso è stato scansionato e digitalizzato; è stata digitalizzata anche una parte delle prove di cui era disponibile il solo grafico cartaceo. I dati raccolti sono stati resi fra loro omogenei, georiferiti e inseriti in una banca dati, realizzata con criteri congruenti a quelli utilizzati dall'Amministrazione Comunale di Ferrara e dal Servizio Geologico, Sismico

e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna. Le migliaia di prove raccolte comprendono sondaggi stratigrafici, stratigrafie di pozzi ed un notevole numero di prove penetrometriche. Le penetrometrie forniscono un metodo d'indagine particolarmente efficace nei sedimenti tardo-quadernari sciolti che formano il sottosuolo di questa porzione della bassa Pianura Padana (Amorosi e Marchi, 1999). Particolarmente utili sono state le circa 400 prove penetrometriche a piezocono digitale (CPTU) e a piezocono sismico (SCPTU). Dopo l'informatizzazione ed organizzazione della banca dati, si è proceduto ad interpretare le prove penetrometriche in termini di litologia e organizzazione stratigrafica verticale. I caratteri litologici e la suscettibilità alla liquefazione cosismica delle prove sono stati valutati tramite il programma CLiq v.3.0 della Geologismiki. L'analisi della variazione verticale dei parametri penetrometrici, svolta nel contesto stratigrafico, permette di riconoscere i vari corpi deposizionali e di interpretare i loro ambienti di sedimentazione. Il significato stratigrafico di questi corpi può essere però compreso solo attraverso la correlazione laterale delle prove e dal confronto con i sondaggi stratigrafici a carotaggio continuo.

2. Esempi di interpretazione stratigrafica di prove penetrometriche

La Fig. 1 illustra, come esempio metodologico, l'andamento dei valori penetrometrici di due prove fra loro vicine, effettuate alla periferia occidentale della città. I grafici di destra mostrano, dalla superficie fino a 20 m, la presenza di sabbie di riempimento di diverse generazioni di canali a meandro del Po, che sono qui a diretto contatto con le sottostanti sabbie di media pianura alluvionale, deposte durante fasi dell'ultima glaciazione, caratterizzate da elevate resistenze alla punta, con picchi asimmetrici. La prova rappresentata sulla sinistra, effettuata a poche decine di

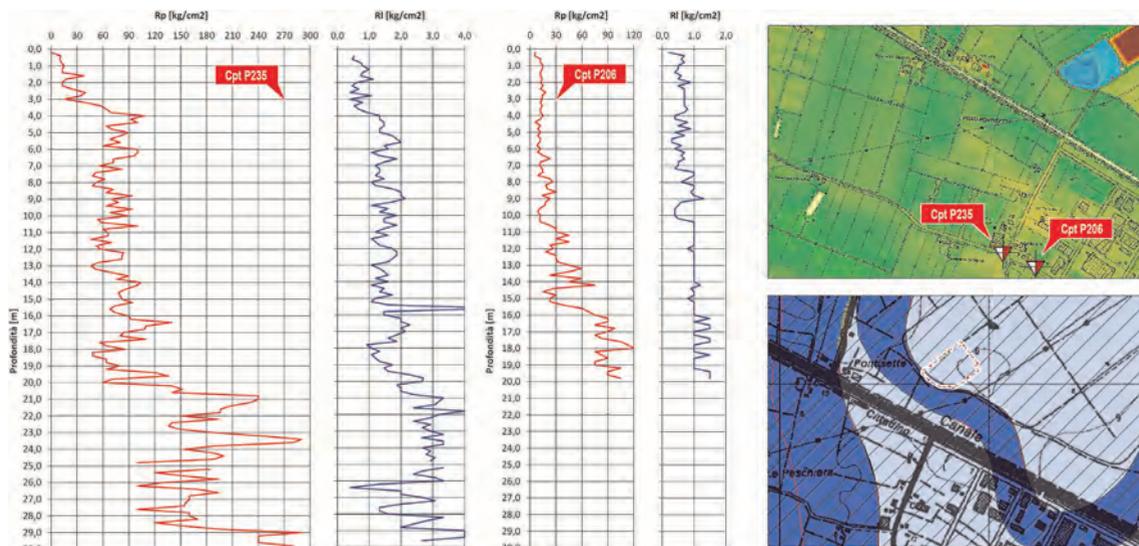


Fig. 1 - Valori di resistenza alla punta (RP) e di attrito laterale (RI) di due prove penetrometriche realizzate alla periferia occidentale di Ferrara, nei pressi di Pontesette. La prova di sinistra mostra sabbie oloceniche di alveo di Po, saldate alle sottostanti sabbie grossolane singlaciali; la prova di destra documenta sedimenti fini olocenici di piana interalvea. Nello stralcio della carta geologica, le sabbie di alveo sono rappresentate in blu, i fanghi fini in colore più chiaro.

metri di distanza, mostra una stratigrafia assai diversa, con la parte superiore dominata da fanghi argillosi, depositi in condizioni di piana interalvea, durante l’Olocene.

Le misure a piezocono digitale (SCPTU), accompagnate dalla registrazione delle velocità V_s , permettono una lettura più raffinata, sia dei caratteri sedimentologici che sismici. La Fig. 2 mostra una prova penetrometrica effettuata a nord della città, nei pressi di Pontelagoscuro. Il grafico evidenzia la facies penetrometrica di sabbie grossolane, deposte in canali a treccia (*braided rivers*), in condizioni di media pianura alluvionale singlaciale. Le velocità V_s sono abbastanza elevate, normalmente comprese fra 250 e 280 m/s. Valori analoghi si misurano nelle sabbie singlaciali di tutto il sottosuolo dell’area di Ferrara. I valori di resistenza alla punta sono elevati, considerando il contesto stratigrafico, fluttuando normalmente fra 15 e quasi 25 MPa, mentre i valori di pressione U sono assai prossimi ai valori idrostatici, data l’elevata permeabilità di queste sabbie.

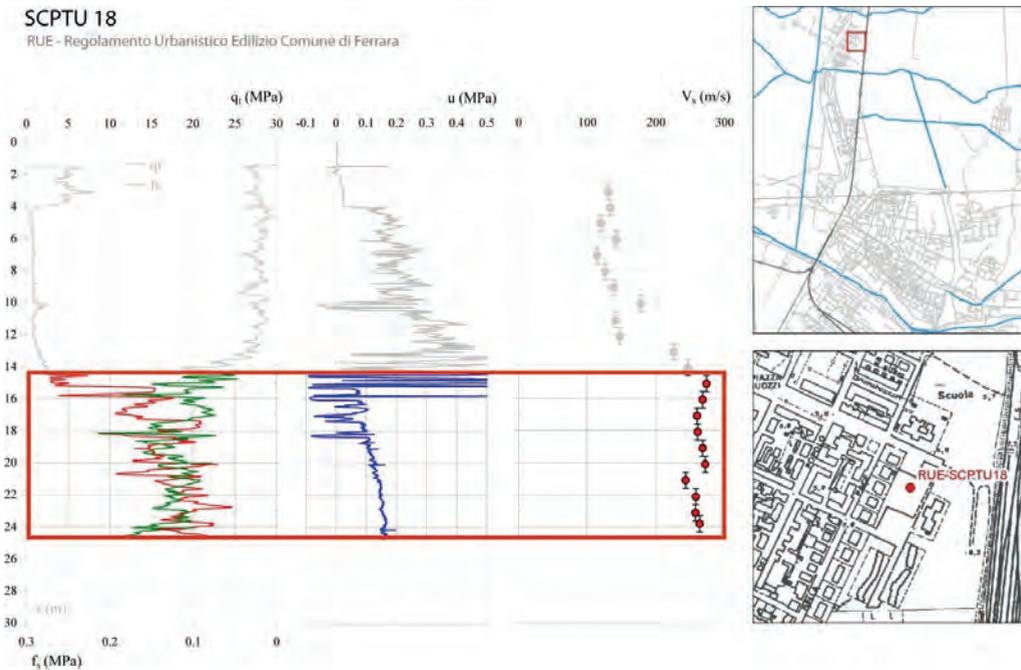


Fig. 2 - Grafici della resistenza alla punta (q_t), attrito laterale (f_s), pressione neutra (u) e velocità delle onde sismiche seconde (V_s) misurate dalla prova a piezocono sismico realizzata presso la scuola materna di Pontelagoscuro. Il riquadro evidenzia il corpo di sabbie grossolane singlaciali parte del Subsistema AES7, caratterizzato da velocità sismiche relativamente elevate.

La Fig. 3 illustra la facies penetrometrica di sabbie e limi del canale principale del Po. La prova è stata eseguita in corrispondenza dell’alveo medievale e rinascimentale. I valori di V_s fluttuano fra 180 a 220 m/s. Queste sabbie oloceniche presentano quindi valori inferiori a quelli delle sabbie pleistoceniche, ma superiori a quelli dei coevi fanghi di piana inondabile. La resistenza alla punta decresce globalmente verso l’alto, a partire dai valori elevati in corrispondenza al lag grossolano di fondo canale, a circa 15 m. I valori di resistenza alla punta decrescono infatti da 20 a 3 MPa, passando da sabbie grossolane di Po a limi argillosi con apporti di Reno. Questo andamento

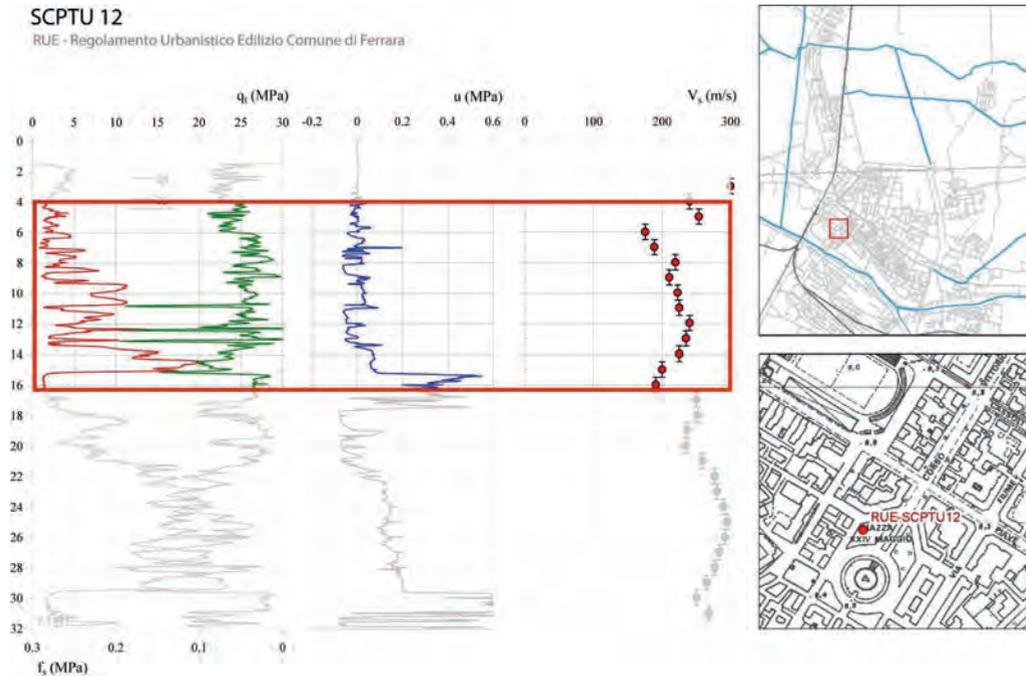


Fig. 3 - Valori di resistenza alla punta (q_t), attrito laterale (f_s), pressione neutra (u) e velocità delle onde sismiche secondarie (V_s) registrati da una prova a piezocono sismico nei pressi della Piazza XXIV Maggio. Sotto i 22 m si osservano sabbie singlaciali. L'andamento della resistenza alla punta della porzione soprastante riflette la sequenza positiva delle sabbie e sabbie limose di riempimento del canale principale del Po di età antica e medioevale, la parte sommitale della successione registra sedimenti più fini di Reno e la fase di abbandono, alla fine XVI secolo, seguita dall'accumulo di materiali di riporto.

corrisponde all'evoluzione *fining upward* del corpo sedimentario, che registra la migrazione della sponda e la progressiva riduzione del flusso del canale, abbandonato dal Po verso la fine del XVI secolo, tanto che sul suo corpo di alveo vi fu costruita la fortezza pontificia, poi demolita, registrata dai 4 m sommitali di materiali di riporto.

3. Profili geologico-stratigrafici di sottosuolo

Una volta analizzate le prove puntuali, si è costruita una griglia di profili geologico-stratigrafici, derivanti dall'interpolazione di dati puntuali, quali sondaggi stratigrafici e prove penetrometriche (CPT, CPTU, SCPTU). In questo contributo, sono illustrati due profili che descrivono i primi 35 m di sottosuolo, a ovest e a sud del centro storico. La posizione geografica dei profili è illustrata dalle tracce planimetriche di Fig. 4. Il profilo A-A' si sviluppa, con lunghezza di circa 4200 m, subito a sud del centro storico, mentre quello B-B' si allunga, per 5300 m, a ovest e nord-ovest di esso. In entrambi i profili si osserva una chiara bipartizione stratigrafica. L'unità inferiore è decisamente più sabbiosa e si è in gran parte sedimentata in condizioni singlaciali di stazionamento basso del livello eustatico. Questa porzione è attribuibile al Subsistema di Villa Verrucchio (AES7), seguendo la terminologia adottata dal progetto cartografico CARG al 1/50.000. Il tetto è marcato da un paleosuolo di estensione regionale (Amorosi *et al.*, 2016), che corrisponde alla deglaciazione delle Alpi e marca la base del seguente Subsistema di Ravenna



Fig. 4 - Traccia topografica dei due profili stratigrafici di sottosuolo illustrati nelle figure successive. Il profilo A-A' lambisce le mura urbane meridionali, mentre quello B-B' si allunga lungo il Canale Boicelli.

AES8. Quest'ultima unità stratigrafica è superiormente limitata dalla superficie topografica ed è dominata da fanghi argillosi di piana interalvea, che passano lateralmente a corpi di limi e sabbie d'argine naturale e alveo.

La Fig. 5 mostra un estratto del profilo B-B', in cui sono rappresentati i sondaggi stratigrafici e i valori di resistenza alla punta delle prove penetrometriche. Nella parte meridionale della figura, nella parte superiore (AES8), si osservano sabbie di riempimento di più generazioni di canali di Po, analoghe a quelle illustrate in Fig. 3, affiancati da corpi fini di argine naturale e piana inondabile. La parte inferiore è formata da sabbie singlaciali di AES7, analoghe a quelle la cui espressione penetrometrica è visibile nella suddetta figura.

Nel profilo meridionale A-A', la porzione inferiore singlaciala, corrispondente alla parte alta di AES7, mostra un'architettura deposizionale complessa. Si sono riconosciuti due corpi di sabbie di canale, uno nella parte occidentale del profilo, l'altro, meno sviluppato e di granulometria più fine, a cavallo di Via Bologna. Questi corpi di sabbie fluviali medio-grossolane hanno spessori di 10-15 m e sono caratterizzati da un rapido contatto laterale con sedimentati fangoso-limosi, contenenti intercalazioni sabbiose tabulari, con spessori di 2-4 m. La rapidità dei passaggi laterali tende a fare escludere rapporti di eteropia. L'ipotesi più probabile è che i corpi di canale riempiano qui, almeno in parte, incisioni vallive di una pianura terrazzata. Nel complesso, i corpi singlaciali si

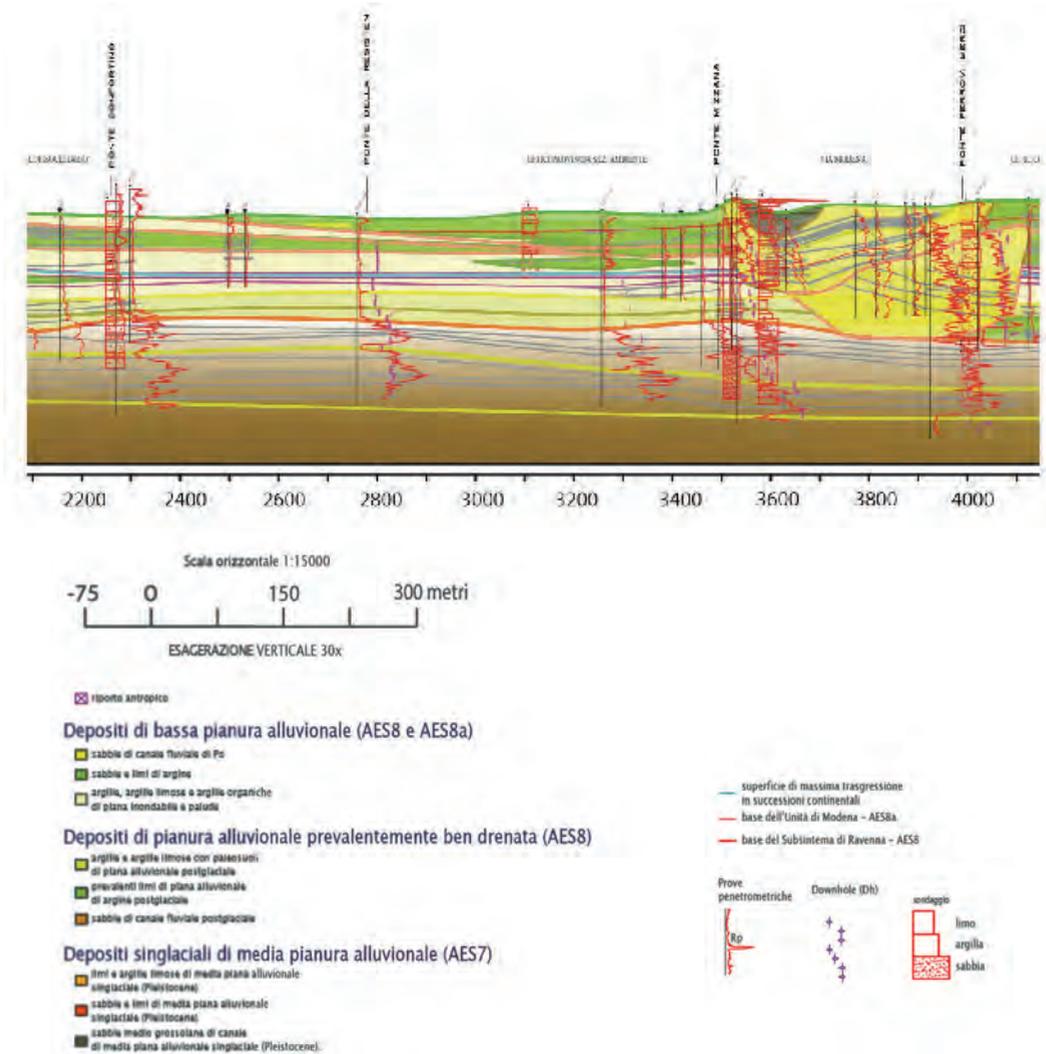


Fig. 5 - Estratto della porzione centro-meridionale del profilo B-B', con schematizzate le stratigrafie di sondaggi stratigrafici e i valori di resistenza alla punta di prove penetrometriche. La linea arancione indica il tetto del corpo di sabbie singlaciali del Substema di Villa Verrucchio (AES 7), a cui si sovrappongono i corpi fangosi del Substema di Ravenna (AES8), che passano lateralmente alle sabbie del canale di Po, a sud di Via Modena, rappresentate in giallo. Si ringrazia Giulia Busatti e Marco Guidi, che hanno collaborato, nell'ambito del loro tesi di laurea, al disegno dei profili.

approfondiscono verso est, con una pendenza dovuta, in gran parte, ad una deformazione post-deposizionale, indotta da tassi di subsidenza arealmente variabili. Il Substema di Villa Verrucchio AES7 è limitato superiormente da una superficie di discordanza, a cui si sovrappongono depositi di piana alluvionale, ascrivibili al Substema di Ravenna (AES8). La parte inferiore di AES8 mostra un importante corpo sabbioso di Po, fra la Darsena e il Bastione di San Pietro. Queste sabbie passano lateralmente ad ampi volumi di limi, limi sabbiosi e argille di argine e piana alluvionale drenata, soggetti a pedogenesi. La parte superiore del profilo è dominata da successioni argilloso-limoso-sabbiose di argine naturale e piana inondabile; a oriente di Via Bologna, sono presenti sabbie del canale di Po, corrispondenti all'*Eridanus* romano e al Po di Ferrara medievale. Le fasi più recenti, cinquecentesche, di abbandono dell'alveo sono testimoniate da sedimenti di Reno, immesso

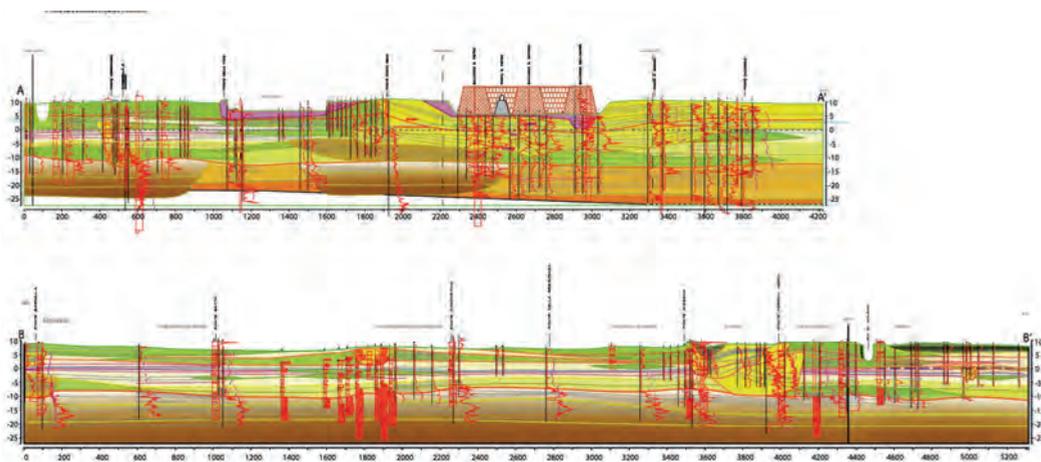


Fig. 6 - Profili stratigrafici A-A', a sud del centro storico, e B-B', ad ovest di esso. Per la localizzazione, vedi Fig. 4. Al di sotto della linea mediana arancione sono visibili i depositi singlaciali di AES7, interamente sabbiosi a ovest, alternativamente sabbiosi e fini in quella meridionale. La parte superiore del profilo appartiene ad AES8 ed è dominato da fanghi interalvei e corpi di argine naturale, intervallati da sabbie di canale fluviale. Il corpo dell'alveo principale del Po di età antica e medievale è visibile in entrambi i profili. Simbologia come in Fig. 5.

artificialmente nel Po. Le vicende di età moderna sono registrate da ampi volumi di terreni di riporto, che possono superare i 5 m di spessore, come in corrispondenza del bastione di Sant'Antonio.

Il profilo occidentale B-B' è caratterizzato da una parte inferiore formata dal Subsistema di Villa Verrucchio (AES7), la cui parte superiore è qui interamente formata da sabbie medio-grossolane, deposte durante fasi singlaciali. Questa parte è formata dall'amalgamazione di sabbie sedimentate in canali *braided*, con profondità di 3-4 m ciascuno. Vicino l'estremità meridionale del profilo, compaiono intercalazioni limose, che passano verso sud a corpi prevalentemente limosi, di provenienza appenninica, anche se le relazioni geometriche di questo contatto laterale non sono visibili nel profilo illustrato. Nel complesso, i corpi singlaciali si approfondiscono da nord a sud, registrando anche qui una certa deformazione post-deposizionale. Il tetto delle sabbie singlaciali (AES7) è netto e marcato anche qui da un paleosuolo, a cui si sovrappone il Subsistema di Ravenna (AES8), che qui è dominato da sedimenti fini, argille e argille limose, di piana interalvea. Nella parte meridionale del profilo, a sud di Via Modena, s'intercala l'importante corpo di sabbie di palealveo del Po, di età antica e medievale. Questo corpo è qui in contatto geometrico e continuità idraulica con le sabbie di AES7. La stratificazione interna al corpo riflette la variazione di geometria dall'alveo, che presentava prima una concavità verso nord, poi verso sud. Altri corpi sepolti di canale sono stati scoperti nella parte settentrionale del profilo. All'estremità meridionale del profilo sono stati riconosciuti sedimenti apportati dal Fiume Reno, durante il XVII secolo, come documentato da fonti storiche.

4. Conclusioni

La ricerca ha dimostrato come sia possibile ricostruire l'architettura deposizionale delle unità del Pliocene superiore e dell'Olocene, sepolte nei primi 40-50 m di sottosuolo, attraverso la raccolta e integrazione delle migliaia di indagini puntuali pregresse, calibrate attraverso l'acquisizione di nuove prove sismiche a dilatometro e a piezocono. La realizzazione di una rete

di profili stratigrafici derivati dalla correlazione bidimensionale di prove puntuali è la premessa per la realizzazione di un modello digitale tridimensionale del sottosuolo urbano.

La parte inferiore delle successioni indagate (AES7) è formata da sedimenti di media pianura alluvionale fredda, deposti durante la parte recente del Pleistocene, corrispondente alla Glaciazione Wuermiana delle Alpi. Questa fase si sviluppò durante un periodo di stazionamento basso del livello eustatico. Nella parte nord-occidentale e settentrionale del territorio comunale di Ferrara, questa unità è interamente formata da sabbie medio-grossolane, talvolta ghiaiose o ciottolose, deposte in ampi sistemi di fiumi a treccia, del Po e di probabili fiumi veneti. Questi corpi presentano elevate permeabilità e trasmissività idrauliche. Nella parte meridionale del territorio comunale, l'unità è invece formata da limi, talvolta argillosi, intercalati da sottili corpi sabbiosi tabulari, con spessori di pochi metri e di alimentazione appenninica. L'unità singlaciale è limitata al tetto da una superficie netta ed erosiva, intagliata da terrazzi di pochi metri di altezza, accompagnato da un paleosuolo con concrezioni carbonatiche. La discordanza si ritrova a profondità variabili fra gli 8 e i 15 m, nelle aree di alto strutturale di Casaglia e nella fascia a ridosso del fiume Po, a 15-25 m nelle zone di sinclinale meridionale, verso Coronella. Un'analogia pendenza è visibile nella stratificazione interna al corpo. Questa leggera inclinazione sembra riflettere una deformazione post-deposizionale, legata alla variazione laterale dei tassi di subsidenza, come documentato nell'adiacente sottosuolo, fra Ferrara e Bologna (Stefani *et al.*, 2018).

La parte del sottosuolo più prossima alla superficie (AES8) è dominata da fanghi deposti in ambienti interalvei, all'interno di un contesto climatico ed eustatico prossimo all'attuale. All'interno di questi sedimenti fangosi, si sviluppano corpi allungati di sabbie medio-fini e limose, che registrano canali di Po, spesso di età storica. Nella parte occidentale e settentrionale dell'area urbana, questi corpi sono in diretto contatto stratigrafico ed idraulico con le sabbie singlaciali. Nella parte meridionale dell'area urbana, sono presenti sabbie fini e limi di provenienza appenninica, trasportati dai fiumi Reno, Zena e Savena.

La ricostruzione della stratigrafia sepolta nell'area urbana apre nuove prospettive di ricerca e ha importanti ricadute applicative, quali una migliore comprensione dell'architettura idrostratigrafica e quindi della circolazione delle acque e degli inquinanti nel sottosuolo, fortemente inquinato.

La comprensione della distribuzione dei corpi stratigrafici e delle associate velocità sismiche migliorerà notevolmente la comprensione della risposta sismica locale, anche attraverso una migliore stima delle velocità V_{s30} e l'individuazione dei corpi di sedimenti granulari liquefacibili. I corpi di sabbie liquefacibili sono certamente legati a canali di Po e di Reno di età olocenica, ma un contributo più profondo può essere fornito anche dalle sabbie singlaciali, ove questi siano prossimi alla superficie.

BIBLIOGRAFIA

- Amorosi A., Marchi N., 1999. *High-resolution sequence stratigraphy from piezocone tests: an example from the Late Quaternary deposits of the SE Po Plain*. Sedimentary Geology 128, pp. 69-83.
- Amorosi A., Bruno L., Cleveland DM., Morelli A., Wan Hog, 2016. *Paleosols and associated channel-belt sand bodies from a continuously subsiding late Quaternary system (Po Basin, Italy): New insights into continental sequence stratigraphy*. Geological Society of America Bulletin 129, 3-4, pp. 449-463.
- Caputo R., Poli M.E., Minarelli L., Rapti D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A., 2016. *Palaeoseismological evidence for the 1570 Ferrara earthquake, Italy*. Tectonics, 35, 6: pp. 1423-1445.
- Guidoboni E., 1987. *I terremoti del territorio ferrarese*. F. Bocchi. Ed., Storia di Ferrara AIEP 40, pp. 625-640.
- Stefani M., Minarelli L., Fontana A., Hajdas I., 2018. *Regional deformation of late Quaternary fluvial sediments in the Apennines foreland basin (Emilia, Italy)*. International Journal of Earth Sciences, 107, 7, pp.2433-2447.

Telerilevamento satellitare per generazione di DSM di aree urbane

F. FRATARCANGELI, A. NASCETTI e M. CRESPI

Università La Sapienza, Roma

1. Introduzione

La grande disponibilità di nuovi sensori ottici ad altissima risoluzione spaziale (GSD di circa 0.5 m per le immagini pancromatiche acquisite da GeoEye-1, WorldView-1/2 e Pleiades ½, GSD di 0.31 m per WorldView-3) unita alla possibilità di osservare grandi porzioni di superficie terrestre, ad intervalli regolari di tempo, rende il dato satellitare una importante risorsa per la ricostruzione 3D dell'area osservata. Inoltre, il basso costo delle immagini, la capacità di molti satelliti di acquisire in modalità stereo anche durante lo stesso passaggio orbitale e le alte accuratezze, ad oggi raggiungibili, dei prodotti da loro derivati, rappresentano dei vantaggi rispetto alle altre tecniche di acquisizione, quali fotogrammetria aerea e LiDAR, soprattutto in aree logisticamente difficili.

La messa in orbita anche di sensori SAR ad alta risoluzione (COSMO-SkyMed, TerraSAR-X e RADARSAT-2), che allo stato attuale, hanno raggiunto risoluzioni spaziali fino a 20 cm e che sono in grado di acquisire indipendente dalle condizioni metereologiche e di illuminazione, ha aumentato le potenzialità di utilizzo del dato telerilevato.

Il dato satellitare, sia ottico che SAR, consente quindi una caratterizzazione e ricostruzione 3D accurata e tempestiva della superficie terrestre utile per gli interventi di gestione e mitigazione dei rischi naturali soprattutto in aree urbane e nei centri storici di particolare pregio storico-architettonico. Ricostruzione possibile grazie alla presenza di numerosi software commerciali (PCI-Geomatica, ENVI, SAT-PP) e scientifici in grado di processare e generare modelli 3D (*Digital Surface Model* - DSM) da immagini satellitari.

2. Metodologia

Le aree urbane presentano delle criticità nella loro ricostruzione 3D. La complessità del tessuto urbano dovuta alla presenza di edifici alti, spesso adiacenti, unita alla loro alta densità genera aree occluse e ombre (per esempio i *canyon* stradali o le stesse facciate degli edifici) con riduzione o perdita totale di informazioni. Problemi che, per immagini ottiche, dipendono sia dall'elevazione solare al momento dell'acquisizione che dall'angolo di acquisizione stesso e che rendono difficoltoso il *matching* tra le immagini.

Tali problemi possono essere risolti o limitati sia aumentando il numero di immagini per la ricostruzione 3D sia utilizzando approcci specifici per l'*image matching*.

Riguardo alla disponibilità di molte immagini su un'area di interesse, allo stato attuale moltissime sono le costellazioni di satelliti che osservano giornalmente tutta la superficie terrestre (da circa un anno sono in orbita circa 200 sensori a risoluzione variabile che fanno parte della costellazione Terra Bella - <https://www.planet.com/products/planet-imagery/>) quindi in grado di fornire un gran numero di immagini in tempi brevi.

Riguardo invece all'utilizzo di nuovi approcci di *matching*, a tal proposito l'Area di Geodesia e Geomatica dell'Università di Roma "La Sapienza" ha sviluppato un nuovo strumento (DATE - *Digital Automatic Terrain Extractor*) per la generazione automatica di DSM a partire da due o più immagini ad altissima risoluzione spaziale acquisite dai più comuni sensori ottici e SAR.

DATE è una *plug-in* di OSSIM (*Open Source Software Image Map*), un *software Free e Open Source (FOSS)*, basata su un approccio ibrido e di tipo piramidale, in cui si utilizza sia la fotogrammetria che gli algoritmi di *computer vision* con l'intento di sfruttare le potenzialità delle due tecniche nella generazione di modelli 3D (Di Rita et al., 2016, 2017, 2018).

La catena di processamento per la generazione di un DSM con DATE, a partire da una coppia di immagini acquisite dal medesimo sensore sulla stessa area, ad ogni livello piramidale, prevede:

- Ortorettificazione delle immagini: le immagini utilizzate sono proiettate in geometria terreno (ortorettificate) utilizzando un "coarse" DSM; allo stato attuale sono disponibili on line diversi DSM globali per esempio *SRTM*, *ASTER*, *GDEM* o *AW3D30*. Il modello di orientamento utilizzato è il modello Polinomiale Razionale (RPF) con Coefficienti Polinomiali Razionali (RPC). Le immagini così generate sono delle ortoimmagini;
- Generazione delle immagini GrEI: le ortoimmagini sono trasformate in GrEI (*Ground quasi-Epipolar Imagery*), cioè in immagini con geometria quasi epipolare, stimando una rotazione che tiene conto della direzione di scansione delle immagini e che le allinei nella direzione di disparità prevalente. L'angolo, rispetto al nord, di cui devono ruotare le due immagini è calcolato a partire da una griglia 10x10 scelta sulla coppia di immagini (*master e slave*); per ogni punto della griglia sull'immagine master sono individuati due punti P_1' e P_3 a due valori di quota (h_{max} e h_{min}) applicando il modello RPC. Il punto P_3 , è proiettato sull'immagine slave utilizzando l'equazione inversa degli RPC ottenendo il punto P_2 , riproiettato di nuovo su h_{max} applicando il modello RPC (P_2'). La direzione, rispetto al Nord della retta congiungente P_1' e P_2' in corrispondenza di h_{max} individua un angolo (Fig. 1).

La media degli angoli calcolati su tutta la griglia è l'angolo di cui devono ruotare le due immagini per ottenere le GrEI. In un secondo passaggio, a partire da un *set* di TP vengono stimate una piccola rotazione e una traslazione applicate all'immagine slave in modo da rimuovere il potenziale *shift* dovuto ad un errore sistematico causato dall'inaccuratezza degli RPC. Le immagini sono ora allineate nella direzione di disparità predominante. I TP sono identificati sulle ortoimmagini utilizzando SIFT (*scale-invariant feature transform*), un algoritmo della libreria *openCV*, e poi filtrati con un test a 3-sigma per rimuovere gli *outlier*.

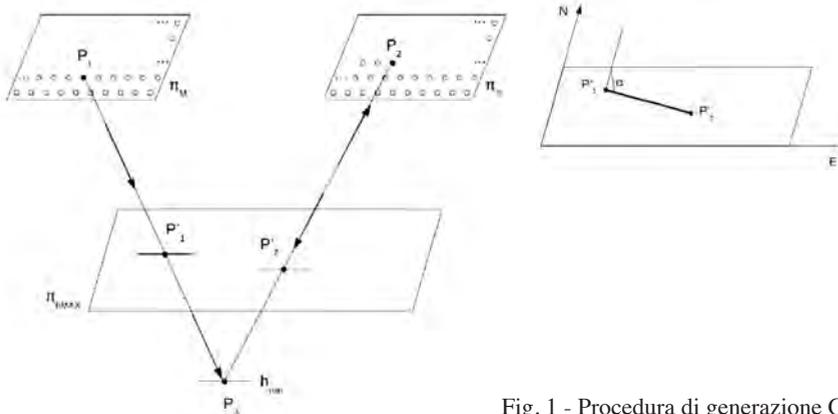


Fig. 1 - Procedura di generazione GrEI.

- *Matching* denso e generazione della mappa di disparità: ad ogni livello piramidale viene calcolata una mappa di disparità usando il *Semi Global Block Matching* (SGBM), implementato in una libreria di *openCV* che differisce dal *Semi Global Matching* (SGM) di Hirschmuller (2008) perchè utilizza solo 5 invece di 8 direzioni di ricerca e per il *matching* non singoli *pixel* ma blocchi di *pixel*, e utilizza come funzione di costo non una *Mutual Information* (Viola e Wells, 1997) ma una *Birchfield–Tomasi sub-pixel metric* (Birchfield e Tomasi, 2008). SGBM implementato lavora solo con immagini ad 8 bit, quindi le immagini vengono precedentemente corrette radiometricamente comprimendo il range di valori radiometrici;
- Generazione del DSM: i valori di disparità ottenuti sono convertiti in correzioni in quota rispetto al DSM utilizzato a priori attraverso una procedura basata sul calcolo di un fattore

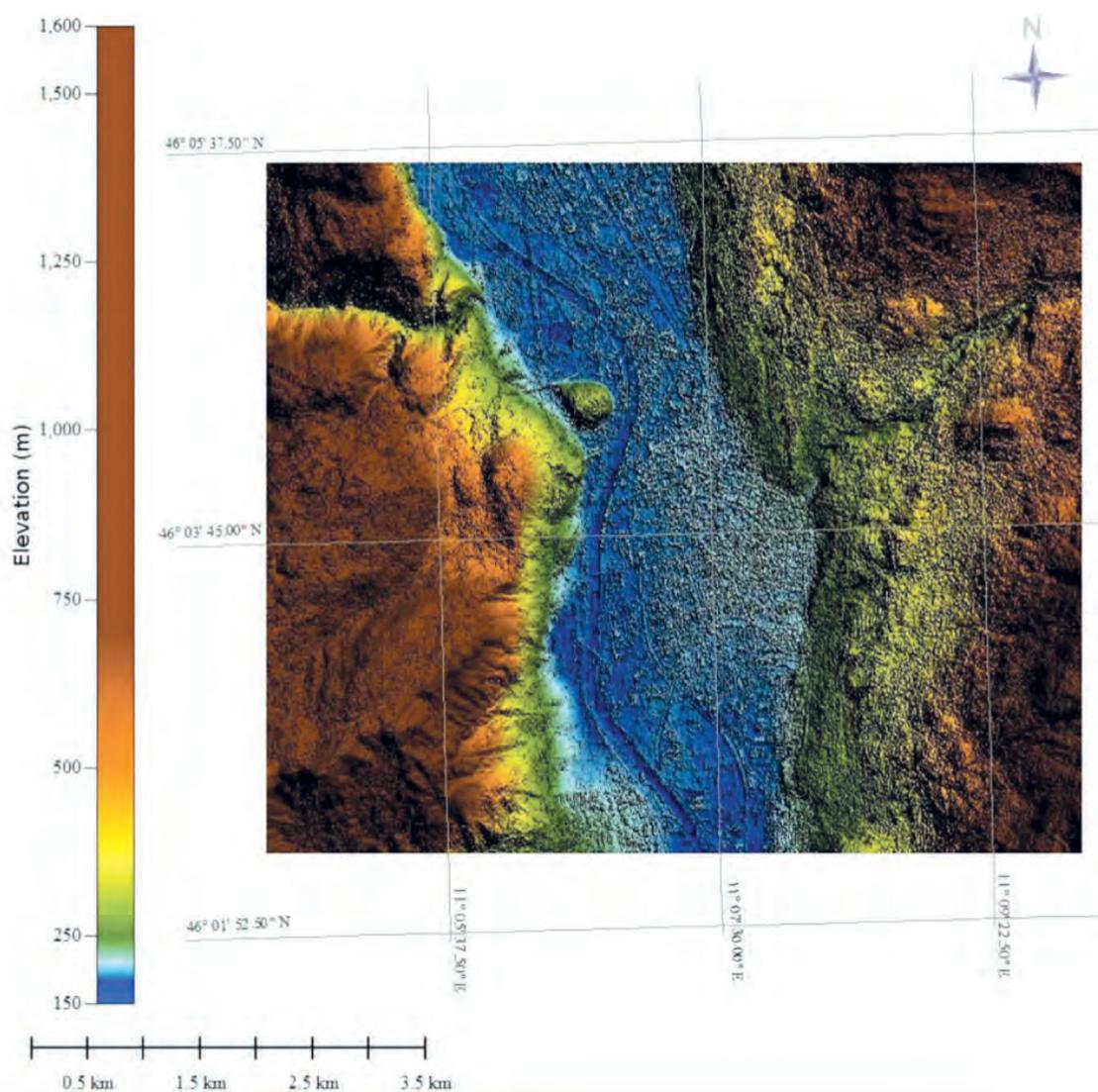


Fig. 2 - DSM generato dalla tripletta di Pleiades.

di conversione disparità-altezza (C_factor) sfruttando il modello RPC. Il fattore è calcolato a partire dai 100 punti della griglia 10x10 già menzionata; per ogni punto è considerato il valore minimo e il massimo di quota ($\Delta h = h_{max} - h_{min}$) e la corrispondente distanza tra i punti P'1 e P'2 ($DP'1P'2$). Il C_factor è dato dalla media dei rapporti fra $DP'1P'2$ e Δh su tutti i 9 punti. Tramite tale coefficiente, a partire dalla disparità in coordinate terreno, si determina la variazione di quota da sommare alla quota del DSM a priori ad ogni livello piramidale.

3. Risultati

La procedura di generazione del DSM è stata testata su una tripletta di immagini ottiche Pléiades-HR dell'area di Trento (Fig. 2). Il DSM generato è stato confrontato con il DSM ottenuto, a partire dalle stesse immagini, con uno dei software commerciali più utilizzati (PCI Geomatics). Entrambi i DSM ottenuti sono stati confrontati con un DSM di riferimento acquisito con LiDAR (Fig. 3). I risultati evidenziano accuratezze, in termini di *Root Mean Square Error – RMSE Z*,

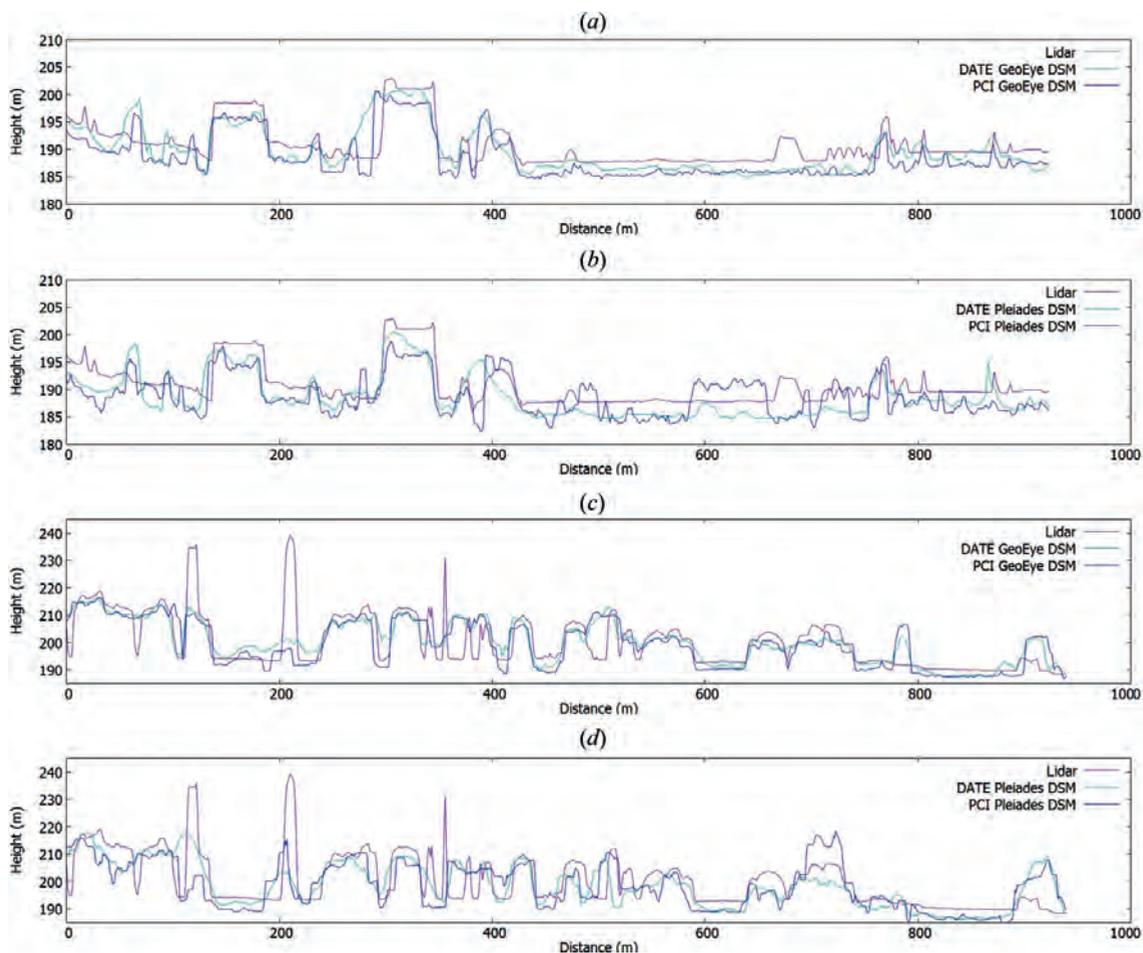


Fig. 3 - Confronto con DSM LiDAR: sezione in area urbana.

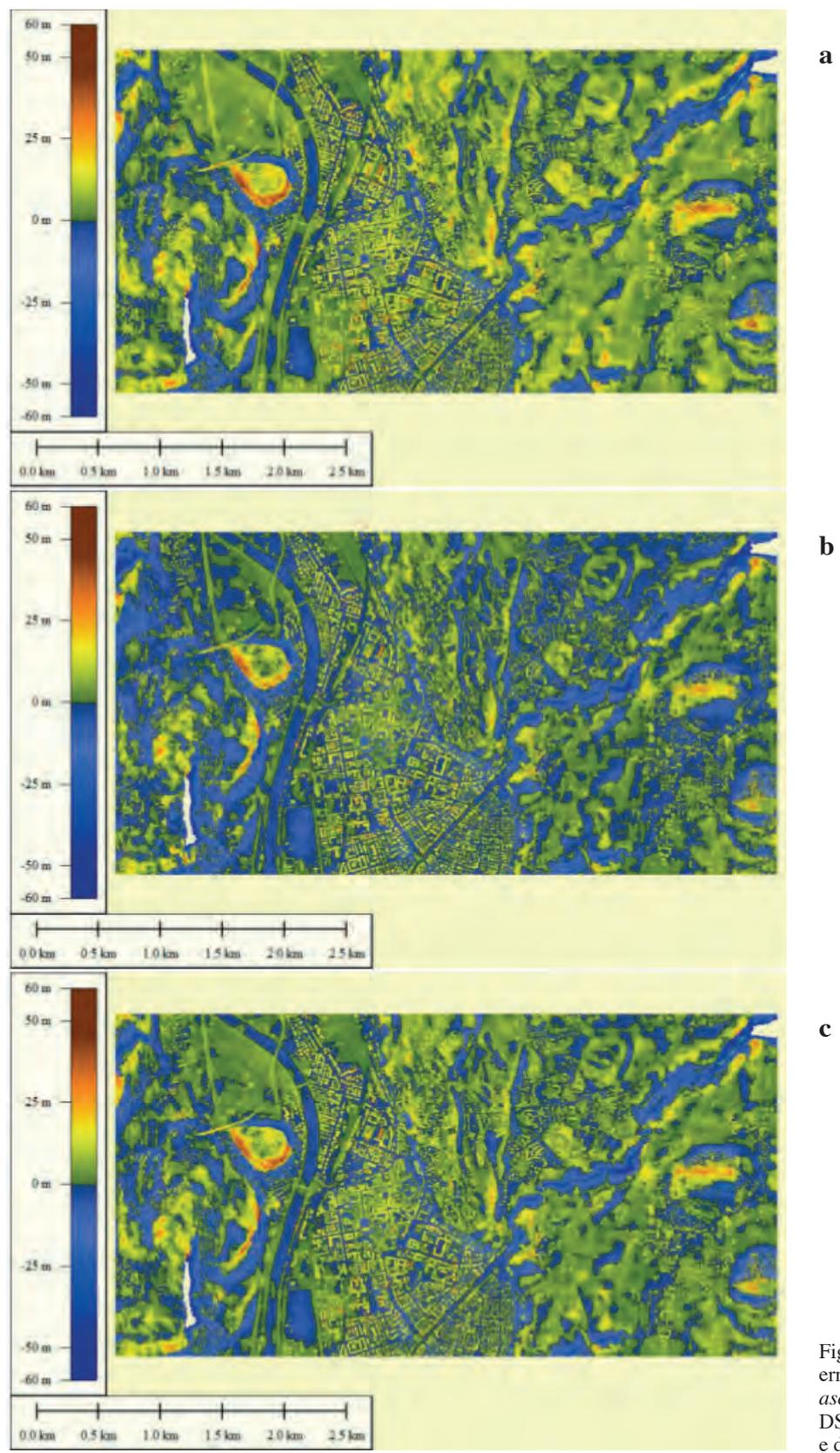


Fig. 4 - Mappe di errore del DSM *ascending* (a), del DSM *descending* (b) e del DSM finale (c)

dello stesso ordine di grandezza tra PCI e DATE. I risultati ottenuti con DATE sono leggermente migliori di quelli ottenuti con PCI in termini di accuratezza (in area urbana *RMSE Z* è 4.22 m vs 5.10 m) ma con tempi di processamento pari ad un terzo rispetto a quelli con PCI (15 vs 46 minuti).

Inoltre, DATE è stato testato anche su immagini SAR di TerraSAR-X sempre sull'area di Trento. I dati sono costituiti da due *stack* (uno *ascending* e uno *descending*) di 3 immagini ognuno. Sono stati generati 3 DSM combinando due immagini *ascending* con accuratezze dell'ordine di 7 m e 3 DSM combinando due immagini *descending* con accuratezze dell'ordine di 6 m. Il DSM finale è stato ottenuto dalla fusione dei DSM medi, l'accuratezza è dell'ordine di 6 m in termini di *RMSE Z* su tutta l'area (Fig. 4).

DATE sarà, inoltre, testato su una coppia di immagini acquisite da *Worldview-3* e da una coppia di immagini *CosmoSky-Med* entrambe acquisite sull'area di Matera.

BIBLIOGRAFIA

- Di Rita M., Nascetti A., Crespi M. (2018). *FOSS4G DATE for DSMs generation from tristereo optical satellite images: development and first results*. European Journal of Remote Sensing 51(1), 472-485. doi:10.1080/22797254.2018.1450644
- Di Rita M., Nascetti A., Crespi M. (2017). *Open source tool for DSMs generation from high resolution optical satellite imagery: Development and testing of an OSSIM plug-in*. International Journal of Remote Sensing, 38(7), 1788-1808. doi:10.1080/01431161.2017.1288305
- Di Rita M., Nascetti A., Fratarcangeli F., Crespi M. (2016). *Upgrade of foss date plug-in: Implementation of a new radargrammetric DSM generation capability*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives 41, pp. 821-825. doi:10.5194/isprsarchives-XLI-B7-821-2016
- Hirschmüller H. (2008). "Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Volume: 30, Issue: 2, pp. 328-341. doi: 10.1109/TPAMI.2007.1166 .
- Viola P., Wells W.M. III (1997). "Alignment by maximization of mutual information". International Journal of Computer Vision. Volume: 24, Issue: 2, pp. 137-154. doi: https://doi.org/10.1023/A:1007958904918.
- Birchfield S., Tomasi C. (2008). "A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Volume: 20, Issue: 4, pp. 401-406. doi: 10.1109/34.677269.

Analisi della rete sismometrica del Comune di Ferrara

P. MARI¹, M. CINCI², R. CAPUTO³ e N. ABU ZEID³

¹ HERA S.p.A., Bologna

² ENEL Green Power S.p.A., Roma

³ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Nell'ambito del progetto CLARA, la città di Ferrara è coinvolta come test site per la mitigazione del rischio sismico. Da quasi trent'anni il Comune di Ferrara ha creato in collaborazione con HERA e con l'Università di Ferrara una rete sismometrica dedicata al monitoraggio delle attività minerarie relative ai pozzi Casaglia 1, 2 e 3 che sfruttano il campo geotermico presente nel sottosuolo del territorio comunale a circa 7 km a NO dalla città. L'impianto di estrazione e reiniezione del fluido geotermico è operativo da quasi trenta anni e contribuisce in modo importante al teleriscaldamento urbano. Lo scopo principale della rete sismometrica è quello di individuare eventuali fenomeni microsismici indotti o innescati dalla circolazione dell'acqua geotermica nella struttura geologica che ne costituisce il serbatoio.

La rete sismometrica esistente, di proprietà del Comune di Ferrara, è costituita da 6 Postazioni di Rilevamento Sismico (PRS), disposte su un'area di circa 100 km² nell'intorno del campo geotermico di Casaglia (si vedano la Tabella 1 e la Fig. 1). Attualmente le attività di gestione ordinaria della rete e di continuo monitoraggio sismico vengono svolte dal Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara.

Tra le attività svolte nell'ambito dell'Obiettivo Realizzativo 3, i gruppi di lavoro di HERA e di UniFE si sono focalizzati a valutare le condizioni attuali della rete sismometrica esistente, in primo luogo, per evidenziare eventuali criticità da superare e, conseguentemente, per meglio progettare un corretto *upgrade* della strumentazione e delle infrastrutture ad esse collegate. L'importanza di questa analisi si è ulteriormente accresciuta a seguito dell'aggiudicazione della Concessione Mineraria "Casaglia" ad ENEL Green Power ed HERA. Secondo le Linee Guida del Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE, Roma, 2015), infatti, ed in linea con il bando di

Tabella 1 - Elenco attuali PRS Ferrara.

NOME PRS	Lat	Long	Sensore	Prof. Installazione
PON	44.8731	11.5479	Mark L-4C 3D (2Hz)	-12 m
ALB	44.9165	11.5394	Mark L-4° 1D (2 Hz)	-34 m
FOR	44.8808	11.4963	Mark L-4° 1D (2 Hz)	-40 m
SFR	44.8252	11.5476	Mark L-4° 1D (2 Hz)	-40 m
DEP	44.8683	11.6268	Mark L-4° 1D (2 Hz)	-56 m
TOR	44.7939	11.5931	Mark L-4° 1D (2 Hz)	-57 m

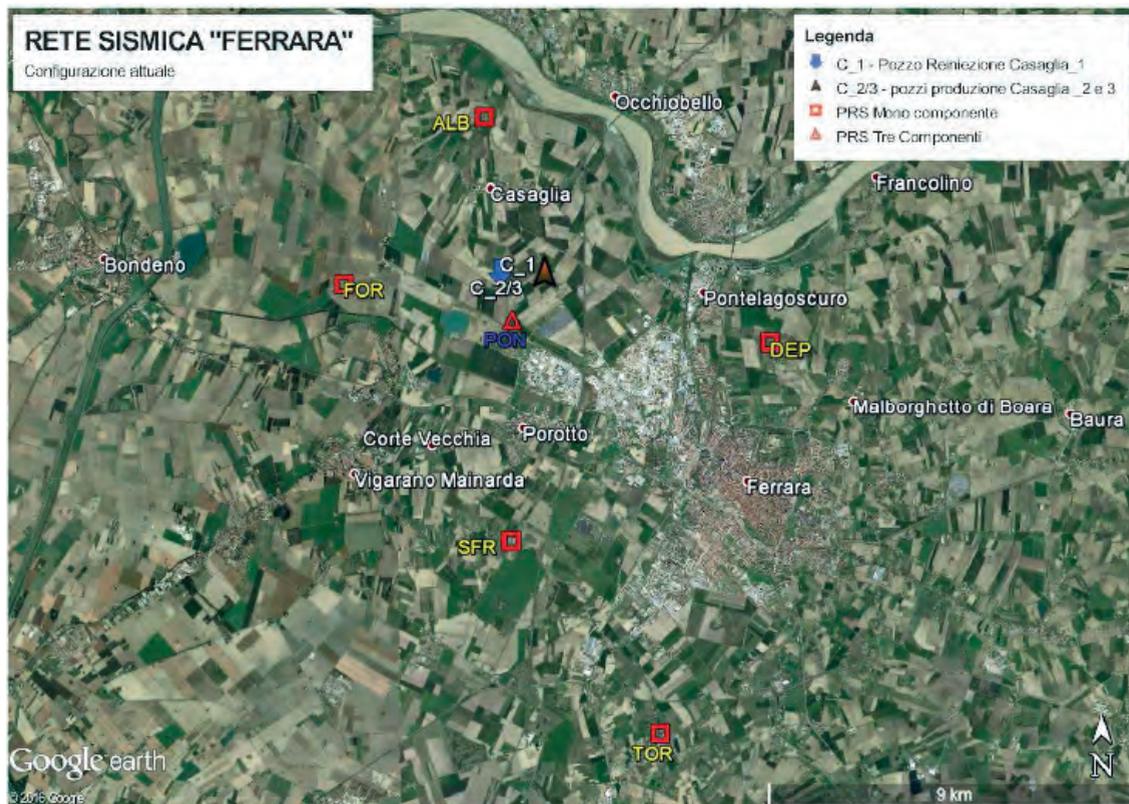


Fig. 1 - Attuale configurazione rete microsismica e posizione pozzi Casaglia 1 e 2/3.

concessione mineraria, è prevista la creazione di una rete sismometrica con caratteristiche ancora più stringenti e performanti.

2. Analisi delle stazioni

Il lavoro svolto è consistito in numerosi sopralluoghi e indagini preliminari per ottenere una migliore conoscenza degli attuali siti utilizzati, sia da un punto di vista geologico, sismologico, che logistico.

Tali sopralluoghi hanno messo in evidenza come lo stato di consistenza della rete sismometrica si sia deteriorato nel tempo e sia consigliabile, o addirittura necessario in alcuni casi, un *revamping* tecnico e strutturale (per le proposte di miglioramento della rete si veda anche la nota AR4.4 del presente volume).

Numerosi sono infatti gli elementi di criticità che sono stati messi in evidenza. In primo luogo, i geofoni sono installati a profondità dal piano campagna diverse fra loro (variabili fra i 12 e i 57 m dal piano campagna) e questo rende più difficile l'analisi del segnale in fase di acquisizione dati ed interpretazione. L'ideale sarebbe quindi effettuare un loro recupero per installarli in pozzi con caratteristiche più simili fra loro in termini di profondità e di risposta sismica. D'altra parte, gli attuali sismometri, periodo corto, sono fuori produzione e di frequenza propria pari a 2 Hz. Tali

caratteristiche rendono necessario l'aggiornamento del HW con sismometri di frequenza propria pari ad 1 Hz nonché di sensibilità maggiore rispetto agli attuali pari a 173 V/m/s (ved. nota 4.4). Questo permette di estendere la capacità di rilevare eventi tellurici con magnitudo quasi zero se non negativa.

Relativamente alla strumentazione adibita alla digitalizzazione del segnale sismico ed alla successiva trasmissione dei dati alla centrale di raccolta, attualmente presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, non sembrano esserci particolari carenze infrastrutturali poiché tutta la strumentazione è di recente installazione. L'unico eventuale limite, soprattutto in un'ottica di futuro miglioramento della rete sismometrica, secondo le Linee Guida che suggeriscono la contestuale installazione in tutte le stazioni sia di sismometri a 3 componenti, sia di accelerometri triassiali, è data dal fatto che l'attuale strumentazione, modello DM24 e CD24, GURALP, UK), è caratterizzata soltanto da 3 canali di acquisizione del segnale, mentre con la futura configurazione della sensoristica ne saranno necessari 6.

Le indagini in sito e dei segnali in laboratorio hanno infine evidenziato come in quasi tutte le PRS sia presente un elevato rumore di fondo di origine antropica che è fondamentalmente cresciuto negli anni. Nonostante tutti i sensori siano comunque posti a fondo pozzo e non in superficie, questo fenomeno tende a mascherare la microsismicità di energia inferiore associata a basse magnitudo ($M \leq 1$). In previsione di un miglioramento delle capacità di monitoraggio ed in particolare di un incremento della sensibilità della futura rete sismometrica, si suggerisce la delocalizzazione di alcune PRS e l'approfondimento sistematico di tutti i pozzi.

In Fig. 2 sono indicate le principali caratteristiche delle 6 stazioni della rete e, sulla base dei sopralluoghi nelle varie stazioni, sono sintetizzate le proposte per un loro possibile *upgrade* da realizzare soprattutto in termini di localizzazione dei nuovi pozzi.

In un'ottica di costruire nuove stazioni di monitoraggio sismico, sia per sostituire alcune fra quelle esistenti non più adatte allo scopo, sia per esplorare nuove località e contesti favorevoli per l'ampliamento e l'integrazione della futura rete sismometrica, sono stati considerati, analizzati e investigati numerosi possibili siti in un'ampia area intorno al campo geotermico. I risultati di queste indagini effettuate sulla base di criteri topologici e soprattutto in un'ottica geologica, sismologica, amministrativa e di aspetti logistici hanno portato ad individuare numerosi siti di cui tre sono stati scelti come possibili nuovi PSR da realizzare (Fig. 3):

- 1) all'interno del Parco Massari nel centro storico di Ferrara,
- 2) presso la scuola elementare di Boara (NE di Ferrara) e,
- 3) all'esterno del cimitero di Santa Maria Maddalena (RO).

3. Considerazioni conclusive

Il lavoro di analisi svolto ha permesso di ottenere una migliore conoscenza degli attuali siti utilizzati per la rete sismometrica, di evidenziare una serie di criticità che permetteranno anche il corretto *upgrade* della strumentazione ed il miglioramento delle infrastrutture ad esse collegate (fattibilità dei nuovi pozzetti sismometrici, tipologia di alimentazione elettrica da implementare, accessibilità, livello del segnale per la trasmissione dati, ecc.). In sintesi, tutte le stazioni esistenti necessitano di lavori di adeguamento e a volte di rifacimento praticamente completo (ALB, FOR, PON, SFR, TOR) o addirittura dello smantellamento (DEP) e dello spostamento della postazione

PRS DEP

La PRS «DEP» ubicata a nord di Ferrara, è stata realizzata in prossimità di un depuratore di HERA in area di verde pubblico. Nonostante il geofono sia a 56 m di profondità il rumore generato dall'impianto rende la stazione poco funzionale e utilizzabile solo per eventi di $M < 1,5$

Era già stato deciso lo spostamento in altro sito con ripristino dell'area.

Questo comporterà un'importante revisione del layout della rete, come vedremo successivamente.



PRS TOR

La PRS «TOR» si trova all'interno dell'area del campo sportivo di San Martino a sud dell'abitato di Ferrara.

Profondità geofono a 57 m.

Necessario spostamento del nuovo pozzetto sismometrico per l'interferenza con gli alberi che costituiscono il confine della pertinenza.



Ripristino dell'area attualmente occupata, dal palo e supporto strumentazione.

PRS SFR

La PRS «SFR» è sita nel cortile della scuola elementare di Borgo Fondo Reno a sud-est dell'abitato di Ferrara. Pozzetto profondo 40 m.

La strumentazione è installata su un ripiano di facile accesso, in un locale di passaggio della scuola (di libero accesso a chiunque).

Ripristino dell'area attualmente occupata, dal palo e supporto strumentazione.

E' consigliabile spostare il tutto in apposito armadio in prossimità del nuovo pozzetto geofonico, sfruttando l'attuale linea cavo per l'alimentazione a 24/48 vdc



PRS PON

La PRS «PON» è ubicata nel cortile della ex scuola elementare di Ca' Pontoni a nord-est dell'abitato di Ferrara.

Profondità installazione geofono a 12 m.

La principale criticità risiede nell'accesso all'area e al suo stato di degrado. Infatti pur essendo libero l'accesso l'edificio è utilizzato da alcune famiglie ROM che tengono la zona in stato di abbandono con rifiuti lasciati a giro e alla rinfusa e con via vai continuo di persone e mezzi.



Dato che il maggior costo è la realizzazione del pozzetto. Si ritiene valido lo spostamento della stazione nell'area del Casaglia_1, dove esistono le condizioni logistiche per un'installazione poco onerosa e più tranquilla.



PRS ALB

La PRS «ALB» è ubicata sul bordo di un fossato in località Alberi della floraia, a nord/nord-est dell'abitato di Ferrara. Pozzetto profondo 34 m.

La zona si presenta degradata, sia per la posizione infelice della postazione, circondata da una recinzione di una proprietà, che per i materiali agricoli presenti in adiacenza al fossetto nell'altra proprietà.

Una soluzione è lo spostamento della stazione di circa 50 all'interno della proprietà Antonioni, che oltretutto permette la realizzazione di un cavidotto di alimentazione molto più corto.

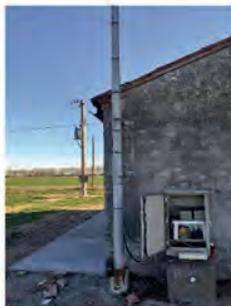


PRS FOR

La PRS «FOR» è sita in prossimità di una colonica abitata appena fuori Diamantina a nord-est dell'abitato di Ferrara.

Il pozzetto è profondo 40 m.

La strumentazione è dentro un contenitore, installato a parete su un manufatto utilizzato come garage.



La PRS dovrà essere dotata di alimentazione elettrica, data la vicinanza con un palo con già altre forniture installate. Da verificare come e dove realizzare il nuovo pozzetto del sismometro. Da togliere il palo dei pannelli.

Fig. 2 - Stato attuale e possibile upgrade delle 6 stazioni sismometriche del Comune di Ferrara che costituiscono l'attuale rete di monitoraggio micro sismico del campo geotermico di Casaglia.

NUOVI SITI: FER

Il Comune di Ferrara, al momento del rilascio della Concessione mineraria, ha chiesto di realizzare una PRS all'interno dell'area urbana di Ferrara, indicando come disponibilità il Parco Massari. Questa è stata una delle mete del sopralluogo, per verificare la possibilità di realizzare la Stazione e quindi individuarne la migliore ubicazione,

Il controllo è stato fatto scartando la parte di parco prospiciente Corso Porta a Mare, per l'eccessivo traffico veicolare presente. I punti presi in considerazione sono 2, il primo nell'angolo Nord-Est, di fronte al cimitero monumentale di San Cristoforo alla Certosa, mentre il secondo è a 100 m più sud, sullo stesso lato di parco che si affaccia su via Borso, nell'angolo con l'adiacente museo archeologico.

Per entrambi i siti andrà mascherata la struttura per l'alloggio della strumentazione, mentre potrà essere usata l'alimentazione prelevabile da una cabina di Hera interna al parco, che è utilizzata per la depressurizzazione del metano (di tipo passivo).

Per il pozzetto, i primi 10 metri, andranno perforati a carotaggio continuo per verificare la presenza di manufatti (occorre anche l'archeologo).



BOA - ALTERNATIVA 1 DEP

Il sito BOA (44.863988°N - 11.682790°E) si trova presso l'abitato di Boara a nord-est di Ferrara, all'interno di un parco pubblico in prossimità di una scuola elementare (in alternativa dentro la recinzione). Non ci sono particolari criticità, se non la linea elettrica a bassa tensione che passa sopra la possibile ubicazione del sito. Fornitura prelevabile dalla scuola, portando fuori un 24/48 vdc. Si sovrappone geometricamente con FER



SMA - ALTERNATIVA 3 DEP

Il sito SMA (44.902849°N - 11.596034°E) Il punto idoneo alla perforazione del pozzetto sismometrico si trova all'esterno del cimitero di Santa Maria Maddalena nel comune di Occhiobello. A fianco potrebbe essere installato il box con la strumentazione, alimentato o da una specifica fornitura, oppure tramite un 24/48 vdc preso dalla fornitura della comunale.

Fig. 3 - Descrizione del possibile sito aggiuntivo per l'ampliamento della rete sismometrica nel centro della città di Ferrara e per la valutazione di siti alternativi che si renderebbero necessari in caso di smantellamento della stazione DEP.

in siti con minor rumore sismico di origine antropica. Come meglio discusso nella nota 4.4, i lavori di aggiornamento prevedono anche l'acquisto di nuova strumentazione con caratteristiche tecnologiche adeguate ed in linea con le richieste delle Linee Guida del Ministero dello Sviluppo Economico.

Tomografie Geoelettriche Profonde (DERT) per lo studio geologico-idrogeologico di Ferrara

E. RIZZO¹, S. PISCITELLI¹, J. BELLANOVA¹, L. CAPOZZOLI¹, G. DE MARTINO¹,
M. GUERRIERO¹, G. MORELLI², F. FISCHANGER², R. CAPUTO³ e V. LAPENNA¹

¹ Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, CNR, Tito Scalo (PZ)

² Geostudi Astier srl, Livorno

³ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Le attività di questo lavoro sono parte del Progetto CLARA e consistono nell'applicazione di un approccio 2D e 3D di Geoelettrica Profonda in aree urbane. L'applicazione di alcuni metodi geofisici permette il riconoscimento di strutture geologiche profonde. Tali metodologie si basano sullo studio delle variazioni di alcuni parametri fisici come la densità, la conducibilità elettrica, la resistività, etc., definendone la dimensione di tali strutture e i cambiamenti nella natura litologica del sottosuolo. La scelta delle metodologie da adoperare è determinata dallo scopo della prospezione ed in particolare dai contrasti tra le proprietà geofisiche nelle formazioni presenti nel sottosuolo, dalla profondità di investigazione e da fattori economici. Nel metodo della Geoelettrica si immette nel terreno corrente continua (onda quadra), dalla disposizione dei punti di immissione e dalla resistività elettrica del sottosuolo, dipende la forma del campo elettrico che viene misurato in superficie. Il principio fisico del metodo è schematizzabile in questo modo: una corrente elettrica è inviata nel mezzo tramite una coppia di elettrodi (elettrodi energizzanti) e la risultante distribuzione di potenziale elettrico indotto è determinata tramite un'altra coppia di elettrodi (elettrodi riceventi). Un voltmetro collegato agli elettrodi riceventi consente di misurare le cadute di tensione. Il metodo delle misure di resistività viene usato per studiare le discontinuità orizzontali e verticali delle proprietà elettriche del terreno e viene utilizzato, generalmente, per investigare la geologia e idrogeologia del sottosuolo. Tali applicazioni di ERT profonde (DERT) sono poco diffuse in generale, infatti ci sono pochi esempi pubblicati (Hallos, 1957; Di Maio *et al.*, 1998; Storz *et al.*, 2000; Suzuki *et al.*, 2000; Colella *et al.*, 2004; Rizzo *et al.*, 2004; Giocoli *et al.*, 2008; Rizzo e Giampaolo, 2018; Rizzo *et al.*, 2019). Ciascun lavoro scientifico è associato a studi geologici o idrogeologici in aree extra-urbane evidenziando una fattibilità della tecnica sia dal punto logistico che strumentale, oltre a quello di analisi del segnale. Tale tecnica rappresenta un ottimo approccio in aree dove è importante studiare la circolazione dei fluidi, come per esempio in aree di interesse geotermale a bassa e media entalpia. In tale contesto, l'uso diretto della risorsa può operare benissimo in vicinanza di aree urbane o industrializzate, pertanto la tecnica ERT profonda rappresenta un vero challenger per la sua modalità operativa in contesti urbani. Comunque, in questi contesti le criticità della tecnica DERT possono essere racchiuse in tre ambiti: logistica, strumentale e analisi dei dati.

In particolare, nella Città di Ferrara è stata applicata la Tomografia Geoelettrica Profonda attraverso due tipologie: la *Deep Electrical Resistivity Tomography* 2D (DERT 2D) e una acquisizione 3D con metodo *Full Waver* (Fig.1).

dipolo” rispetto alle altre configurazioni elettrodiche sta nel fatto che in quest’ultime la distanza degli elettrodi dipende dalla lunghezza dei cavi e dalle difficoltà pratiche per lo stendimento degli stessi sul terreno. Pertanto, il metodo “dipolo-dipolo” risulta adatto alle investigazioni profonde (> 200 m). Praticamente, attraverso la tecnica della tomografia geoelettrica si acquisiscono delle sequenze regolari di misure di resistività apparente, ciascuna delle quali corrisponde ad un’assegnata posizione degli elettrodi A e B (elettrodi energizzanti) nel profilo, che in genere vengono mantenuti fissi mentre l’altro dipolo MN (elettrodi riceventi) si allontana in maniera progressiva dal primo. Le acquisizioni effettuate presso la Città di Ferrara hanno previsto l’utilizzo di una strumentazione ad hoc realizzata dal CNR IMAA di Tito Scalo (PZ), che è composta da: trasmettitore (Fig. 3a); gruppo elettrogeno (Fig. 3b); regolatore di voltaggio (Fig. 3c); cavi elettrici disposti in bobine (Fig. 3d); elettrodi di potenziale non polarizzabili (Fig. 3e); elettrodi di corrente in acciaio (Fig. 3f). Tale configurazione ha permesso di avere un sistema “disaccoppiato”, cioè con trasmettitore e ricevitore separati, producendo un segnale di corrente (I) di oltre 5 A. Nell’ambito del progetto CLARA sono stati installati n.17 elettrodi collegati attraverso n. 6 *datalogger* per acquisire i valori di caduta di tensione (DV), e gli stessi diventano elettrodi energizzati quando collegati ad un trasmettitore per inviare corrente elettrica continua.



Fig. 3 – Componenti della strumentazione DERT utilizzata per le indagini.

La realizzazione di una tomografia geoelettrica profonda 3D consiste nel disporre un sistema di acquisizione ed energizzazione su un'area estesa (Fig. 4a). In particolare, la metodologia consiste nell'installare una serie di dipoli di acquisizione sulla superficie e nello stesso tempo disporre di dipoli di energizzazione in diversi punti dell'area da investigare. Tale modalit  permette di ottenere una vera acquisizione ed elaborazione 3D presso la Citt  di Ferrara   stato utilizzato il sistema FULL WAVER della IRIS Instruments costituita da un sistema trasmettitore e n. 25 *datalogger* (Fig. 4b). Tale sistema permette di poter ottenere un'immagine 3D di tipo geoelettrico al di sotto della citt  di Ferrara. Pertanto, per raggiungere tale scopo i *datalogger* sono stati installati all'interno della cinta muraria di Ferrara (Fig. 1), in tutte quelle aree dove   presente una zona verde con spazio sufficiente per poter installare due dipoli lunghi circa 50 m aventi direzioni diverse.

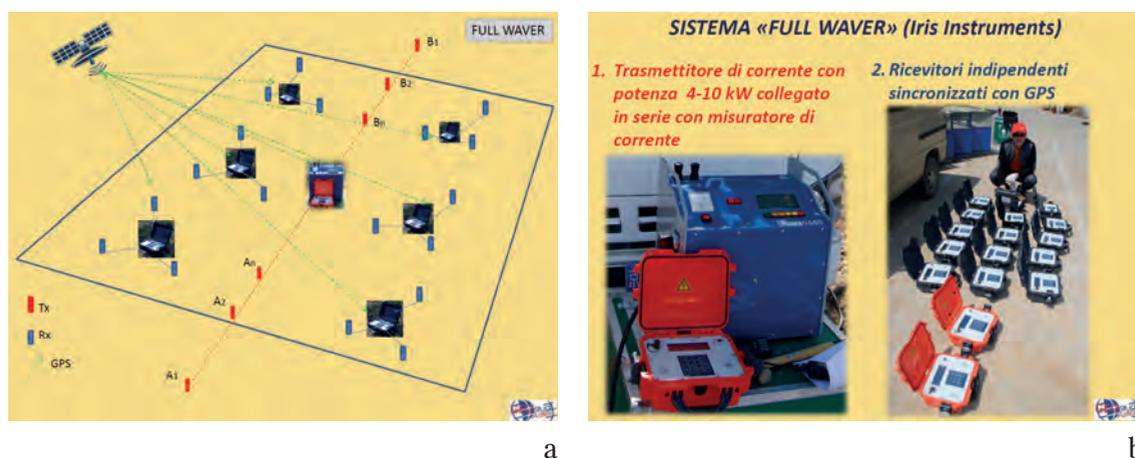


Fig. 4 - Componenti della strumentazione *Full Waver system*.

3. Conclusioni e primi risultati

I dati acquisiti lungo il profilo disposto parallelamente alla cinta muraria orientale della citt  di Ferrara sono stati elaborati attraverso una procedura costruita ad hoc per questo tipo di indagini geoelettriche (DERT). Infatti, vengono registrati segnali di caduta di tensione e di immissione di corrente per oltre 20 minuti per ogni coppia dipolare la cui distanza tra trasmettitore e ricevitore pu  essere anche diversi chilometri. La Fig. 5 evidenzia un esempio di segnale registrato la cui qualit  decresce in funzione della distanza tra ricevitore e trasmettitore. In ambiente urbano tale criticit  aumenta per la presenza di rumore antropico molto elevato e pertanto   necessaria una elaborazione *off-line* (post-acquisizione) attraverso procedure di analisi del dato sia nel dominio delle frequenze (FFT) che nel dominio del tempo (*stacking*). Infatti, si assume che il valore di tensione $x(t)$   composto da una componente periodica, il segnale $s(t)$, ed una componente rumorosa, $r(t)$. Dal punto di vista matematico i valori di tensione ottenuti in campagna sono rappresentati dalla seguente relazione:

$$x(t) = s(t) + r(t)$$

Il problema in esame consiste nel rimuovere la componente rumorosa dal valore di tensione misurato, ottenendo così solo l'ampiezza del segnale, che rappresenta il valore di tensione da considerare per il calcolo della resistività. Per tale motivo è stato applicato un software ad hoc che permette di ottenere la stima dell'ampiezza della componente periodica $s(t)$ sia mediante una FFT e sia mediante un procedimento di *stacking* (Fig. 5).

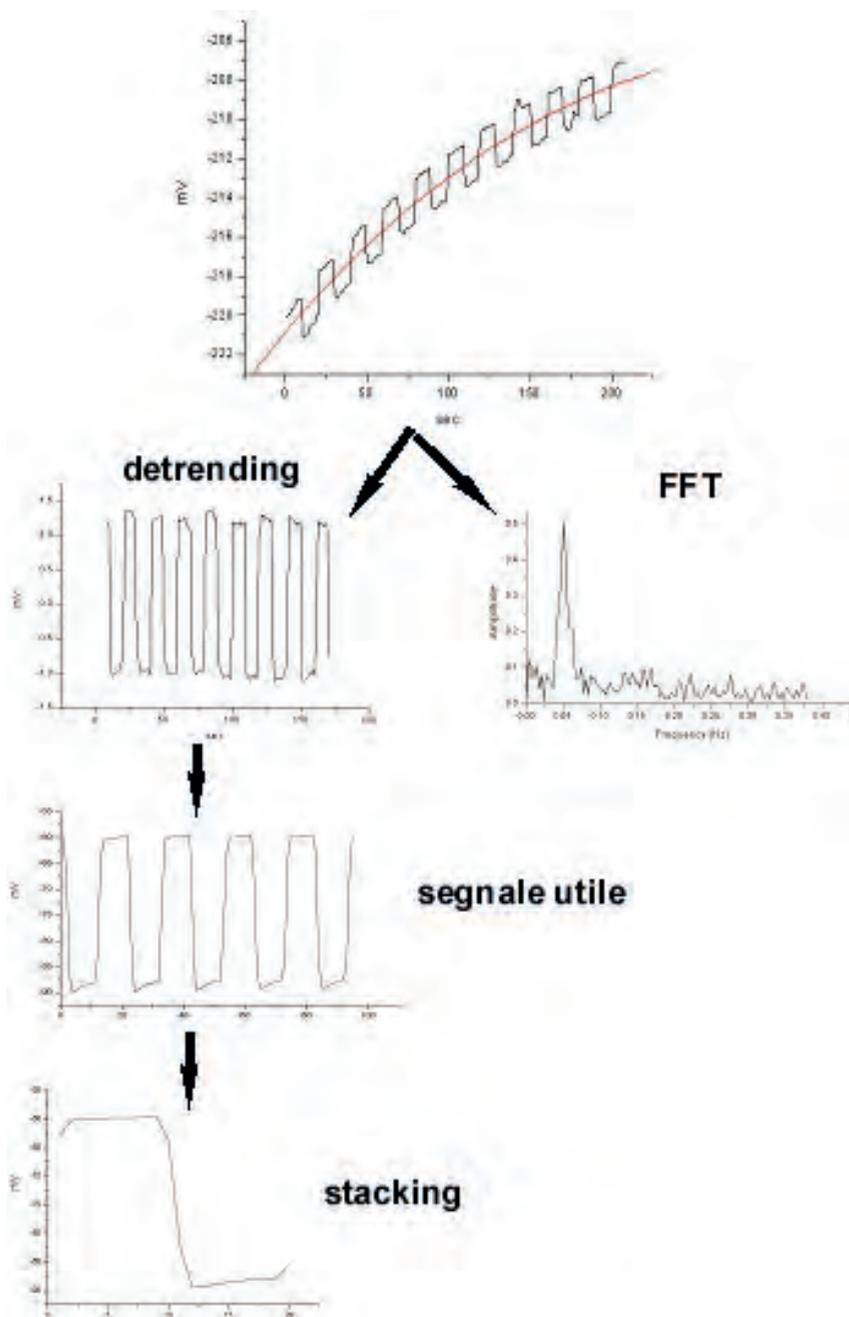


Fig. 5 - Schema semplificato dell'elaborazione del segnale V.

In particolare, i dati acquisiti nella città di Ferrara hanno permesso di effettuare una elaborazione che segue lo schema in Fig. 5 e pertanto si è ottenuta la distribuzione del valore di resistività apparente di Fig. 6. Il numero di quadripoli disposti lungo il profilo hanno permesso di ottenere 239 dati di resistività apparente, posti a profondità diverse in base al quadripolo di riferimento. I dati, in generale, mostrano valori relativamente bassi di resistività elettrica (<100 Ohm*m) con qualche valore con valori > 100 Ohm*m. In dettaglio tale distribuzione si può osservare in due aree specifiche: nella parte centrale e verso nord il primo gruppo (<100 Ohm*m) e a sud del profilo ed in profondità il secondo gruppo (> 100 Ohm*m). Tali dati saranno elaborati con *software* specifici 2D e 3D per poter ottenere la tomografia geoelettrica della distribuzione dei valori di resistività nel sottosuolo di Ferrara.

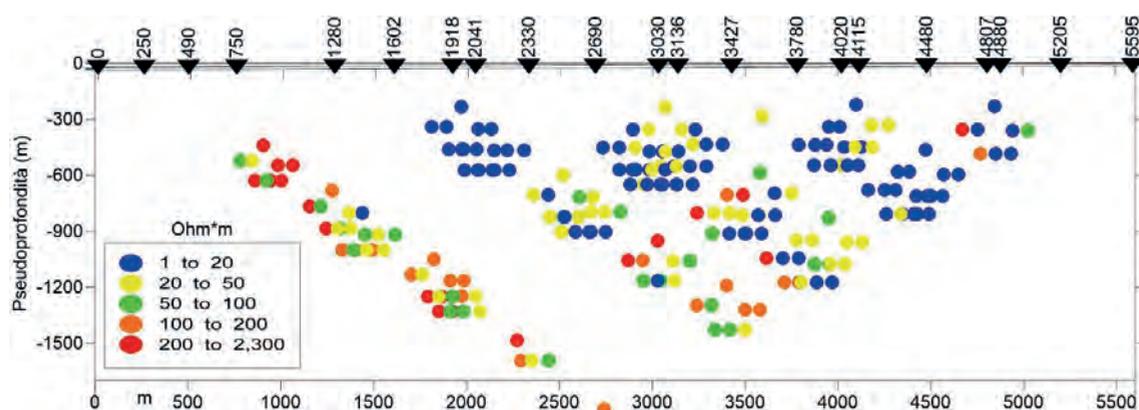


Fig. 6 – Distribuzione dei valori di resistività apparente lungo il profilo della DERT.

BIBLIOGRAFIA

- Colella, A., Lapenna, V., Rizzo, E.: *High-resolution imaging of the High Agri Valley Basin (Southern Italy) with electrical resistivity tomography*. Tectonophysics, 386, 29-40, 2004.
- Di Maio R., P. Mauriello, D. Patella, Z. Petrillo, S. Piscitelli, A. Siniscalchi, 1998. *Electric and electromagnetic outline of the Mount Somma-Vesuvius structural setting*. J. of Volc. and Geoth. Res. (82) 219-238.
- Giocoli, A., Magri, C., Piscitelli, S., Rizzo, E., Siniscalchi, A., Burrato, P., Vannoli, P., Basso, C., Di Nocera S.: *Electrical Resistivity Tomography investigations in the Ufita Valley (southern Italy)*, Ann. Geophys, 51, 213-223, 2008.
- Hallof, P.G.: *On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements*, Cambridge, MIT, Ph.D. thesis, 1957.
- Rizzo, E., Colella, A., Lapenna, V., Piscitelli S., *High-resolution images of the fault-controlled High Agri Valley basin (Southern Italy) with deep and shallow electrical resistivity tomographies*. Physics and Chemistry of the Earth, 29, 321-327, 2004a.
- Rizzo and Giampaolo. *New Deep Electrical Resistivity Tomography in the High Agri Valley basin (Basilicata, Southern Italy)*. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 10.1080/19475705.2018.1520150 (in press), 2018.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F.: *Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust*, Geophysical Prospecting, 48, 455-471, 2000.
- Suzuki, K., Toda, S., Kusunoki, K., Fujimitsu, Y., Mogi, T., Jomori, A.: *Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary*. Engineering Geology, 56, 2-45, 2000.

Relazioni fra storia deposizionale, crescita urbana e rischi ambientali nella città di Ferrara

M. STEFANI¹ e L. MINARELLI²

¹ Dipartimento di Architettura, Università di Ferrara

² INGV Roma1, L'Aquila

1. Introduzione

La città di Ferrara registra un'intima relazione fra evoluzione idrografico-sedimentaria, architettura stratigrafico-deposizionale, interventi antropici e storia urbana. La città si nucleò nell'Alto Medioevo, come piccolo *castrum* sull'argine naturale del Po e poi si espanse, prima in modo lineare lungo il fiume, poi con successive addizioni, rese possibili da opere di bonifica idraulica e dalla progressiva migrazione delle sponde del fiume, che rimase attivo fino alla fine del XVI secolo (Bondesan *et al.*, 1995; Stefani e Zuppiroli, 2010). Queste modalità di espansione urbana hanno generato una stretta correlazione fra i caratteri delle successive espansioni urbane, la variazione delle quote topografiche, le caratteristiche geotecniche dei sottostanti sedimenti e la distribuzione areale dei rischi indotti da inondazioni e da terremoti.

2. Il primo sviluppo dell'insediamento urbano

Le Figg. 1 e 2 illustrano la distribuzione spaziale delle diverse fasi di crescita della città e il loro rapporto con le sottostanti unità geologiche. In epoca romana, l'area di Ferrara era già attraversata dal Po ed era sede di diffusi insediamenti rustici, come quelli sulle sabbie di meandro di Cassana o su i depositi di argine naturale di Quacchio. L'inizio del medioevo fu caratterizzato da un diffuso riassetto idrografico. Nei pressi di San Giorgio, il Po incominciò ad aprirsi nei due canali distributori del Primario e del Volano (Stefani *et al.*, 2019). In epoca altomedievale, su un ventaglio di rotta rilevato (Fig. 3), nei pressi della divergenza dei due rami deltizi, si impiantò un primo nucleo abitato, fortificato da una palizzata lignea e tangente al percorso arginale. Data la mancanza di fonti storiche e di moderne indagini archeologiche, la datazione di questo *castrum* è incerta, ma è in ogni caso altomedievale. L'insediamento si sviluppò poi in modo lineare, su sabbie e limi di argine naturale, come ben visibile in Fig. 3. All'inizio del XII secolo, il nucleo urbano aveva raggiunto una lunghezza di circa 2200 m, ma una larghezza di soli 100-300 m. L'insediamento era infatti in buona parte limitato ai sedimenti sabbioso-limosi di argine, dato che essi, essendo permeabili e relativamente elevati (Fig. 3), permettevano il passaggio anche nei periodi piovosi e la costruzione di pozzi freatici. La cresta arginale era sede di un percorso sovraregionale, mentre la sponda fluviale era sede di attività portuali. A nord, l'insediamento era limitato da aree interfluviali più basse e allagabili, ricche di sedimenti argilloso-limosi. Anche all'interno dell'area insediata, permanevano aree allagabili repulsive, come la depressione intorno alla chiesa di Santa Agnese.

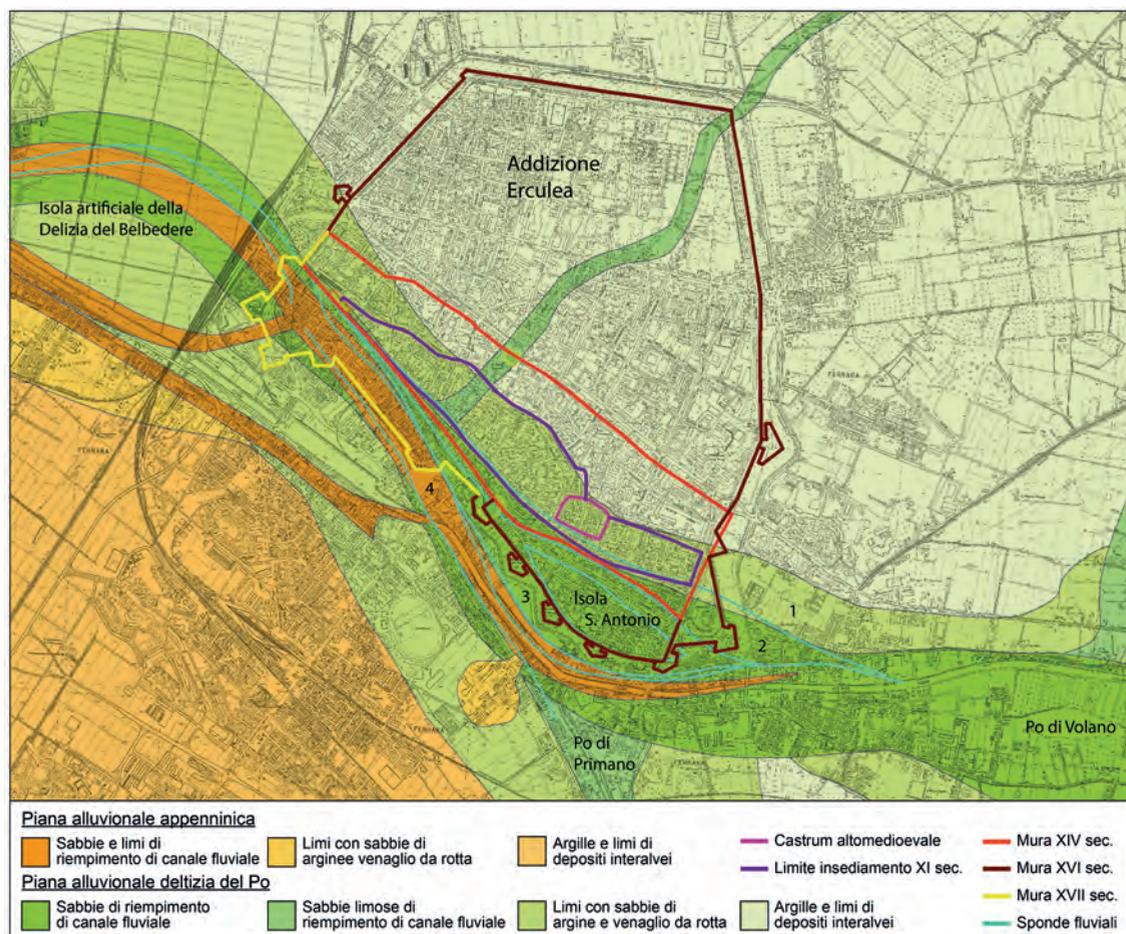


Fig. 1 - Carta geologica che mostra la distribuzione dei corpi sedimentari affioranti di Po e di Reno, con sovrapposte le varie fasi di espansione urbana di Ferrara. I numeri indicano la successione cronologica delle sponde del Po, dall'Alto Medioevo al XVI secolo. Notare la stretta relazione fra la geometria dei corpi sedimentari, la posizione delle successive sponde fluviali e lo sviluppo delle strutture urbane.



Fig. 2 - Immagine delle stesse strutture fluviali e urbane sovrapposte ad una foto zenitale di Ferrara che rende percettibile l'intima relazione fra evoluzione fluviale e i caratteri della città attuale.

3. La crescita bassomedievale della città

Nel corso del XII secolo, si sviluppò il corso attuale del Po, che iniziò a passare anche a nord di Pontelagoscuro. Questo mutamento idrografico indusse una progressiva diminuzione del flusso nel canale che bordava a sud la città e l'insediamento si poté quindi limitatamente espandere verso meridione. Confinato a sud dal fiume, il centro urbano poté espandersi maggiormente solo verso nord, su terreni coesivi poveri di sabbie, su cui si insediò la cattedrale. Nei secoli successivi, una serie di interventi di drenaggio permisero ulteriori contenute espansioni dell'area urbana nelle parti prossimali della piana interalvea, finché, nel corso del XIV secolo, la città fu circondata da fortificazioni continue, ma conservava una pianta assai allungata, che si sviluppava ancora in buona parte su sedimenti arginali (Fig. 3). Il tracciato delle mura meridionali duecentesche è chiaramente controllato dalla geometria concava della sponda fluviale, particolarmente nel tratto fra Via Cammello e Via Formignana (Fig. 3). Al limite meridionale della città, la progressiva riduzione del flusso aveva nel frattempo permesso l'insediamento del Monastero di Sant'Antonio in Polesine sulla omonima isola, formata da sabbie fluviali.

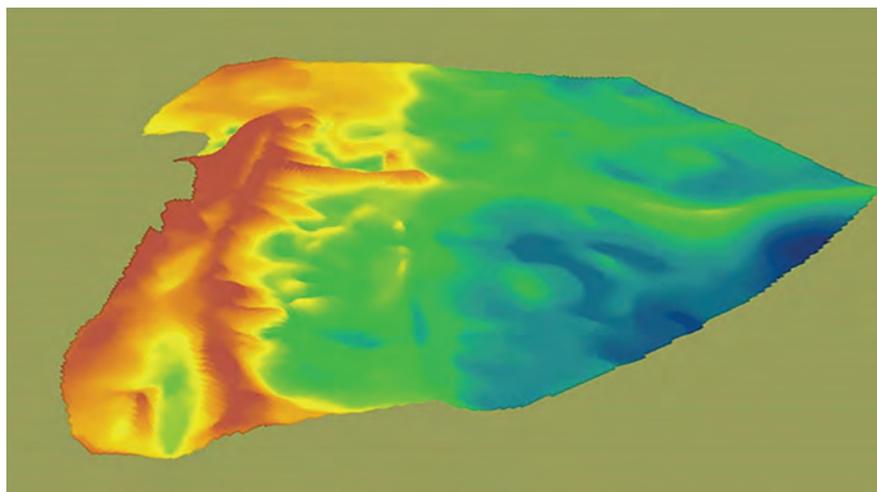


Fig. 3 - Modello altimetrico del centro storico di Ferrara. Il suo bordo corrisponde al tracciato delle mura urbane. Le quote variano da 3,2 m sul livello del geoido, colore blu, a 9,8 m, marrone scuro. Nord a destra. Si noti il corpo rilevato dell'argine naturale sinistro del Po, con quote superiori agli 8 m, affiancato dai corpi di argine, che degradano verso la zona depressa della piana interalvea. Dal dosso arginale del Po si diparte il dosso allungato di un alveo minore, che passa per il Castello Estense e si dirige verso l'angolo nord-est delle mura. Si confronti questa morfologia con la carta geologica di Fig.1.

4. Le addizioni rinascimentali e la fine del ramo meridionale del Po

Durante l'ultimo quarto del XIV secolo, il flusso idrico a nord dell'Isola di Sant'Antonio cessò, anche a causa della costruzione di argini artificiali, e l'area fu interessata dai primi insediamenti, che si svilupparono poi, alla metà del XV secolo, nell'Addizione di Borso, che portava le mura sud nella loro posizione attuale, inglobando nell'area urbana la precedente isola monastica (Stefani e Zuprioli, 2010). Nell'area di questa addizione, è ancora ben visibile la depressione topografica

del ramo del Po che fluiva a nord dell'isola (Fig. 3). Grandi lavori di bonifica consentirono poi, a partire dal 1492, l'espansione urbana dell'Addizione Erculea, a nord di Viale Cavour e Corso Giovecca. Questa parte della città si sviluppò in buona parte su argille, argille limose e argille torbose di depressione interalvea, associate a proprietà geotecniche scadenti e a lenti processi di consolidamento, che hanno indotto deformazioni particolarmente spettacolari nelle grandi strutture architettoniche, come ad esempio visibile nelle chiese di Santa Maria della Consolazione e di San Cristoforo della Certosa.

La città fu quindi gravemente danneggiata dalle scosse sismiche del novembre 1570 che costrinsero a diffuse opere di restauro e ricostruzione, senza però mutare l'assetto urbanistico (Guidoboni, 1987). Le fasi finali di crisi del Po di Ferrara ebbero un impatto determinante sulla storia della città. Il tentativo di far scolare il Reno a mare attraverso il Po, tramite la sua immissione a Porotto (1526), produsse il rapido interrimento dell'alveo nella zona urbana. Il nostro rilevamento geologico ha rivelato che i depositi di Reno sono sviluppati fino ad oriente di San Giorgio e fuoriescono verso sud con ventagli da rotta (Fig. 3). L'interrimento del fiume indusse la crisi irreversibile delle attività portuali a Ferrara e il venir meno della protezione militare offerta dal canale fluviale che ostacolava gli assalti e il posizionamento delle artiglierie. Questo rese necessario fortificare meglio le mura meridionali, con la costruzione, su depositi di riempimento di alveo fluviale, dei grandi bastioni rinascimentali e poi delle mura e della fortezza pontificia.

5. Dal XVII al XX secolo

La definitiva interruzione del flusso fluviale, alla fine del XVI secolo, insieme al passaggio dalla signoria estense al governo papale, portarono alla costruzione della grande fortezza pentagonale, in gran parte sorta sul riempimento sedimentario dell'alveo del Po, ma anche su depositi di argine naturale. Nei secoli successivi, la crisi economica e demografica indusse una notevole contrazione dell'edificato. A partire dal 1605, l'area a sud della città fu allagata dalle acque del Reno, Zena e Savena, il che, insieme alla costruzione della fortezza, portò alla distruzione di gran parte dei borghi medievali sorti sulla sponda meridionale del fiume. Durante il XVIII secolo, l'apporto sedimentario di origine appenninica aveva già in buona parte colmato le paludi a sud della città (Fig. 4).

L'assetto territoriale del Ferrarese mutò poi profondamente con l'avvento delle estese bonifiche idrauliche per innalzamento meccanico delle acque, a partire dalla seconda metà del XIX secolo. Lo sviluppo economico e demografico della città fu però molto lento, per cui essa non si espanse in modo significativo prima del XX secolo. Dopo la Seconda Guerra Mondiale, iniziò invece una fase molto rapida di espansione dell'area urbana, che per la prima volta si allontanò decisamente dai corpi sedimentari di alveo. Il polo industriale petrolchimico si è sviluppato all'estremità occidentale della pianura a meandri del Po (Vedi Stefani et al., sulla geologia di superficie, questo volume). Il quartiere settentrionale del Barco fu costruito sui depositi fini di depressione interalvea. Molto ampia è stata l'espansione urbana verso sud, lungo Via Bologna, su depositi argilloso-limosi, di provenienza appenninica, in buon parte depositi solo durante il XVII secolo. Gli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012 hanno ricordato quale sia il livello di rischio sismico a cui è soggetto la città, un rischio che è arealmente fortemente modulato dai caratteri stratigrafici locali.

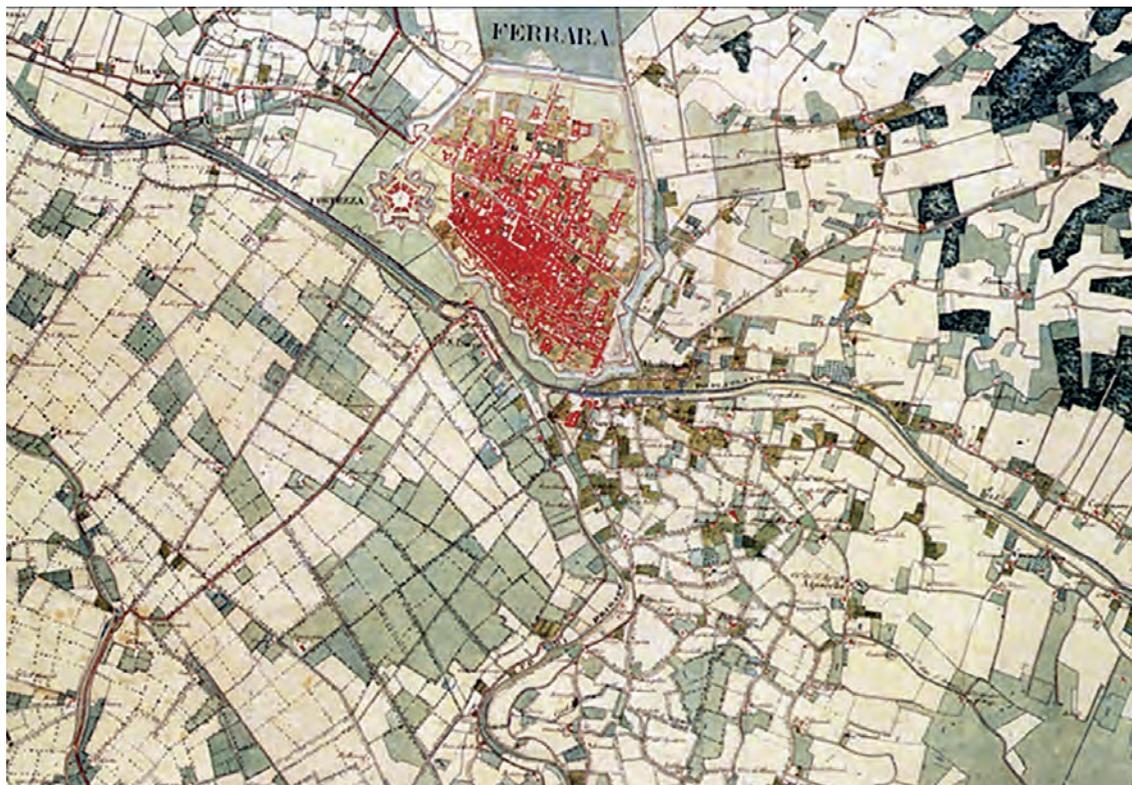


Fig. 4 - Carta a colori del 1814 che rappresenta con grande precisione i caratteri del territorio periurbano, dopo la conclusione dell'accumulo sedimentario, ma prima dell'avvento delle bonifiche idrauliche per sollevamento meccanico, per cui permanevano aree permanentemente allagate, subito a est della città. La carta è attraversata dalle forme fluviali medievali del Po di Volano e Primaro; a SO si osserva l'alveo abbandonato del Reno seicentesco.

6. Conclusioni

La storia urbana qui brevemente riassunta spiega bene perché le varie parti della città, insediate in fasi successive, presentino caratteri geologici diversi e siano sottoposte a differenti livelli di rischi ambientali, fra cui spiccano quelli da allagamento o liquefazione cosismica. Nelle aree depresse è evidentemente più elevato il rischio di potenziali rotte fluviali, di Po o Reno. Allagamenti possono verificarsi anche in occasione di eventi pluviometrici intensi, come ad esempio nella depressione chiusa, nel centro cittadino, fra Castello Estense e San Domenico o quelle dell'Addizione Erculea, in particolare il punto più depresso nei pressi del Cimitero Ebraico. La liquefazione cosismica è ben attestata in diversi corpi di paleoalveo del Ferrarese, sia in occasione del recente terremoto del 2012 (Caputo *et al.*, 2012), che durante quello del 1570 (Guidoboni 1987). Essa è ovviamente controllata dalla presenza di sabbie sature di acqua in tutti i primi 20 m di sottosuolo, ma il contributo dei sedimenti prossimi alla superficie è particolarmente rilevante. La propensione alla liquefazione è stata stimata analizzando centinaia di prove penetrometriche a piezocono, con le metodologie CLiq, ma i risultati vengono qui sintetizzati in modo sintetico e qualitativo, dato lo spazio concesso da una pubblicazione come questa.

Le parti più antiche della città sono sviluppate sul corpo arginale che a tratti contiene certamente sedimenti granulari liquefacibili che passano però rapidamente a corpi coesivi, il potenziale

di liquefazione è inoltre qui ridotto dalla depressione del livello freatico, legata alle quote topografiche relativamente elevate, fattore morfologico che riduce anche in modo significativo il potenziale di allagabilità. Alcune depressioni chiuse presentano però secolari problemi di scolo, come la citata depressione intorno a Santa Agnese o di fronte a San Domenico.

L'espansione tardomedievale sorta sulle sabbie dei canali del Po e dell'Isola di Sant'Antonio sembra presentare ovunque in elevato potenziale di liquefazione cosismica e le fonti storiche (Guidoboni, 1987) vi testimoniano effettivamente eventi di liquefazione e crolli catastrofici, come ad esempio nella zona di Castel Nuovo, nei pressi dell'attuale Piazza Verdi (Guidoboni, 1987). Le quote topografiche sono relativamente elevate e il pericolo di allagamento moderato, ma esistono depressioni chiuse che possono localmente allagarsi durante eventi pluviometrici intensi, come in Via XX Settembre, nei pressi di Via Porta d'Amore.

Le espansioni medievali e rinascimentali sui sedimenti coesivi della piana interalvea a nord del Po di Ferrara sono assai povere di sedimenti granulari prossimi alla superficie, per cui i rischi da liquefazione vi possono derivare solo da eventuali sedimenti sepolti a una certa profondità. Condizioni analoghe si manifestano in genere anche nelle periferie meridionali, fondate sui sedimenti fini di provenienza appenninica e di età recente, coesivi e poco consolidati. Vi sono presenti però corpi sepolti di paleoalvei di provenienza appenninica.

Sedimenti sepolti granulari e potenzialmente liquefacibili sono principalmente legati alle sabbie deposte durante fasi dell'ultima glaciazione. Esse sono molto diffuse nella parte settentrionale e occidentale del territorio comunale, assai più sparse nella parte meridionale, anche se nel Pleistocene superiore era soggetta ad apporti sedimentari fini di provenienza appenninica. Il contatto fra depositi sabbiosi e fini passa proprio sotto il centro storico. In tutte le aree è presente un significativo fattore di amplificazione sismica, legata alla presenza di sedimenti sciolti, con bassa velocità delle onde sismiche. Una discussione approfondita su questo argomento evidentemente travalica il limite di questo contributo, teso ad illustrare l'intimo legame fra evoluzione fluviale, accumulo sedimentario, storia urbana e distribuzione areale dei notevoli rischi ambientali a cui è sottoposta la città.

BIBLIOGRAFIA

- Bondesan M., Ferri R., Stefani M. (1995). *Rapporti fra lo sviluppo urbano di Ferrara e l'evoluzione idrografica, sedimentaria e geomorfologica del territorio*. In Visser, A.M., Ed., Ferrara nel Medioevo: topografia storica ed archeologia urbana, 27-42.
- Caputo R., Iordanidou K., Minarelli L., Papathanassiou G., Poli M.E., Rapti-Caputo D., Sboras S., Stefani M., Zanferrari A. (2012) *Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy*. Annals of Geophysics 4:743-749 doi: 10.4401/ag-6148
- Guidoboni E. (1987) *I terremoti del territorio ferrarese*. F. Bocchi. Ed., Storia di Ferrara AIEP 40:625-640.
- Stefani M., Zuppiroli M. (2010) *The interaction of geological and anthropic processes shaping the urban growth of Ferrara and the evolution of the surrounding plain*. Il Quaternario Italian Journal of Quaternary Sciences, 23(2bis), 355-372.
- Stefani M., Minarelli L., Pavanati A. (2019) *Cartografia geologica e storia deposizionale dei corpi accumulati da Po e Reno nell'area di Ferrara*. Boll. Geof. Teor. Appl., 60, Suppl. 2, s112-s118.

Cartografia geologica e storia deposizionale dei corpi sedimentari accumulati da Po e Reno nell'area di Ferrara

M. STEFANI¹, L. MINARELLI² e A. PAVANATI³

¹ *Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara*

² *INGV Roma1, L'Aquila*

³ *Studio Geologico Pavanati, Porto Tolle (RO)*

1. Introduzione

Il territorio di Ferrara è interamente formato da sedimenti fluviali affioranti, depositi nell'Olocene, attribuibili, secondo i criteri CARG, al Subsistema di Ravenna (AES8). Lo studio geomorfologico, geologico-stratigrafico e la cartografia geologica qui presentati permettono di ricostruire l'evoluzione deposizionale di questi corpi sedimentari. I depositi più antichi risalgono probabilmente al Secondo Millennio a.C., ma ampie parti del territorio sono formate da sedimenti molto recenti, del XVII secolo d.C. In queste aree, la sedimentazione è sostanzialmente terminata con la realizzazione di arginature continue, robuste ed efficaci, nel XIX secolo, ma l'accumulo sedimentario ha continuato negli alvei arginati e in occasione di alcune rotte. Il territorio è nettamente bipartito in una porzione nord-orientale, formata da sedimenti del Po, ed una meridionale, con depositi del Reno e di altri fiumi appenninici.

2. Metodologie di studio

La ricerca ha inizialmente riguardato la raccolta dei dati pregressi disponibili sulla superficie e sul sottosuolo. Sono stati raccolti e georiferiti documenti di cartografia storica, dati altimetrici e immagini aeree e satellitari, nel campo visibile e nell'infrarosso vicino. La cartografia storica fornisce infatti preziose informazioni sulle evidenze morfologiche dei corpi sedimentari, poi cancellate dalle ampie opere di bonifica idraulica, riorganizzazione agraria e urbanizzazione. Assai utili sono state le cartografie realizzate da Giovan Battista Aleotti, alla fine del XVI secolo, quelle sull'evoluzione idrografica del Fiume Reno a Sud di Ferrara, a partire dal 1616, le carte contenute nell'atlante di Antonio Penna nel XVII secolo e la Carta Napoleonica del 1814. Sono state inoltre raccolte e georiferite tutte le carte di superficie dei secoli XIX-XX. Si è anche tenuto conto delle numerose fonti storiche scritte, che descrivono in modo accurato l'evoluzione idrografica del territorio, a partire dal XV secolo. Sono state poi raccolte le immagini aeree e satellitari, a partire dalle immagini da dirigibile del 1911, a quelle dei ricognitori alleati del 1944, ai vari voli recenti, oltre alle immagini da satellite acquisite in diverse bande e in differenti momenti, da quelle LANSAT a quelle SPOT, oltre alla suite diacrona disponibile in Google Earth. I dati altimetrici derivano dai misure LIDAR ad alta precisione, acquisiti nel 2011, su incarico della Regione Emilia-Romagna (Figg. 1 e 3), e da livellazioni manuali nel centro storico, in un'area ove le tecniche di telerilevamento non sono affidabili, a causa della densità dell'edificato. Dopo l'analisi integrata di queste immagini, dati e strati informativi, si è quindi proceduto ad una campagna geologica di sopralluoghi e campionamenti di terreno. I dati di superficie sono



Fig. 1 - Modello altimetrico che mostra chiaramente l'espressione morfologica dei corpi sedimentari fluviali, ad oriente di Ferrara. Le tinte altimetriche di toni azzurri indicano quote fra -1 e + 1 m rispetto al livello del mare, la gamma cromatica poi descrive quote crescenti, fino al marrone scuro, che individua aree fra +9 e +10 m. Ben visibile è il tracciato del medievale del Po di Volano, che scorreva da Ferrara, per Fossalta, verso Medelana; da esso si stacca verso sud il dosso del coevo Po di Primaro, che serpeggia in direzione di Marrara. Il dosso più basso fra i due testimonia il principale corso di età classica, "Eridanus", abbassato dalla subsidenza.

stati poi confrontati con quelli disponibili nel sottosuolo, della relativa banca dati (Stefani *et al.*, 2019). Tutte le informazioni sono poi state sintetizzate per produrre la cartografia geologica di superficie, realizzata sotto forma di *shapefiles*, in ambiente ESRI ArcGIS ed illustrata qui da alcune immagini (Figg. 2 e 4).

3. Corpi sedimentari di provenienza padana

I sedimenti del Fiume Po formano l'ampia area a nord e a est dei canali di Burana e del Primaro, dall'argine del Panaro fino al mare. Su di essi si fonda quindi il centro storico di Ferrara, la zona industriale e le periferie settentrionali e orientali (Figg. 1 e 2). In quest'area affiorano spesso sedimenti di età relativamente antica, formati fra il I-II millennio a.C. e l'età medievale, con rinvenimenti archeologici di età romana abbastanza frequenti.

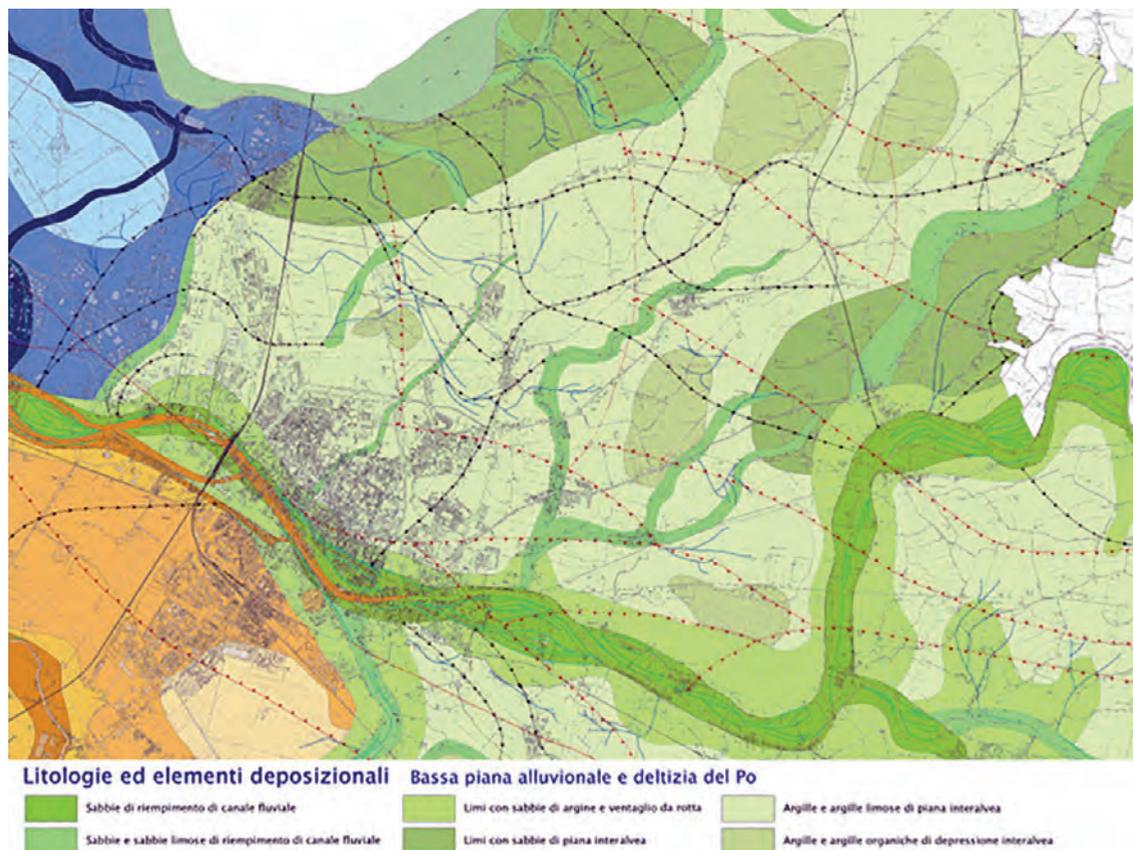


Fig. 2 - Stralcio della carta geologica comprendente l'area urbana di Ferrara. I toni di blu rappresentano i depositi della plana a meandri del Po, i verdi quelli della sua bassa pianura alluvionale. L'area è dominata dal corpo allungato delle sabbie del Po di Volano, affiancato dai suoi argini naturali. Nel corso del '500, depositi di Reno colmarono il precedente alveo del Po. Elementi lineari rappresentano la proiezione delle strutture fragili compressive, quelle a freccette il tracciato di corpi sepolti di alveo.

A NO della città, si sono accumulati ampi volumi di sabbie di meandro di Po, mentre i corpi arginali sono poco sviluppati. Queste sabbie (Subsintema AES8) sono spesso in contatto stratigrafico con le sottostanti sabbie singlaciali (AES7, vedi Figura 1 del nostro articolo sul Quaternario superiore nel sottosuolo in questo volume). Quest'area corrisponde all'alto strutturale di Casaglia, in cui la subsidenza è ridotta e i fiumi olocenici potevano quindi erodere e rimaneggiare le precedenti sabbie pleistoceniche.

La maggior parte del territorio di Ferrara è formato da depositi della bassa pianura alluvionale del Po, che sfuma verso est nella plana deltizia, solcata dai corpi sabbiosi di varie generazioni di canali distributori (Bondesan, 1990; Stefani e Vicenzi, 2005). Questi canali hanno formato corpi allungati di sabbie (Fig. 1), topograficamente pensili (Castiglioni, 1999), affiancati da corpi limoso-sabbiosi di argine naturale, che sfumano lateralmente in fanghi argillosi, frequentemente torbosi, sedimentati in ampie depressioni interalvee. Dal canale fluviale principale fuoruscivano ventagli e canali secondari, divaganti attraverso la plana inondabile, testimoniati da corpi sabbioso-limosi, come quello del Traversagno, che passa sotto il Polo Petrolchimico, e quello di via Borgo dei Leoni, che attraversa il centro storico (Fig. 2). L'attuale area urbana è stata percorsa,

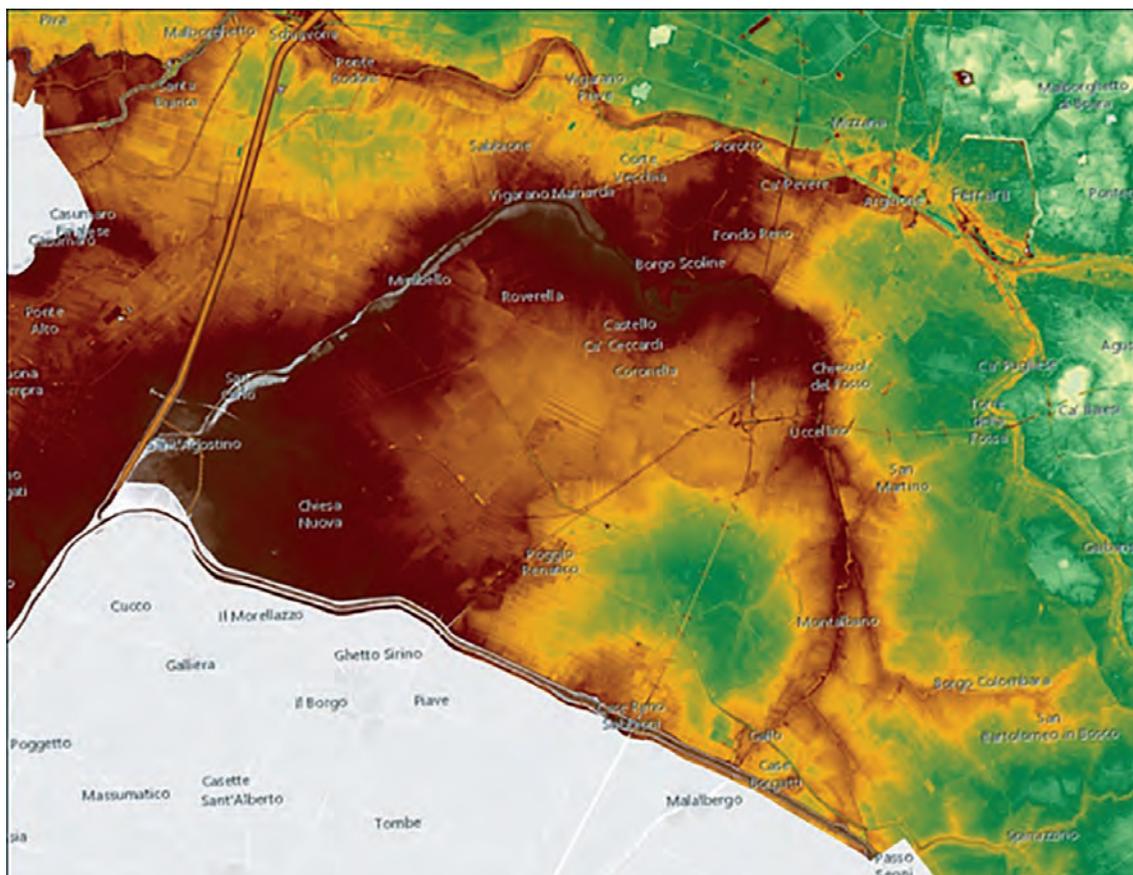


Fig. 3 - Modello altimetrico della pianura alluvionale formata dal Reno, in gran parte durante il XVII secolo. Ben visibile è il suo dosso che da Sant'Agostino si allunga verso Vigarano, per poi rigirarsi verso est e sud-est e aprirsi nei due rami di delta interno, circondando una vasta depressione interalvea. Tinte altimetriche come in Fig. 1. Si confronti questa espressione morfologica con la distribuzione dei corpi geologici della figura successiva.

fin dal primo millennio a.C., dal canale principale del Po, che usciva dalla fascia a meandri, in corrispondenza dell'attuale periferia occidentale della città (Cassana) e si apriva poco a valle nei suoi canali distributori deltizi. In età romana, poco a valle del futuro sito di Ferrara, si aprivano i canali distributori deltizi di Copparo e dell'Eridano (Bondesan, 1990; Stefani 2006). Ferrara si è sviluppata, in età medievale, sulle sponde del Po, prossimo a dividersi nel canale distributore principale, quello settentrionale, il Volano, e in quello meridionale, il Primaro (Stefani e Vincenzi, 2005). Nel secolo XII, a monte della città, nei pressi di Ficarolo, iniziò ad organizzarsi il nuovo ramo settentrionale del Po (Bondesan, 1990). Nel corso del Basso Medioevo, vennero attuate importanti opere idrauliche per preservare il flusso idrico anche nell'alveo meridionale, al fine di mantenere operoso il porto fluviale della città. Fra queste opere, in carta è visibile il canale che delimitò, poco a monte della città, l'Isola artificiale del Belvedere (Fig. 2). L'immissione forzata del Reno, a Porotto (1526), in assenza di un adeguato gradiente idraulico, determinò l'intasamento del ramo meridionale del Po, che fu definitivamente abbandonata dalle acque di provenienza padana alla fine del XVI secolo. Il riempimento da parte di limi e argille del Reno del canale di abbandono del Po è ben visibile in carta (Fig. 2). Da questo momento, la

sedimentazione di Po rimase attiva solo nell'attuale alveo settentrionale, sempre più solidamente arginato.

4. Corpi sedimentari di provenienza appenninica

L'area a sud e a ovest del Canale di Burana e del Po di Primaro è interamente formata da sedimenti deposti dal Reno e da altri fiumi minori, provenienti dall'Appennino Bolognese, quali Zena, Savena e Idice. Nonostante le dimensioni relativamente minori di questi quattro fiumi, il loro apporto sedimentario è stato molto elevato, a causa della forte erodibilità dei sedimenti terrigeni affioranti nel bacino idrografico. In tutta l'area fra il centro storico di Ferrara e l'attuale corso del Reno, affiorano quasi solo sedimenti estremamente recenti, sedimentati durante il XVII e XVIII secolo. Il corpo principale del Reno del '600 conserva un'ottima espressione geomorfologica (Fig. 3). Esso si segue da Vigarano Mainarda, con tracciato arcuato, fino a Chiesuol del Fosso e poi verso sud, ove forma un dosso allungato, su cui corre la Strada Statale Porrettana.

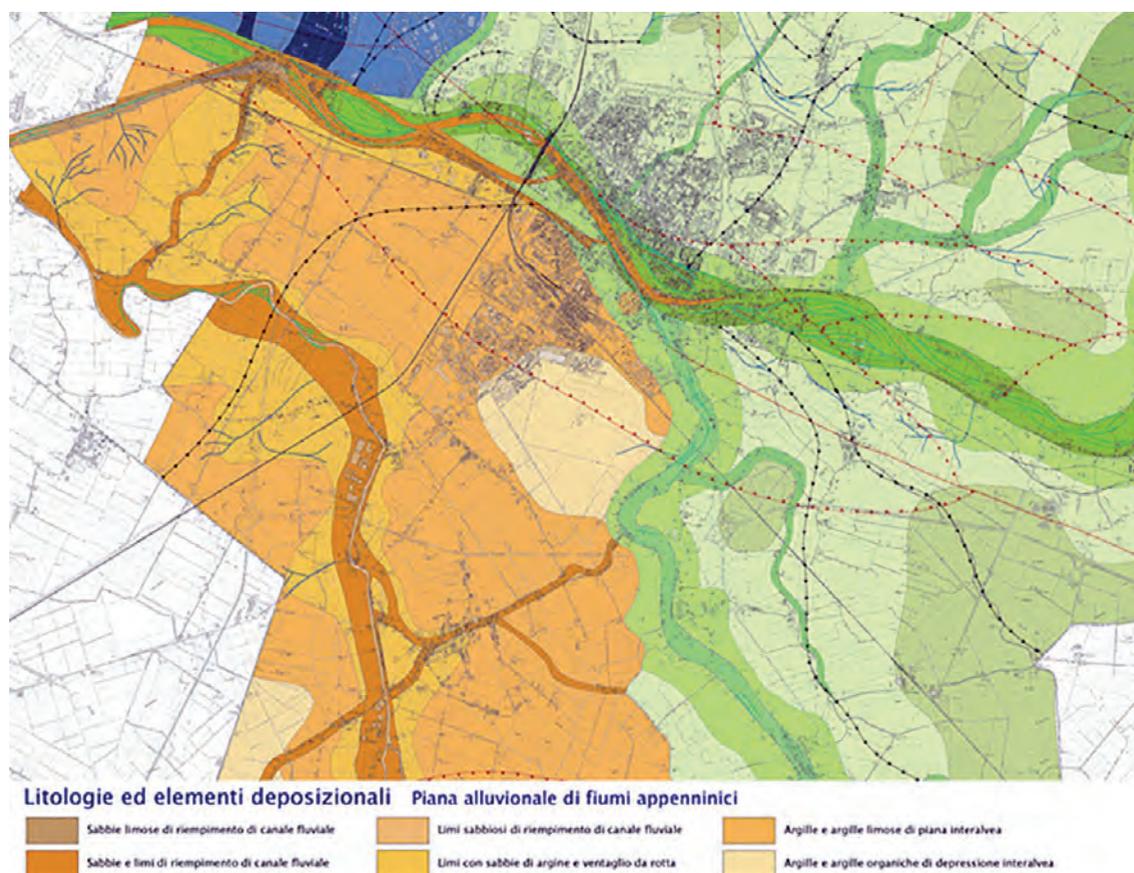


Fig. 4 - Estratto della carta geologica che mostra il corpo di alveo del Reno, formatosi nel '600 nell'ampia area a sud del centro storico di Ferrara, affiancato dai coevi fanghi interalvea. A est, sono evidenti i paleoalvei dei precedenti Po di Ferrara e Po di Primaro. Si nota anche il corpo limoso che registra l'ultimo canale di abbandono.

L'accumulo di questa vasta plaga di sedimenti appenninici iniziò solo nel 1604, quando fu tagliato l'argine destro del canale artificiale cinquecentesco del Reno, che era stato costruito fra Sant'Agostino e Porotto. Come detto, il tentativo di immissione in Po fallì, per cui ci si risolse, per tentare di riscavare il canale, ad immettere "temporaneamente" le acque del Reno nella vasta area della San Martina, bonificata, all'inizio del secolo precedente, a sud di Ferrara. Già pochi anni dopo, il Reno aveva cominciato a costruire il suo delta interno nell'ampia palude (Fig. 5), progradando rapidamente e dividendosi nei due canali distributori del Gallo, a ovest, e della Zervela. I fiumi Zena, Savena e Idice nel frattempo avanzavano da sud, fino ad interferire con i sedimenti di Reno, provenienti da nord. L'enorme allungamento dei canali del delta interno del Reno, all'inizio del XVIII secolo, aveva quasi annullato i gradienti di pendenza longitudinale, ostacolando il deflusso di acque e sedimenti. Questo indusse un gran numero di rotte, che rimontavano sempre più verso monte. Dopo quella del 1731, fra Mirabello e Sant'Agostino, il flusso verso l'area di Ferrara cessò quasi completamente, interrompendo la sedimentazione. In poco più di un secolo, si erano sedimentati anche 3-4 m di sedimento, su molti chilometri quadri, a sud della città e fino alle sue porte. La sedimentazione cessò definitivamente nel 1795, quando le acque del Reno vennero artificialmente incanalate nell'antico alveo del Po di Primaro, a sud-est di Ferrara.

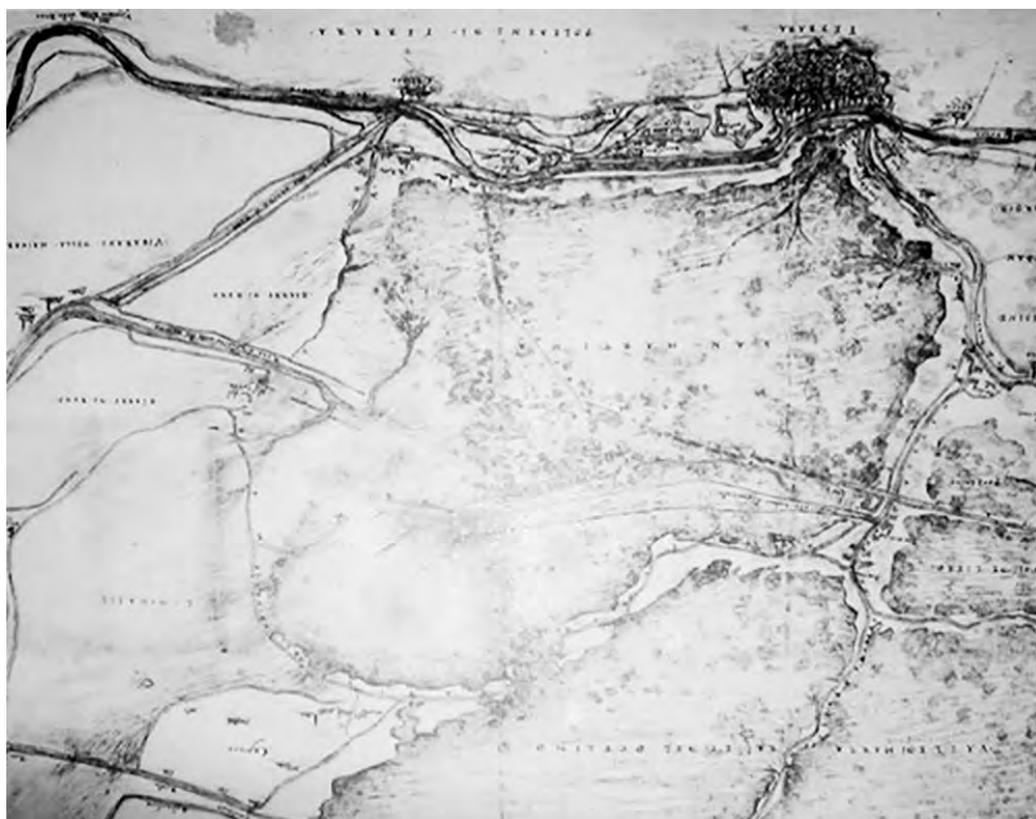


Fig. 5 - Disegno del 1616 che descrive accuratamente l'area della San Martina, a sud del centro murato di Ferrara, completamente invasa dalle acque del Reno, in conseguenza del taglio del suo argine nel 1604. In alto, a destra, è visibile il canale per Porotto, completamente abbandonato, mentre il Reno già deposita un corpo di canale progradante, che nel corso del secolo successivo colmerà completamente di sedimenti l'area inondata. Notare i ventagli terminali del neoformato delta interno.

5. Conclusioni

Un approccio interdisciplinare ha permesso di ricostruire le geometrie dei corpi sedimentari e la loro storia deposizionale. La parte settentrionale del territorio di Ferrara è formata da sedimenti di Po, mentre la parte meridionale è costituita da sedimenti di origine appenninica. In entrambe le aree, i sedimenti granulari sabbiosi e permeabili sono confinati ai corpi allungati di alveo, spesso pensili, affiancati dai sedimenti di argine e da più vaste aree di sedimenti interalvei coesivi, spesso organici, tendenzialmente impermeabili. La distribuzione dei diversi tipi di sedimento controlla le proprietà geotecniche, più scadenti nelle ampie aree interalvee, ancora oggi più facilmente allagabili, relativamente migliori sui corpi di paleoalveo, relativamente meno allagabili, su cui si concentra gran parte degli insediamenti e della rete viaria storica. Il potenziale di liquefazione sismica dei sedimenti prossimi alla superficie è quindi essenzialmente limitato ai corpi di sabbie fluviali. Sia corpi di canale fluviale di Po che di Reno sono già stati soggetti a fenomeni di liquefazione sismica, durante il terremoto del 2012, come in quello del 1570 (es. Caputo *et al.*, 2012). Per la corretta valutazione del rischio di liquefazione cosismica occorre ovviamente considerare anche i corpi di sabbie sepolte nei primi 20 m circa di sottosuolo, di età olocenica o pleistocenica.

BIBLIOGRAFIA

- Bondesan M., (1990) - *L'area deltizia padana: caratteri geografici e geomorfologici*. In: Bondesan, M. (Ed.), Il Parco dei delta del Po: studi ed immagini, vol. II. Spazio Libri, pp. 10-48.
- Castiglioni G.B. (Ed.), (1999) - *Carta Geomorfologica della Pianura Padana al 1:250.000*. MURST, SELCA, Firenze.
- Caputo R, Iordanidou K, Minarelli L, Papathanassiou G, Poli M.E, Rapti-Caputo D, Sboras S, Stefani M, Zanferrari A (2012) Geological evidence of pre-2012 seismic events, Emilia-Romagna, Italy. *Annals of Geophysics* 4:743-749 doi: 10.4401/ag-6148
- Stefani M. (2006) - *Il contesto paleogeografico e sedimentologico-stratigrafico della necropoli romana del Verginese*. In Mors immatura. I Fadieni e il loro sepolcreto, a cura di F. Berti, Firenze, pp. 16-41.
- Stefani M., Vincenzi S., (2005) - "The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system". *Marine Geology*, 222-223, 19-48.
- Stefani M., Minarelli L., Pavanati A., (2019) - *Cartografia geologica e storia deposizionale dei corpi sedimentari accumulati da Po e Reno nell'area di Ferrara*.

OR4

**Sviluppo ed integrazione di tecniche
diagnostiche non invasive
per la caratterizzazione strutturale
di edifici/infrastrutture
in aree ad elevato rischio naturale**

Diagnostica non-invasiva basata sull'analisi spettrale del rumore sismico ambientale (microtremori) di alcuni edifici scolastici del Comune di Ferrara

N. ABU ZEID e G. SANTARATO

Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Gli eventi sismici che hanno colpito la pianura emiliana nord-orientale nel periodo maggio-giugno 2012 con due scosse principali aventi M_L pari a 5,9 e 5,8, avvenute rispettivamente il 20 ed il 29 maggio 2012, a 30 e 42 km dal centro storico di Ferrara, hanno coinvolto, seppur marginalmente, la città di Ferrara, con danni alle strutture classificati non gravi. Infatti, il Dipartimento per la Protezione Civile (DPC) ha assegnato alla città la quinta classe della scala MCS nella mappa dell'intensità macrosismica. Peraltro, molti edifici, in particolare quelli storici, hanno avuto danni che hanno sollecitato il DPC ad effettuare rilievi speditivi, come misura preventiva, finalizzati alla verifica del tipo e livello di danno subito. I danni verificatisi, ad intensità così bassa, hanno sollevato preoccupazioni riguardanti il grado di vulnerabilità degli edifici storici e quindi del rischio sismico atteso. In uno studio specificamente eseguito da Dalla Negra *et al.* (2011), la vulnerabilità sismica degli edifici nel centro storico della città è classificata nell'intervallo A-D1, secondo la scala macrosismica EMS98 (Grünthal, 1998). Il 31% degli edifici è stato assegnato alla classe A, cioè vulnerabilità mediamente alta. Come è noto infatti, il livello del rischio sismico, a parità degli altri fattori, è direttamente proporzionale all'aumento della vulnerabilità degli edifici, in particolare di quelli privi di accorgimenti costruttivi antisismici o comunque finalizzati all'incremento della loro resistenza alle sollecitazioni dinamiche.

Nell'ambito del progetto CLARA, ed in particolare nell'attività di ricerca dedicata alle metodologie per la diagnostica non invasiva e multi-scala di edifici ed infrastrutture, lo scopo principale era lo sviluppo e l'implementazione di un approccio sistemico basato sull'integrazione di tecnologie avanzate per la caratterizzazione strutturale di edifici ed infrastrutture mediante la stima dei modi principali di vibrazione nelle due direzioni ortogonali, dei relativi smorzamenti e dell'andamento modale. Era inoltre prevista la diagnostica degli elementi della struttura mediante tecnologie di *smart-sensing* capaci di determinare le proprietà dinamiche e soprattutto le loro variazioni in seguito a sollecitazioni prodotte da un evento sismico, oltre a possibili variazioni dovute all'invecchiamento delle strutture stesse.

In questa nota viene succintamente descritta l'attività svolta dall'Unità Operativa dell'Università di Ferrara, sub-unità di Geofisica Applicata, che è consistita nell'acquisizione degli spettri di frequenza delle vibrazioni di alcuni edifici scolastici di vario grado (materna e primaria) scelti sia su indicazione di priorità da parte dell'Amministrazione Comunale di Ferrara, sia sulla base del grado di omogeneità delle caratteristiche strutturali degli edifici, che ha permesso di suddividerne le strutture in blocchi omogenei dal punto di vista della vulnerabilità sismica (Dalla Negra *et al.*, 2011).

Gli spettri di ciascuna delle 3 componenti spaziali ortogonali sono stati ricavati dall'analisi di Fourier del rumore sismico ambientale (microtremori); con questi è stato calcolato il rapporto

Horizontal-to-Vertical-Spectral Ratio - HVSR, secondo la procedura introdotta da Nakamura (Nakamura and Ueno, 1986; Nakamura, 1989, 2000, 2008). Questo studio ha rilevato gli spettri e le rispettive frequenze di risonanza non solo degli edifici, ai vari piani, ma anche del terreno circostante, mediante misure “in campo vicino”. Non sono però state esaminate le caratteristiche litologiche e geotecniche del sottosuolo di fondazione che, come è noto, potrebbe avere un ruolo rilevante sulla stabilità del costruito durante l’evento sismico, soprattutto in presenza di lenti di sabbia sciolta satura..

2. Acquisizione ed analisi

Nei 9 edifici selezionati (Fig. 1 e Tabella 1) le misure di rumore sismico ambientale sono state effettuate mediante l’utilizzo di due sismografi digitali uguali a 24 bit (modello Vibralog, M.A.E., Italia; Figg. 2b e 2c), ciascuno collegato ad un sismometro da 2 Hz. In totale sono state acquisite 65 coppie di misure, quasi simultanee, distribuite in base alla tipologia ed al numero dei piani di ciascun edificio. Le coppie di misure si riferiscono alla posizione scelta sul piano ed al basamento (misure di riferimento). In aggiunta sono state acquisite anche misure sul terreno circostante, in campo vicino, per determinare la risposta dinamica del terreno di fondazione, in termini di frequenza fondamentale di risonanza. Nella Fig. 2a è illustrata dettagliatamente, a scopo di esempio, l’ubicazione di tutti i punti di misura nella scuola elementare Biagio Rossetti. Nella fase

Posizione delle scuole studiate, centro storico, comune di Ferrara (FE)



Fig. 1 - Ubicazione degli edifici scolastici investigati: 1) Casa del Bambino, 2) Matteo Maria Boiardo, 3) Torquato Tasso, 4) Alda Costa, 5) Bianca Merletti, 6) Giovanni Battista Guarini, 7) Corrado Govoni, 8) Dante Alighieri, 9) Biagio Rossetti (Immagine da Google Earth).

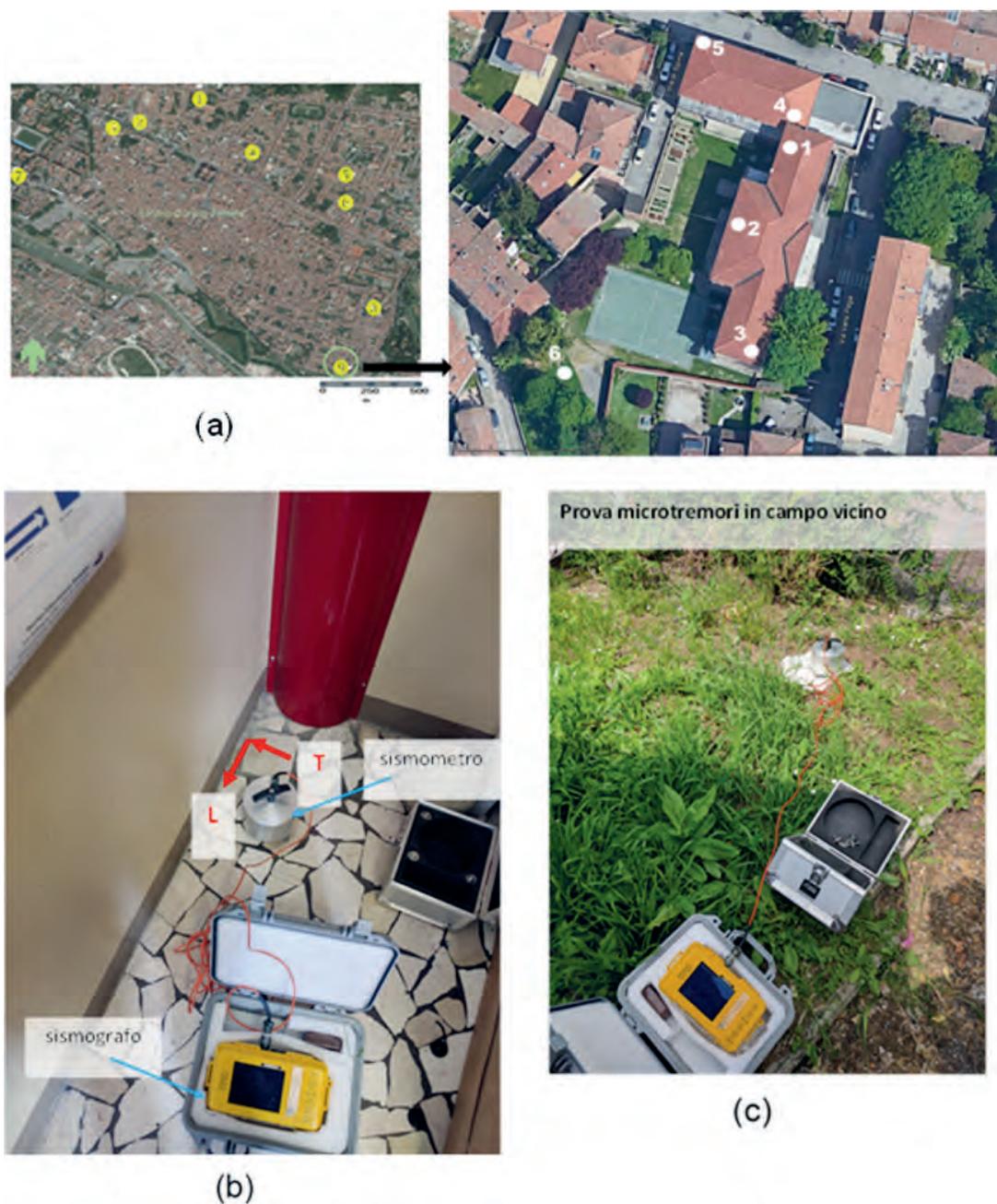


Fig. 2 - Scuola elementare Biagio Rossetti (n. 9 in Fig. 2a): a) ubicazione dei punti di misura (1-5 in Fig. 2a). b) particolare della fase di acquisizione della prova all'interno dell'edificio scolastico e c) all'esterno (punto 6, in campo vicino).

di acquisizione dei dati le componenti orizzontali dei sismometri sono state orientate in direzione parallela e perpendicolare ai lati ortogonali principali degli stessi edifici. Le serie temporali del rumore sismico sono state registrate in ciascun punto di misura per 30 minuti, con frequenza di campionamento di 250 Hz. In Fig. 3 si riportano, a titolo di esempio, le serie temporali registrate al primo piano della scuola Dante Alighieri (edificio n. 8 in Fig. 1).

Tabella 1 - Numero e dislocazione dei punti di misura effettuati in ciascun edificio scolastico.

n.	Nome Scuola	numero e posizione prova	numero e posizione prova nell'edificio
1	Casa del Bambino	1 basamento	1 primo piano
		4 basamento	4 primo piano
		6 basamento	6 primo piano
		7 esterno	
2	Matteo Maria Boiardo	1 basamento	1 primo piano
		3 basamento	3 secondo piano
		5 basamento	5 primo piano
3	Torquato Tasso	1 basamento	1 primo piano
		1 basamento	1 secondo piano
		4 basamento	4 secondo piano
4	Alda Costa	1 basamento	1 secondo piano
		3 basamento	3 secondo piano
		4 basamento	4 secondo piano
		5 esterno	
5	Bianca Merletti	6 esterno	
		1 basamento	1 primo piano
		2 basamento	2 primo piano
		3 basamento	3 primo piano
6	Giovanni Battista Guarini	4 esterno	
		1+ basamento	1+ primo piano
		3 basamento	3 primo piano
		5 basamento	5 primo piano
		6 esterno	
7	Corrado Govoni	7 esterno	
		1 basamento	1 primo piano
		2 basamento	2 primo piano
		4 basamento	4 primo piano
8	Dante Alighieri	5 esterno	
		1 basamento	1 primo piano
		1 basamento	1 secondo piano
9	Biagio Rossetti	1 basamento	1 terzo piano
		1 basamento	1 piano rialzato
		1 basamento	1 primo piano
		4 basamento	4 piano rialzato
	n. totale prove	6 esterno	
		73	65

Tutti i dati acquisiti sono stati elaborati per il calcolo dei rapporti spettrali, HVSR, utilizzando il codice Geopsy (www.Geopsy.org). I dati sono stati processati seguendo una procedura *standard* che consiste in:

- applicazione di un filtro passa-alto ($f = 0,15$ Hz) al fine di eliminare forti segnali a bassa frequenza;
- rimozione della media;
- suddivisione della serie temporale in finestre di 30 secondi;

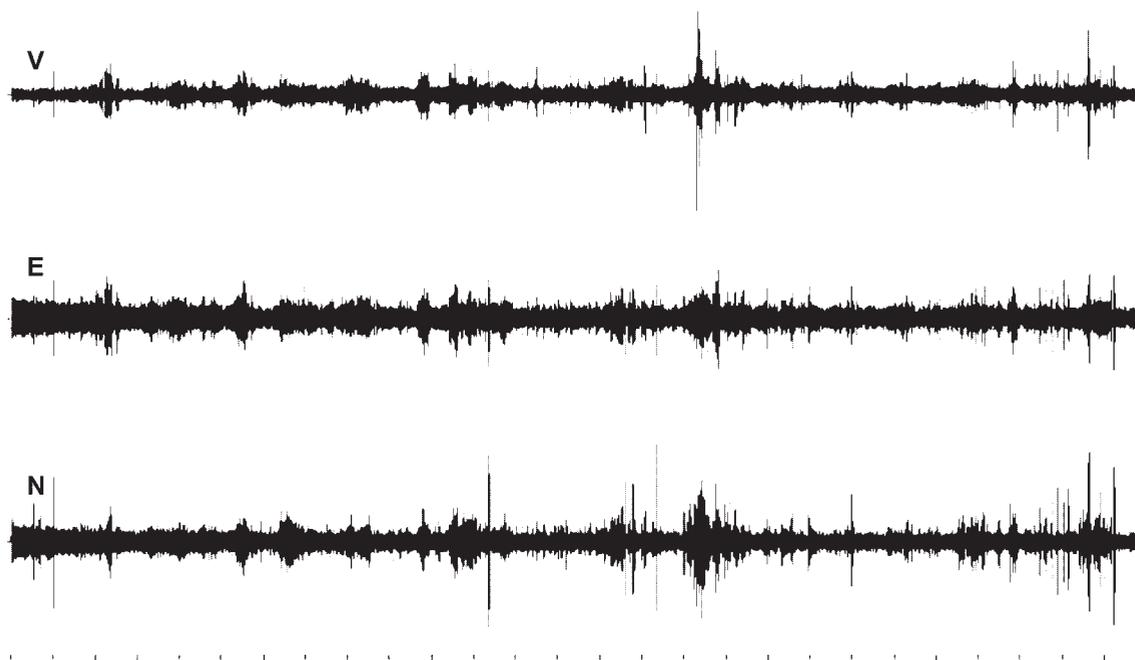


Fig. 3 - Esempio di serie temporali (in velocità mm/s) di rumore sismico ambientale registrate al primo piano dell'edificio scolastico Dante Alighieri (n. 8 in Fig. 1). La registrazione ha durata di 30 minuti.

- esclusione dei segnali transienti mediante l'utilizzo dell'algoritmo STA (1 s)/LTA (15 s) con soglia fissata a 2,5;
- calcolo dello spettro di Fourier di ciascuna componente;
- calcolo del rapporto spettrale medio (H/V);
- lisciamento della curva H/V utilizzando il metodo indicato da Konno e Ohmachi (1998);
- verifica della stabilità dei picchi spettrali mediante l'analisi della trasformata continua di Fourier di ciascuna componente.

In sintesi, i risultati ottenuti delineano la presenza di tre tipi di risposta:

- 1) un picco chiaro di frequenza di risonanza fondamentale (come in Fig. 4a),
- 2) l'assenza di un qualunque picco di risonanza (come in Fig. 4b),
- 3) un ampio picco di frequenza a banda compresa tra 5 e 10 Hz (come in Fig. 4c).

Il significato strutturale di queste risposte differenziate richiede un'analisi approfondita di natura ingegneristico-modellistica ed un'attenta analisi del materiale di costruzione e presenza e tipo di fondazione. Questi aspetti investono competenze esterne a questo gruppo di lavoro e per questo motivo i risultati sono stati resi disponibili all'amministrazione comunale; viene confermata tuttavia la necessità di caratterizzare edifici come questi costruiti probabilmente in periodi diversi.

I risultati, qui sinteticamente illustrati, confermano la capacità del metodo utilizzato di fornire informazioni utili per la determinazione della frequenza di risonanza e di individuare gli edifici che saranno candidati per il monitoraggio in continuo utilizzando gli *smart sensors* sviluppati e testati in altre attività di ricerca del progetto CLARA.

Ringraziamenti. Si ringrazia lo studente G. Alvisi per l'assistenza nella fase di acquisizione dei dati.

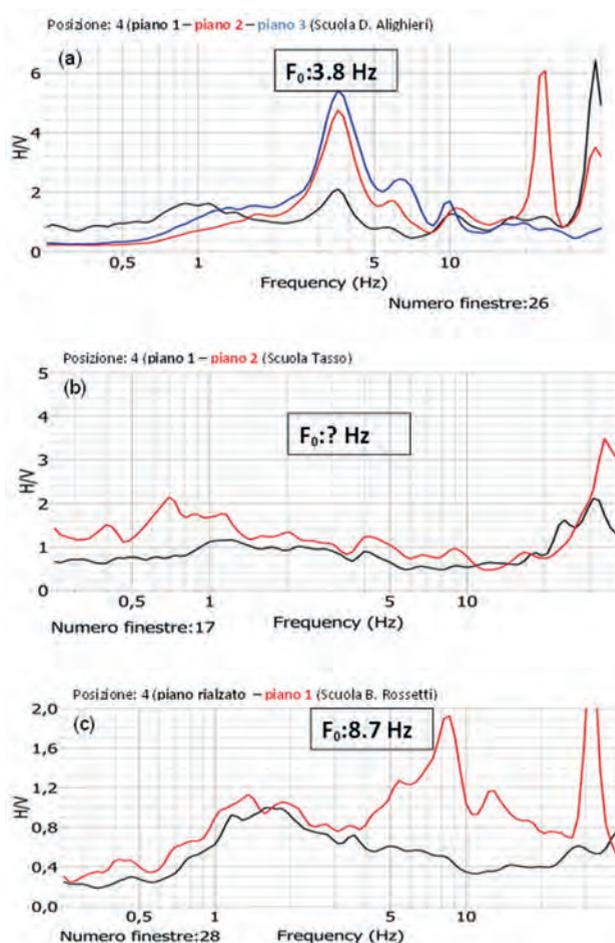


Fig. 4 - Curve medie H/V di alcune prove effettuate negli edifici scolastici a) Dante Alighieri (n. 8 in Fig. 1), b) Torquato Tasso (n. 3 in Fig. 1) e c) Biagio Rossetti (n. 9 in Fig. 1). I diversi colori delle curve corrispondono a prove a piani diversi, come indicato in legenda.

BIBLIOGRAFIA

- Abu Zeid N., Albertin F., Bignardi S., Santarato G. (2013): *Preliminary HVSR analysis in the historical centre of Ferrara, Northern Italy*. Atti del 32° Convegno Nazionale del GNGTS, Trieste 19-21/11/2013, volume 2 (Caratterizzazione sismica del territorio), pp. 167-172. ISBN 978-88-902101-7-4.
- Aki K. (1957). *Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors*. Bulletin of the Earthquake Research Institute 35, 415-457.
- Dalla Negra R., Fabbri R., Stefani M., Ambrogio K., Conforti A., Zuppiroli M. (2011). *Basic historic building in Ferrara: evaluation and strategies for urban restoration*, in A. Dolkart, O. M. Al-gohari, S. Rab (editors), Conservation of architecture, urban areas, nature and landscape. Towards a sustainable survival of cultural landscape, Proceeding of Heritage 2011 Conference (Amman, Giordania, 13-15 marzo 2011), CSAAR Press, Amman, vol. II, pp. 83-98.
- Grunthal G. (1998). *European Macroseismic Scale*, "Cahiers du Centre Européen. De Géodynamique, et de Séismologie", V. 15:1-99.
- Konno K. and Ohmachi T. (1998). *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*, Bulletin of the Seismological Society of America, 88-1, 228-241.
- Nakamura Y. and Ueno M. (1986). *Attempt to estimate the dynamic characteristics of surface layers using vertical and horizontal components of the tremor on the surface*. Proceedings of the 7th Japan Earthquake Engineering Symposium 1986, December 1986, 265-270 (in Japanese).
- Nakamura Y. (1989). *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Quarterly Report of RTRI 30(1), 25-33.
- Nakamura Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications*. The 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2656, Auckland, New Zealand, 30 January- 4 February, 2000.
- Nakamura Y. (2008). *On the HVSR Spectrum*. In The 14th World Conference on Earthquake Engineering. October 12-17, Beijing, China.

Monitoraggio delle strutture tramite tecniche topografiche innovative e tradizionali

A. PELLEGRINELLI e P. RUSSO

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

La ricerca ha riguardato lo studio e l'applicazione di strumenti topografici digitali di ultima generazione di elevata precisione metrica (stazioni totali, *laser scanner* terrestri (TLS), livelli digitali automatici, ricevitori satellitari GPS/GNSS), nell'ambito del monitoraggio di edifici/strutture e manufatti in genere. Particolare attenzione è stata dedicata all'integrazione tra le differenti strumentazioni topografiche; integrazione analizzata studiando le potenzialità degli strumenti sia in termini di precisione, sia in termini di tipologia e quantità d'informazioni deducibili dai rilievi ripetuti nel tempo.

Come "laboratorio di monitoraggio", si è scelto il "Baluardo di Sant'Antonio" (nel seguito Baluardo): un complesso monumentale di epoca medioevale facente parte della cinta muraria della città di Ferrara (Fig. 1). Si tratta di un imponente apparato difensivo che manifesta già da alcuni anni un importante quadro fessurativo e sensibili deformazioni del paramento murario (i primi rilievi sono iniziati da parte del Comune di Ferrara poco dopo gli eventi sismici che hanno interessato il territorio nel 2012). Nel caso specifico si è voluto rilevare sia la presenza di deformazioni/cedimenti localizzati (di entità di pochi mm/anno o inferiori), sia la presenza di un movimento complessivo (di roto-traslazione 3D) dell'intera struttura o di sue parti. Da qui la necessità di progettare e realizzare un sistema di monitoraggio basato sull'integrazione di diversi strumenti topografici, con rilievi ripetuti durante l'intero periodo dello studio ed anche oltre. In questo modo è stato possibile valutare le potenzialità delle diverse tecniche e della loro integrazione, ma anche le precisioni raggiungibili ed i tempi di rilievo con i diversi approcci. I



Fig. 1 - Baluardo di Sant'Antonio, parte della cinta muraria della città di Ferrara (a); dettagli delle maggiori fessurazioni presenti (b) e (c).

risultati e le conclusioni dello studio sono finalizzati, non tanto a valutare lo “stato di salute” del Baluardo monitorato, ma soprattutto all’analisi critica delle tecniche topografiche utilizzate.

2. Metodologia

Per determinare i movimenti verticali e orizzontali del Baluardo nel suo insieme o nelle sue parti, è stato istituito/utilizzato un impianto di monitoraggio “pilota”, e sono state realizzate diverse tecniche e campagne di misura descritte sinteticamente nel seguito:

- Rete di livellazione geometrica di alta precisione per la determinazione puntuale, con precisione millimetrica, della componente verticale di spostamento; tale rete è costituita da 20 caposaldi toroidali murati alla base del Baluardo (da C1 a C20 in Fig. 2) più 2 caposaldi toroidali di riferimento esterni al Baluardo (Rif1 e Rif2 in Fig. 2). La rete di caposaldi è stata materializzata e rilevata nel 2012 per conto del Comune di Ferrara. Nel presente studio sono state realizzate numerose campagne di misura con livello digitale Leica DNA03 e stadie con codice a barre su nastro in INVAR. Durante ogni ripetizione sono state eseguite misure sovrabbondanti (schemi ad anello eseguiti in andata e ritorno) elaborate tramite procedure di compensazione ai minimi quadrati, mantenendo invariato il dislivello tra i caposaldi di riferimento, e con valutazione dell’affidabilità dei risultati di ogni campagna tramite analisi di pre- e di post-compensazione. Ad ogni ripetizione sono state rispettate le norme e le indicazioni tecniche della livellazione geometrica di alta precisione. Con tale procedura, per tutti i caposaldi e per ogni campagna, è stata ottenuta la quota ed il relativo

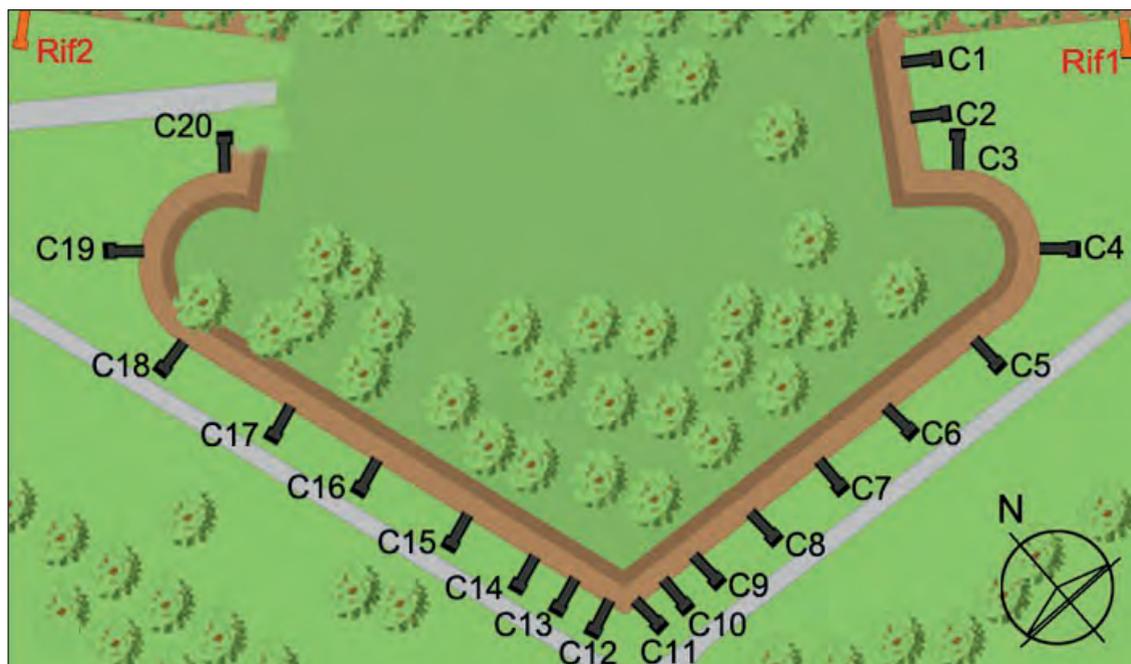


Fig. 2 - Rete di livellazione geometrica di alta precisione; schema dei caposaldi toroidali presenti alla base del Baluardo di Sant’Antonio (da C1 a C20) e dei caposaldi di riferimento (Rif1 e Rif2) esterni al Baluardo.

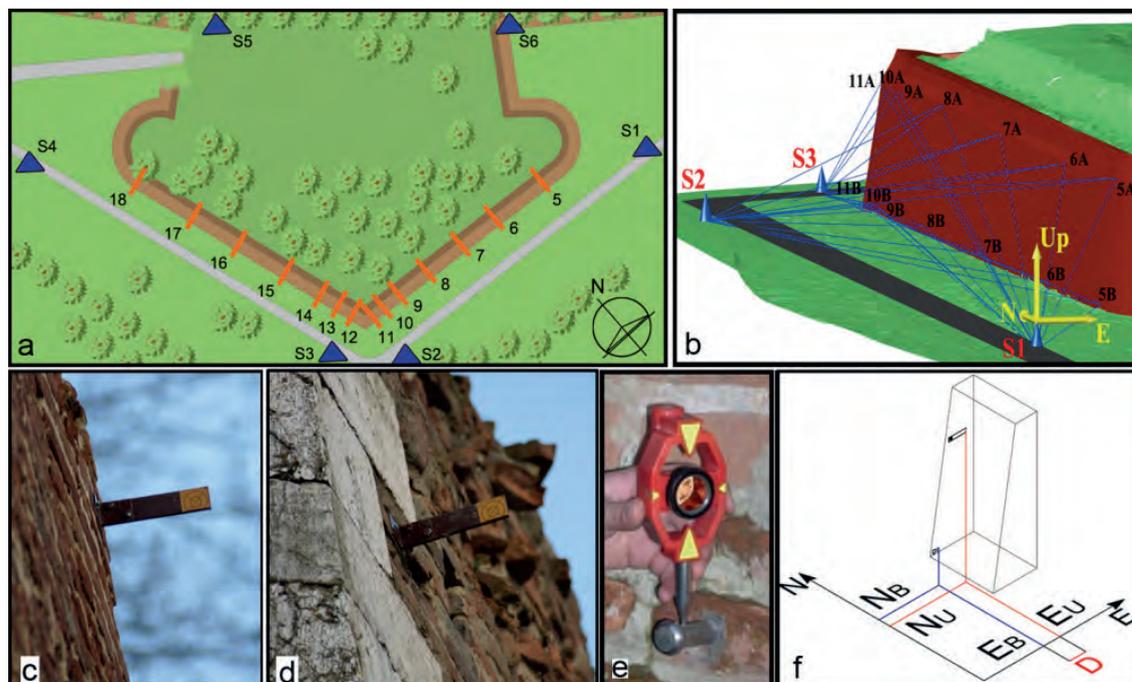


Fig. 3 - a) Schema dei punti rilevati con stazione totale (6 vertici di inquadramento da S1 a S6 e 14 mire da 5 a 18); b) schema delle misure (rilievo per polari) e sistema di riferimento locale; c) e d) mire infisse nella parte sommitale del Baluardo (a circa 5 m di altezza dal suolo); e) caposaldo rilevato tramite mini-prisma (a circa 0.5 m di altezza dal suolo); f) esempio di componente scalare monitorata nel tempo tra sommità e base del Baluardo (differenza coordinate Est).

scarto quadratico medio (sqm): l'eventuale variazione significativa di quota nel tempo rappresenta una zona di deformazione del Baluardo.

- In corrispondenza dei caposaldi dal C5 al C18, ma sulla fascia alta delle mura, sono state appositamente realizzate 14 mire su profili di acciaio infissi nel Baluardo (da 5 a 18 in Fig. 3a) con lo scopo di determinare una variazione di posizione dell'area sommitale del Baluardo rispetto alla fascia di base: mire in sommità e corrispondenti caposaldi alla base definiscono sostanzialmente una linea retta, la cui posizione può essere monitorata nel tempo; in Fig. 3f, ad esempio, si evidenzia la differenza D in componente Est tra la mira di sommità (E_U) ed il caposaldo alla base (E_B). Le mire ed i caposaldi sono stati rilevati tramite stazione totale Leica TCR802 con lo schema di rilievo per polari da due distinti punti di stazione (quindi con doppia determinazione; Fig. 3b). Le mire nella parte alta del Baluardo (Figg. 3c e 3d) sono state dotate di pellicola catarifrangente (per una più precisa misura della distanza con la stazione totale in modalità *reflectorless*), mentre i caposaldi sono stati rilevati collimando un miniprisma di volta in volta posizionato su di essi (Fig. 3e). I vertici (da S1 a S6 in Fig. 3a ed in Fig. 4a) su cui si è messo in stazione lo strumento costituiscono una rete di inquadramento, appositamente materializzata e rilevata tramite un primo rilievo di precisione eseguito con la stazione totale, con misure sovrabbondanti e compensazione ai minimi quadrati, ottenendo ellissi di errore standard sub-centimetrici (Fig. 4b). Le quote dei vertici sono state invece ottenute sempre tramite livellazione geometrica di precisione inquadrata tramite i due caposaldi di riferimento Rif1 e Rif2. Nel corso del presente studio

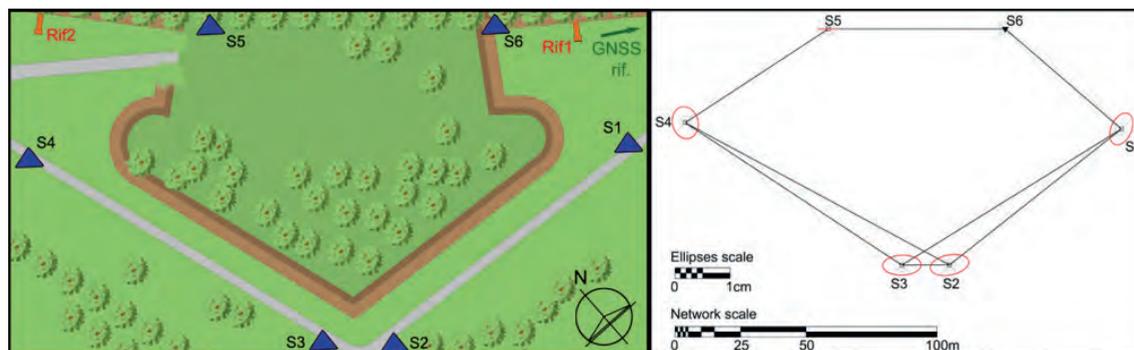


Fig. 4 - a) Posizione dei caposaldi di riferimento (Rif1, e Rif2) e vertici della rete di inquadramento (S1-S6); b) ellissi di errore standard ottenuti dalla compensazione ai minimi quadrati.

il rilievo delle 14 mire e dei caposaldi con stazione totale è stato realizzato tre volte.

- 4 punti di controllo GNSS sul coronamento (da P1 a P4 in Fig. 5a), per la valutazione dei movimenti della struttura in un sistema di riferimento globale (ETRS89-ETRF2000), più un punto esterno al Baluardo (GNSS Rif. in Fig. 5a) da utilizzare come vertice *master* (o base) di riferimento nella modalità statica di rilievo GNSS. Il rilievo GNSS è stato realizzato solo una volta nell'ambito del presente lavoro utilizzando una coppia di ricevitori GNSS geodetici a doppia frequenza, mod. Topcon GR3 (Fig. 5b), con tempi di stazionamento di 1 ora.
- Come ultimo strumento/tecnica di monitoraggio di tipo topografico, è stato utilizzato il *laser scanner* terrestre (TLS) per un rilievo complessivo 3D del Baluardo e quindi per la valutazione globale delle variazioni morfologiche del paramento murario. Il TLS utilizzato è stato il Leica P30 (Fig. 6) posto in stazione direttamente sui vertici da S1 a S6 della rete riportata in Fig. 3a (la stessa materializzata per il rilievo con la stazione totale), eseguendo da ogni punto di stazione un numero di scansioni sufficienti a rilevare l'intero Baluardo insieme ad un tratto di mura adiacente. La registrazione delle scansioni è avvenuta utilizzando direttamente le coordinate dei vertici suddetti, verificando, di volta in volta, che i residui di orientamento 3D presentassero valori di pochi mm. Con questa procedura il rilievo TLS è stato automaticamente inquadrato, già nelle fasi di campagna, nel sistema di

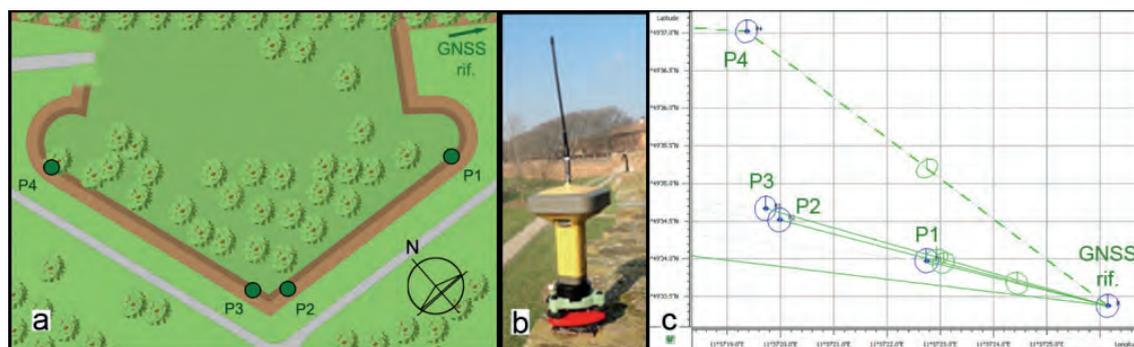


Fig. 5 - a) Vertici della rete GNSS; b) ricevitore GNSS mod. Topcon GR3; c) risultati dell'elaborazione della rete GNSS, modalità statica.

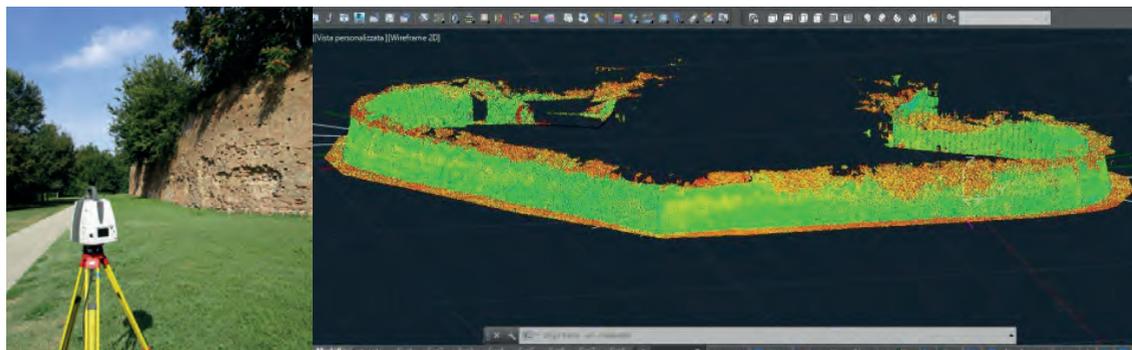


Fig. 6 - *Laser scanner* terrestre Leica P30 e modello 3D ottenuto dalla registrazione complessiva delle nuvole di punti realizzate con le scansioni *laser scanner*.

riferimento locale materializzato e rilevato con la stazione totale descritta precedentemente, agevolando in tal modo, le fasi di confronto dei risultati ottenuti. Tutte le scansioni sono state elaborate con apposito *software* 3D Leica Cyclone, tramite il quale è stato possibile gestire un unico modello globale tridimensionale visualizzato in Fig. 6; da tale modello si possono facilmente ricavare sezioni verticali del Baluardo e confrontare le stesse sezioni nel tempo (nei modelli ottenuti nei vari rilievi *laser scanner*) per evidenziare cedimenti/deformazioni nell'area del piano di sezione.

- Infine, nell'ottica dell'integrazione tra diverse strumentazioni/sensori, il Comune di Ferrara ha posizionato 4 basi deformometriche a cavallo delle lesioni principali; questi sensori, non strettamente topografici, consentono di realizzare un monitoraggio senza soluzione di continuità della larghezza delle lesioni più importanti. Allo stato attuale questi dati non sono ancora disponibili.

3. Principali risultati

Le diverse tecniche di rilievo topografico hanno permesso di individuare i cedimenti/deformazioni che hanno interessato il Baluardo di Sant'Antonio, dal primo periodo post eventi sismici del 2012 fino al settembre del 2017. La livellazione geometrica di alta precisione eseguita sulla rete di caposaldi infissi alla base del Baluardo (Fig. 2) si è dimostrata essere (come d'altronde atteso) la tecnica più affidabile e accurata, con errori di chiusura sempre di pochi millimetri ed ha permesso di mettere in evidenza cedimenti dell'ordine di 1 mm/anno. Si tratta però di una tecnica che fornisce informazioni puntuali (sul caposaldo monitorato), informazioni non sempre estendibili all'intera struttura; inoltre, può essere utilizzata solo per caposaldi accessibili con una stadia da livellazione: difficile pensare quindi al monitoraggio con livellazione geometrica per parti alte delle strutture come la sommità del Baluardo. Per queste ragioni sono state realizzate ed installate apposite mire nella fascia sommitale del Baluardo, mire rilevate con la stazione totale tramite la tecnica del rilievo per polari. Purtroppo, nonostante gli strumenti di alta precisione utilizzati e la massima attenzione durante le fasi operative, la sovrabbondanza delle misure e la loro ripetizione nel tempo hanno mostrato un'accuratezza di rilievo ritenuta insufficiente (differenze di 1-2 cm). Questo risultato è molto probabilmente da attribuire da un lato alla difficoltà di mettere

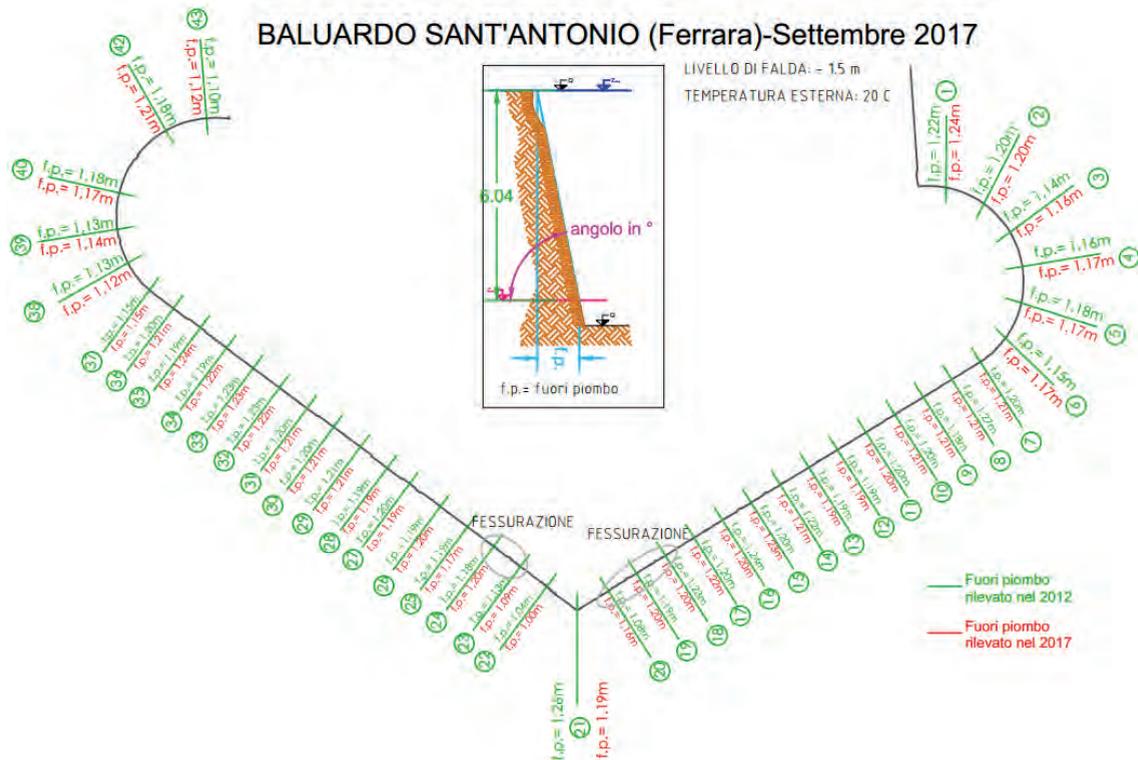


Fig. 7 - Analisi dei “fuori piombo” (f.p.) ottenuti dai rilievi *laser scanner* del 2017 (in rosso) e del 2012 (in verde): una diminuzione dei valori di fuori piombo segnala una rotazione verso l’esterno mura della corrispondente porzione di Baluardo.

in stazione lo strumento con errore millimetrico e dall’altro alle imprecisioni di determinazione delle coordinate del *target* catarifrangente incollato alle mire (Figg. 3c e 3d). Per risolvere queste problematiche sarebbe necessario realizzare dei pilastri con centramento forzato dello strumento (per eliminare l’errore di messa in stazione) e sostituire le mire con dei miniprismi “a perdere” da installare permanentemente nei punti da monitorare (l’errore di collimazione del centro dei miniprismi e la misura elettronica della distanza strumento-prisma risulterebbero migliori).

Per il monitoraggio della parte sommitale del Baluardo, invece, o comunque per monitorare con buona precisione un manufatto nel suo insieme (al posto di un monitoraggio puntuale), è risultato molto attendibile il rilievo realizzato con il *laser scanner* terrestre nelle modalità descritte e la sua ripetizione nel tempo. Sezionando infatti con lo stesso piano verticale i modelli ottenuti con il *laser scanner* terrestre in due o più epoche successive è stato possibile valutare la presenza di movimenti in atto in specifiche zone del Baluardo. Un parametro che può ad esempio essere utilizzato in questo caso è il fuori piombo ricavato dalla sezione verticale (f.p. in Fig. 7): una variazione significativa del fuori piombo nel tempo rileva un cedimento/movimento della struttura in corrispondenza della sezione stessa. In Fig. 7 si riportano i valori dei fuori piombo rilevati in corrispondenza di 43 sezioni verticali ottenute nel rilievo *laser scanner* del 2012 (eseguito per conto del Comune di Ferrara) e nell’ultimo rilievo del 2017. Una diminuzione del valore dei fuori piombo evidenzia una rotazione del Baluardo verso l’esterno delle mura spiegabile con una spinta della parte superiore del terreno e delle piante contenute all’interno del Baluardo. I valori

maggiori sono stati rilevati tra le sezioni 18 e 24 di Fig. 7, che in effetti corrispondono alla “punta” del Baluardo dove si evidenziano anche le maggiori fessurazioni. Per quello che riguarda il rilievo GNSS, come si è detto, al momento è stata realizzata una sola campagna di misura (“rilievo di zero”). Successive campagne di rilievo potranno consentire di valutare con precisione l’eventuale presenza di movimenti dell’intero baluardo dovuto, ad esempio, a fenomeni di subsidenza locale.

4. Conclusioni

La ricerca realizzata ha permesso di studiare le potenzialità degli strumenti topografici di elevata precisione (tradizionali ed innovativi) nel monitoraggio di un manufatto soggetto a cedimenti/deformazioni. I risultati, per quanto non possano essere considerati del tutto esaustivi, sono di sicuro interesse, in quanto forniscono importanti indicazioni su tipologia di strumenti e tecniche topografiche di monitoraggio utilizzare in casi analoghi al Baluardo di Sant’Antonio parte delle mura antiche della città di Ferrara. Livellazione geometrica di alta precisione e *laser scanner* terrestri con punti di scansione di coordinate note (in un opportuno sistema di riferimento locale) sono risultate le tecniche che, se integrate, consentono di ottenere le principali informazioni riguardanti gli eventuali fenomeni deformativi e di movimento in atto.

BIBLIOGRAFIA

- Beraldin J.A., 2004, *Integration of laser scanning and close-range photogrammetry: the last decade and beyond*, Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Vol. 35, part B, Istanbul, Turkey, 972-983.
- Guarnieri A., Milan N., Vettore A., 2013, *Monitoring of Complex Structure for Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (TLS) and Photogrammetry*, International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis and Restoration, 7:1, 54-67.
- Park H.S., Lee H.M., Adeli H., 2007, *A new approach to health monitoring of structures: terrestrial laser scanning*, Computer-Aided Civil Infrastructure Eng. 22 (1), 19-30.
- Pellegrinelli A., Furini A., Russo P., 2014, *Earthquakes and ancient leaning towers: Geodetic monitoring of the bell tower of San Benedetto Church in Ferrara (Italy)*, Journal of Cultural Heritage, DOI: 10.1016/j.culher.2013.12.005.
- Scognamiglio L., Margheriti L., Mele F.M., Tinti E., Bono A., De Gori P., Lauciani V., Lucente F.P., Mandiello A.G., Marocci C., Mazza S., Pintore S., Quintiliani M., 2012, *The 2012 Pianura Padana Emiliana seismic sequence: locations. Moment tensors and magnitudes*, Annals of Geophysics, 55, 4, 549-559, doi: 10.4401/ag-6159.

Miglioramento del monitoraggio sismico nell'area di Ferrara

P. MARI¹, M. CINCI², R. CAPUTO³ e N. ABU ZEID³

¹ HERA S.p.A., Bologna

² ENEL Green Power S.p.A., Roma

³ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Introduzione

Secondo le Linee Guida del Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE, Roma, 2015), è previsto che le reti di monitoraggio microsismico da realizzarsi nell'intorno delle concessioni minerarie (che comprendono in una fase sperimentale iniziale anche quelle geotermiche), definiscano un Dominio interno (DI) e un Dominio esteso (DE) di rilevazione rispetto al pozzo di reiniezione di Casaglia_01 (Fig. 1). Il primo "definisce il volume all'interno del quale si ritiene che possano verificarsi fenomeni di sismicità indotta o di deformazione del suolo associati all'attività svolta. Esso rappresenta il volume di riferimento per il quale saranno identificati, monitorati e analizzati con la massima sensibilità eventuali fenomeni di sismicità e deformazione del suolo". Nei giacimenti in cui è prevista la reiniezione di fluidi, come nel caso di Casaglia, "tale fascia si estende fino a 5 km dal giacimento stesso".

Sempre secondo le Linee Guida, il Dominio Esteso di rilevazione (DE), invece, "è il volume circostante il dominio interno di rilevazione che comprende una porzione maggiore di crosta terrestre, al fine di definire e contestualizzare al meglio i fenomeni monitorati. Per tutte le attività si suggerisce che esso si estenda oltre il dominio interno di rilevazione per una fascia di ampiezza compresa tra 5-10 km, tenendo conto delle dimensioni del giacimento e tipologia di attività".

Nell'ambito del Progetto CLARA ed in particolare delle attività dell'Obiettivo Realizzativo 4, il gruppo di lavoro si è concentrato sull'analisi topologica sia della rete sismometrica esistente che quella da sviluppare nell'area di Ferrara per il monitoraggio microsismico della concessione mineraria di Casaglia. Si è quindi proceduto a definire le attività necessarie per l'integrazione e l'adeguamento della rete per incrementarne le caratteristiche funzionali con un aumento della sensibilità e della copertura volumetrica (Fig. 1). Contestualmente, sono state messe a punto delle proposte di modifiche migliorative specifiche per ognuna delle stazioni in termini di caratteristiche geologiche e geofisiche al sito, di aspetti logistici e amministrativi, nonché per quanto riguarda le caratteristiche tecniche della nuova strumentazione da installare. Fine ultimo è quello di contribuire al miglioramento del monitoraggio microsismico nell'area di Ferrara con l'intenzione di mitigare l'eventuale incremento di pericolosità sismica locale.

2. Proposte di modifica

I numerosi sopralluoghi svolti e le indagini preliminari descritte nella nota 3.9 hanno consentito di definire le attività necessarie per il cosiddetto *revamping* delle stazioni esistenti e la scelta dell'ubicazione di due nuove stazioni. In sintesi, le stazioni esistenti dell'attuale rete microsismica necessitano le seguenti attività:

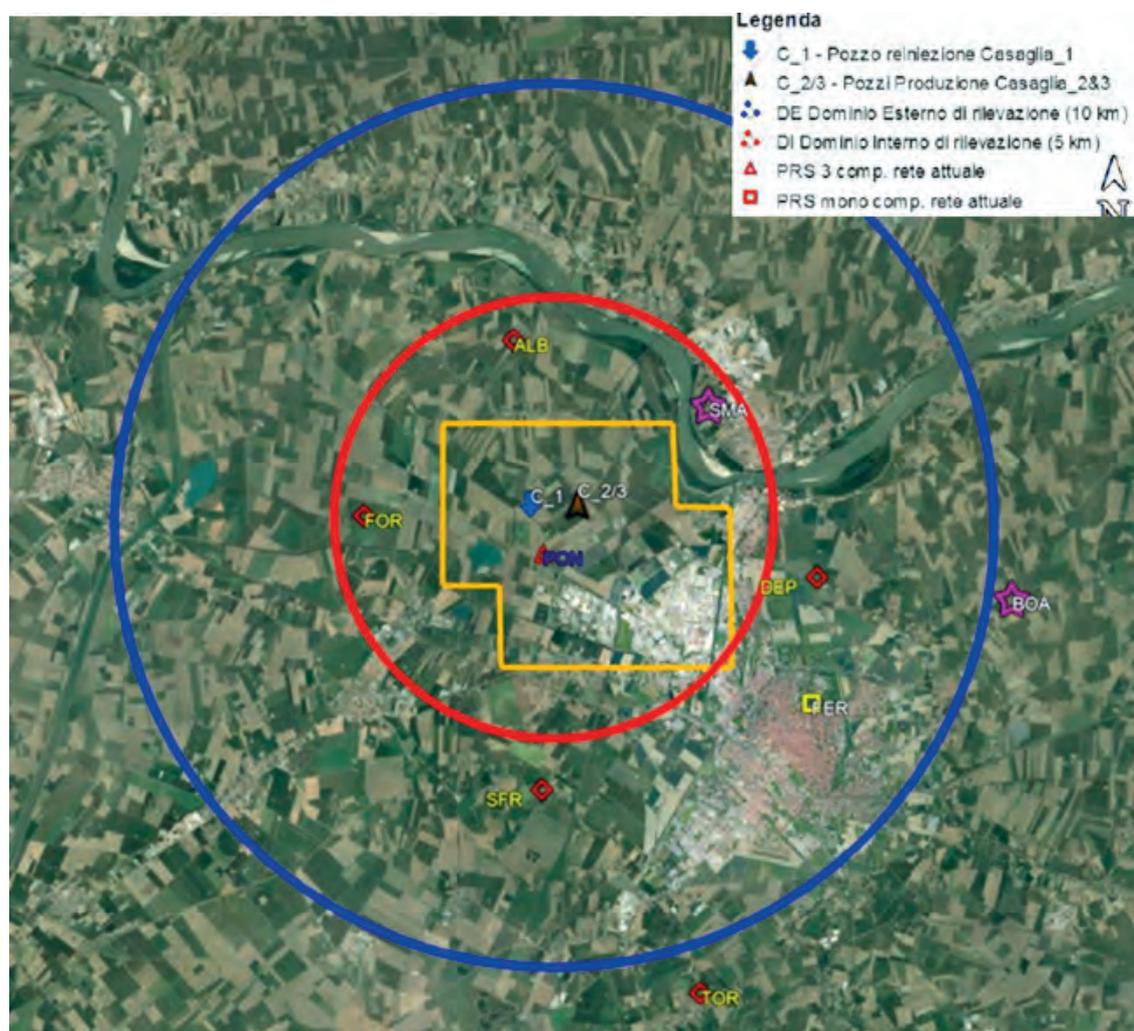


Fig. 1 - Integrazione e adeguamento della rete microsismica esistente. Il poligono arancione indica la concessione mineraria "Casaglia"; i cerchi rosso e blu, di raggio pari a 5 e 10 km rispettivamente, rappresentano il cosiddetto "Dominio interno di rilevazione" ed il "Dominio esteso di rilevazione" previsti nelle Linee Guida del Ministero dello Sviluppo Economico, 2015. Rombi: stazioni esistenti della rete microsismica NetFer02. Stelle e quadrati: siti ipotizzati per le nuove stazioni.

DEP: a causa dell'eccessivo rumore di fondo generato dalle attività del vicino depuratore, che di fatto riduce la capacità di rilevare eventi sismici con magnitudo inferiore a 1,5, la stazione dovrà essere smantellata in quanto anche un possibile approfondimento del pozzo per posizionare il sismometro non porterebbe ragionevolmente ad un sensibile miglioramento; la stazione andrà quindi sostituita con una nuova presso Boara (BOA) o Santa Maria Maddalena (SMA) (Fig. 1).

TOR: nonostante sia la stazione con il sismometro più profondo, anche questa stazione necessita dell'approfondimento del pozzo in concomitanza dell'installazione del nuovo sismometro a 3 componenti a fondo foro; anche la strumentazione di superficie dovrà essere spostata in nuovo cabinet con il conseguente prolungamento di ulteriori 25 m del cavidotto di alimentazione; dovrà inoltre essere realizzato l'alloggiamento per l'accelerometro triassiale che sarà posto in superficie

e la maglia di messa a terra; la nuova *location* della stazione dovrà poi essere opportunamente recintata.

SFR: in occasione dell'approfondimento del pozzo per l'installazione a fondo foro del nuovo sismometro a 3 componenti, e della realizzazione dell'alloggiamento per l'accelerometro che sarà posto in superficie, si dovrà effettuare lo spostamento di tutta la strumentazione di acquisizione e trasmissione dati, che attualmente è posta all'interno della scuola, ed il suo collocamento in un cabinet esterno dedicato; di conseguenza, si potrà utilizzare il cavidotto esistente per portare l'alimentazione a 24 VDC direttamente dall'impianto della scuola al cabinet.

PON: in conseguenza delle criticità soprattutto logistiche e di contesto locale messe in evidenza (ved. nota 3.9), si suggerisce lo smantellamento della stazione e la sua sostituzione con una nuova da costruire nell'area del pozzo Casaglia_01, poco distante dalla posizione originale.

ALB: l'analisi ha messo in evidenza la necessità di spostare la stazione di almeno 50 m all'interno della stessa proprietà; per effettuare la perforazione per alloggiamento del nuovo sismometro a 3 componenti sarà quindi necessaria la richiesta di autorizzazione ad ARPAE; andrà quindi predisposta l'area anche per la realizzazione di un pozzetto in superficie per alloggiare l'accelerometro triassiale e l'installazione di nuovo cabinet per l'alloggiamento della strumentazione di acquisizione e trasmissione dati; la nuova posizione necessiterà anche di una fornitura elettrica dedicata i cui collegamenti dovranno essere realizzati *ad hoc*, similmente alla maglia di messa a terra; l'area andrà poi opportunamente recintata.

FOR: anche questa stazione necessita la perforazione di un nuovo pozzo per l'alloggiamento a profondità maggiore del sismometro a 3 componenti e, di conseguenza, di attivare la procedura autorizzativa presso ARPAE; la presenza in prossimità di un palo della luce con già altre utenze collegate, suggerisce di realizzare un fornitura elettrica dedicata associando una maglia di messa a terra; con l'occasione, dovrà essere installato un nuovo cabinet per contenere la strumentazione di acquisizione e trasmissione dati, attualmente posta in armadio a parete della vicina casa colonica; tutta l'area andrà poi opportunamente recintata.

Come già anticipato, al fine di ampliare la rete sismometrica e di sostituire la stazione DEP risultata troppo rumorosa, è prevista la creazione di due nuove stazioni:

FER: tra i nuovi siti dove localizzare nuove Postazioni di Rilevamento Sismico (PRS) della rete microsismica è stato individuato il Parco Massari per la sua posizione nel centro cittadino e per la scarsa presenza di traffico soprattutto nel suo settore nord-orientale confinante con il cimitero; vi sono in predicato due aree principale, nell'angolo a nord-est e circa 100 m più a sud, in prossimità del muro di recinzione su via Borso; in tutti i casi, oltre alla richiesta di autorizzazione alla perforazione da sottomettere ad ARPAE, sarà necessaria l'autorizzazione della Sovrintendenza ai Beni Culturali; per verificare l'eventuale presenza di manufatti nei primi metri di sottosuolo, la perforazione dovrà essere effettuata a carotaggio continuo nei primi 10 m e necessiterà della presenza in cantiere di un archeologo; in base alla scelta finale del sito, sarà necessario realizzare un cavidotto di collegamento con la cabina elettrica di HERA già presente all'interno del parco; in prossimità della testa foro, andrà creato l'alloggiamento per l'accelerometro triassiale e tutta la strumentazione per l'acquisizione e trasmissione dati andrà poi collocata in un cabinet dedicato, l'area opportunamente recintata e, visto il contesto particolare, anche mascherata alla vista dei fruitori del parco.

BOA: la ricerca di possibili siti alternativi ha portato all'individuazione del parco pubblico

della frazione di Boara, in prossimità della scuola elementare; per effettuare la perforazione per l'alloggiamento a fondo foro del nuovo sismometro a 3 componenti, sarà quindi necessario richiedere l'autorizzazione ad ARPAE; per alimentare elettricamente la stazione, bisognerà fare richiesta per una fornitura dedicata, con la realizzazione del relativo cavidotto e della maglia di messa a terra; si procederà quindi alla creazione dell'alloggiamento, in superficie, per l'accelerometro triassiale e all'installazione di un nuovo *cabinet* per contenere la strumentazione di acquisizione e trasmissione dati; tutta l'area andrà poi recintata per impedirne l'accesso ai non addetti;

SMA: una seconda possibile alternativa alla stazione DEP, da smantellare, è stata individuata in prossimità del muro perimetrale del cimitero di Santa Maria Maddalena (RO); le attività da svolgere per la creazione di questa stazione sono ovviamente le stesse descritte per la possibile stazione BOA.

Alcune considerazioni sulla scelta fra BOA e SMA come siti alternativi alla stazione DEP: se si adottasse la prima ipotesi (BOA), la capacità dell'intera rete sismometrica di detezione di eventi caratterizzati da piccola magnitudo verrebbe ridotta in quanto BOA va a cadere sul cerchio del Dominio Esteso, quindi a 10 km dal baricentro delle operazioni minerarie che si vogliono monitorare. Al contrario, l'ipotesi SMA aggiungerebbe una stazione nel Dominio Interno ($R = 5$ km) e permetterebbe di chiudere la geometria più interna realizzando una rete con stazioni caratterizzate da una interdistanza di 5-6 km migliorando così la capacità di detezione della stessa.

3. Profondità dei sensori

Per un'efficiente riduzione del rumore antropico, anche per le stazioni esistenti, sarà necessario realizzare pozzi, per l'alloggiamento a fondo foro dei nuovi sismometri 3D, con profondità non inferiore a 80 m che può essere spinta fino a 150 m dal piano campagna in funzione del livello del rumore sismico di ciascuno dei siti PRS. Tutti i pozzi dovranno essere ovviamente completati con *casing* in PVC o acciaio cementati e realizzati in maniera tale da renderli impermeabile alle infiltrazioni di acqua delle diverse falde presenti, attraverso la sigillatura della filettatura delle barre dei tubi del rivestimento e l'utilizzo di un tappo sul fondo. Tale conformazione del pozzo utilizzerà le migliori tecnologie che, in questo caso, sono necessarie al fine di garantire che il pozzo stesso sia "resistente" alle infiltrazioni d'acqua per non compromettere la strumentazione. I sensori della rete NetFer02, attualmente in funzione, sono tutti posti su base solida all'interno di tubi in teflon riempiti di sabbia poi fissati a fondo pozzo. Inoltre, questo accorgimento permetterà anche di isolare eventuali singoli acquiferi incontrati durante la perforazione evitando così di metterle in comunicazione fra loro.

La scelta effettiva della profondità di ogni singolo pozzo dipende da numerosi fattori tra i quali la distanza da sorgenti di rumore antropico e la velocità del vento sono quelli che principalmente determinano la profondità del sensore. Esperienze avute nella ricerca della riduzione del rumore antropico attraverso l'installazione di sismometri in pozzo suggeriscono che in territori caratterizzati da spesse coltri di sedimenti incoerenti, oltre una certa profondità la riduzione del rumore sismico ambientale risulta praticamente insignificante (Wilmore, 1979). Il problema del rumore sismico generato dal vento dipende dalla velocità in superficie e può costituire un

problema quando supera 3-4 m/s (Withers *et al.*, 1996). A Ferrara la velocità media del vento oscilla tra 2 e 5 m/s quindi la profondità minima di 80 m è lontana dall'essere influenzata dal rumore generato dal vento.

È noto da esperienze pregresse di alcuni fornitori che, in condizioni stratigrafiche e geologiche simili a quelle di Ferrara, ossia una successione sedimentaria di sabbie e argille, la riduzione del rumore che si potrebbe ottenere con un approfondimento del pozzo oltre gli 80-85 m dal piano campagna diventerebbe ininfluenza (~10%).

In altri termini, andrà quindi valutata attentamente, sito per sito, la profondità ottimale da raggiungere in funzione del livello di rumore sismico misurato a diverse profondità rispetto a quello misurato in superficie. Queste eventuali prove possono essere effettuate con strumentazione da calare in pozzo a diverse profondità sfruttando il *casing* del rivestimento temporaneo che viene utilizzato durante la perforazione del pozzo.

Altro accorgimento tecnico che dovrà essere messo in atto per minimizzare il verificarsi delle cosiddette onde "di tubo", caratteristiche nella trasmissione elastica delle tubazioni, è la costruzione di un avampozzo (fra 5 e 10 m di profondità) di diametro maggiore rispetto a quello necessario per il sismometro, completo di tubazione, all'interno del quale sarà costruito il pozzetto vero e proprio con il *casing* per il sismometro. Al termine delle fasi di perforazione, l'intercapedine fra i due *casing* sarà riempita con ghiaietto sciolto in modo da assorbire le onde superficiali ed evitare la trasmissione delle onde "di tubo".

L'eventuale cementazione, se realizzabile data la presenza di importanti circolazione idriche, riguarderà solo i primi 25-30 m dal fondo del pozzo.

4. Trasmissione del segnale

Durante i sopralluoghi delle stazioni esistenti e delle possibili stazioni aggiuntive e al fine di valutare opportunamente la qualità di trasmissione dei dati attraverso la rete 3G e 4G, sono state effettuate diverse misure di campo mediante uno smartphone con SIM del gestore TIM. I risultati di questo tipo di analisi sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 - Potenza del segnale di trasmissione alle stazioni della rete sismometrica.

SITO	CAMPO 3G	CAMPO 4G
DEP	-87 dB	-92 dB
TOR	-85 dB	-99 dB
SFR	-93 dB	-105 dB
PON	-93 dB	-105 dB
ALB	-79 dB	-94 dB
FOR	-89 dB	-105 dB
FER	-87 dB	-105 dB
BOA	-93 dB	-103 dB
FRA	-65 dB	-78 dB
SMA	-79 dB	-89 dB

Considerando che in tutte le nuove stazioni sismometriche saranno implementate antenne ad alto guadagno, che permettono di incrementare anche di 6-8 dB il segnale, non esistono criticità particolari per l'aspetto legato alla trasmissione dei dati dalle stazioni alla centrale.

5. Caratteristiche della nuova strumentazione

In ognuna delle stazioni, sia esistenti che di nuova creazione, ad eccezione della stazione PON, saranno installati, due sensori entrambi tri-assiali: il primo, un sismometro Borehole, sarà caratterizzato da un'elevata sensibilità grazie alla sua frequenza propria di 1 Hz; il secondo, invece è un accelerometro, avrà un'elevata capacità dinamica. Inoltre, Si prevede di installare presso la stazione PON un sensore a banda estesa o larga (periodo proprio $T \geq 20$ s, e frequenza massima di campionamento non inferiore a 125 Hz) oltre ad un accelerometro.

Per quanto riguarda l'acquisizione del segnale da entrambi i sensori, essa avverrà in continuo, con frequenza di campionamento dei dati non inferiore a 250 Hz e a 150 Hz, rispettivamente per i sismometri in pozzo e per gli accelerometri.

L'apparato di acquisizione sarà dotato di un sistema di temporizzazione di elevata precisione, basato su tecnologia GPS, per consentire la stima corretta dei tempi di arrivo delle fasi e l'integrazione con le altre reti esistenti.

Proprio al fine di garantire la trasmissione corretta dei dati, entrambi i sensori saranno collegati ad un digitalizzatore con convertitore A/D a 24 bit a 6 canali, con antenna GPS per la sincronizzazione del tempo e con la possibilità di trasmettere dati nel formato *miniSEED* (*formato ridotto di SEED-Standard for the Exchange of Earthquake Data*). Inoltre, per garantire la disponibilità dei dati anche in caso di eventuali guasti dell'apparato di teletrasmissione, i digitalizzatori avranno la capacità di registrare in locale almeno per un mese di dati permettendo così il recupero in sito degli stessi o il recupero dei dati in differita.

I sistemi di trasmissione dati dovranno essere auspicabilmente a doppio canale per assicurare la ridondanza in caso di guasti o anomalie ad una rete di trasmissione telefonica, Il segnale sarà trasmesso in tempo "quasi-reale" al centro di controllo presso la sede della Struttura Preposta al Monitoraggio (come previsto dalle Linee Guida del Ministero dello Sviluppo Economico). Tale struttura, che dovrà essere "costituita da una o più Università o Enti di ricerca di comprovate competenze in materia, eventualmente in consorzio tra loro, o anche con strutture private", curerà l'analisi della qualità dei dati, l'archiviazione in continuo delle forme d'onda, in modo da garantire l'integrità, la continuità e la sicurezza del dato. Per opportuna completezza e ridondanza nell'archiviazione e nell'analisi dei dati, il segnale sarà trasmesso anche al centro di controllo presso i Laboratori di Larderello di ENEL Green Power.

BIBLIOGRAFIA

- Wilmore P.L. (Ed.), 1979. *Manual of seismological observatory practice*, World data Center, Report SE-20. US Department of Commerce, NOAA, Boulder, CO.
- Withers M.M., Aster R.C., Young C.J., Chael E.P., 1996. *High frequency analysis of seismic background noise as a function of wind speed and shallow depth*. Bull. Seismol. Soc. Am. Vol. 86 (5): 1507-1515.

Un approccio innovativo per una migliore comprensione dell'interazione sismica tra suolo e strutture: il *test site* di Ferrara

B. PETROVIC¹, S. PAROLAI¹, M. ROMANELLI¹, A. AFFATATO¹, L. PETRONIO¹,
A. BARBAGALLO¹, D. SORGO¹, M. STEFANI² e R. CAPUTO³

¹ OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

² Dipartimento di Architettura, Università degli Studi di Ferrara

³ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

1. Scopo della ricerca

La presenza di faglie sismogeniche o potenzialmente tali implica in molte regioni del Mediterraneo un'elevata pericolosità sismica, che combinata all'esposizione e alla vulnerabilità degli edifici esistenti, concorre ad aumentare il rischio sismico e le perdite attese. Ciononostante, il miglioramento della pianificazione urbana basato su una stima robusta del rischio sismico a lungo periodo consente una sua mitigazione. In particolare, la pianificazione può essere significativamente migliorata tenendo conto della variabilità dello scuotimento del terreno a brevi distanze durante un terremoto, principalmente a causa delle variazioni delle caratteristiche meccaniche del sottosuolo. Per tale motivo, la maggior parte degli studi sulla variabilità locale dello scuotimento del suolo si è focalizzata sugli effetti sul campo d'onda dovuti a cambiamenti nelle proprietà fisiche dei corpi geologici superficiali (effetti di sito). Tuttavia, anche le interazioni tra singolo edificio e sottosuolo (interazione suolo-struttura), in termini di propagazione delle onde sismiche, possono modificare lo scuotimento del terreno stesso. L'edificio non si comporta quindi solo come un recettore passivo di vibrazioni, ma influenza esso stesso la vibrazione del terreno sottostante. Nelle aree urbane, queste interazioni si estendono alle interazioni tra un intero tessuto urbano ed il suolo, che vengono definite interazioni sito-città. Tali interazioni hanno molto probabilmente giocato un ruolo importante nella distribuzione del danno di eventi sismici passati. Ad esempio, la distribuzione del danneggiamento causato dal terremoto di *Ciudad de Mexico* nel 1985 non può essere spiegata solo considerando gli effetti di sito, ma viene meglio riprodotta da modelli che considerano l'interazione sito-città (p. es., Wirgin and Bard 1996; Guéguen *et al.*, 2000a). Siccome le interazioni tra edificio e suolo e tra sito e città non sono ancora state studiate in dettaglio e del tutto comprese, non vengono considerate né dai metodi convenzionali di progettazione strutturale, né nella valutazione del rischio sismico.

Gli effetti di interazione suolo-struttura e soprattutto di interazione sito-città sono stati principalmente studiati mediante simulazioni numeriche 2D e 3D (p. es., Kham *et al.*, 2006; Laurenzano *et al.*, 2010). La modellazione numerica consente di prevedere il movimento del suolo associato ad una ipotetica configurazione di geometrie e proprietà elastiche del dominio spaziale. Tuttavia, la modellazione numerica di questi effetti, sino ad oggi, ha solo utilizzato configurazioni semplificate e non è supportata da un confronto tra il campo d'onda sismico previsto e quello realmente osservato nelle vicinanze di un edificio, di diversi edifici o anche di un'intera città. Manca quindi un raffronto fra la modellazione numerica e le misure acquisite su casi concreti di interazione tra corpi geologici e strutture antropiche. Per tale motivo, i risultati di questi studi numerici non hanno fornito una chiara ed univoca spiegazione delle osservazioni empiriche. In

alcuni casi, essi hanno suggerito un aumento dello scuotimento nelle aree urbane dovuto alla presenza degli edifici e al loro accoppiamento con la struttura geologica superficiale, mentre in altri hanno proposto una diminuzione dello scuotimento dovuta all'effetto di smorzamento causato dalle strutture stesse (p. es., Gueguen *et al.*, 2002; Kham *et al.*, 2006).

Chiaramente, è necessario un esperimento che consenta la validazione dei modelli numerici attraverso il confronto con dati empirici, anche in presenza di ovvie difficoltà operative. L'analisi di tali dati può fornire informazioni nuove sul meccanismo di rilascio di onde sismiche da parte delle strutture e sui meccanismi di interazione struttura-suolo.

Su questo argomento, negli ultimi decenni, è stato realizzato solo un numero molto limitato di analisi basate su serie di dati empirici (p. es., Jennings, 1970; Kanamori *et al.*, 1991; Guéguen *et al.*, 2000b). Tuttavia, tali studi hanno evidenziato come alberi ed edifici, possano, a causa della loro oscillazione, modificare in modo significativo lo scuotimento del terreno (ad esempio Petrovic e Parolai, 2016; Petrovic *et al.*, 2018; Colombi *et al.*, 2016; Roux *et al.*, 2018). Un primo passo nello studio delle interazioni tra i singoli edifici e sottosuolo è stato fatto da Petrovic e Parolai (2016), i quali, utilizzando registrazioni di vibrazioni sismiche effettuate simultaneamente su un edificio e in un *array* verticale di sensori installati in foro, hanno potuto identificare le onde generate dall'edificio nel sottosuolo, fino a profondità di maggiori del centinaio di metri. La metodologia proposta è stata applicata a tre diversi contesti caratterizzati da diversi contrasti di impedenza fra suolo e struttura (Petrovic *et al.*, 2018), che hanno evidenziato come il meccanismo possa variare in condizioni differenti.

I recenti progressi nella strumentazione sismica e l'aumento della capacità computazionale rendono possibile effettuare esperimenti adeguati allo studio dei fenomeni di interazione suolo-struttura e dell'interazione sito-città, combinando l'analisi di dati empirici con quelli ottenuti da simulazioni numeriche. Grazie all'attuale disponibilità di strumentazione sismica a basso costo, ma di qualità sufficiente per l'applicazione a questi studi, è possibile realizzare installazioni di *array* sismici molto densi, sia sulla superficie terrestre che all'interno degli edifici, in modo da monitorare la propagazione e la variazione delle onde sismiche in aree urbane. Un ulteriore passo in avanti finalizzato al miglioramento della comprensione delle interazioni tra edifici e struttura del suolo e sottosuolo mediante l'utilizzo di dati empirici è stato realizzato nell'ambito del progetto CLARA e verrà illustrato in questa breve nota.

2. Sito di studio e impostazione dell'esperimento

Nel Comune di Ferrara (Fig. 1), è stato effettuato un esperimento innovativo per analizzare l'interazione suolo-struttura. Il *test site* selezionato risulta ideale allo scopo, grazie alla buona conoscenza del contesto geologico-stratigrafico ed alla semplicità della logistica: tre edifici simili per tipologia ed età di costruzione, situati in prossimità del campo di atletica di via Porta Catena a Ferrara. I primi 12 m di sottosuolo sono formati da argille oloceniche di piana interalvea; fra 12 e 25 m vi sono sabbie medio-grossolane, legate all'ultima glaciazione, fra 25 e 55 m si trovano fanghi continentali, contenenti corpi sabbiosi di canale fluviale. (Affatato *et al.*, 2019). I tre edifici considerati sono condomini, con 5 piani fuori terra e seminterrato, con struttura a telaio portante in cemento armato, tamponamenti in laterizio pieno o forato e copertura piana a terrazza, costruiti negli anni '60. Tale tipologia edilizia molto comune nell'area urbana di Ferrara, così come in gran



Fig. 1 - Set-up dell'esperimento sull'interazione suolo-struttura effettuato a Ferrara. I triangoli rossi rappresentano i sensori sismici che sono stati installati nell'edificio, i triangoli gialli quelli che sono stati installati sul campo di atletica.

parte della Pianura Padano-Veneta e dell'Italia, favorisce l'applicazione dei risultati qui ottenuti ad altri analoghi contesti geologico-costruttivi. La vicinanza e la disponibilità del campo sportivo di proprietà comunale, inoltre, ha consentito l'installazione di un grande numero di sensori su una superficie piana e libera da ostacoli. Si è quindi potuto studiare sia la propagazione delle onde sismiche nel sito, sia la struttura del sottosuolo, applicando metodi geofisici *ad hoc*, come la



Fig. 2 - Test site dell'esperimento interazione suolo-struttura previsto a Matera.

sismica a riflessione ad alta risoluzione. Per ragioni amministrative, non è stato possibile installare i sensori in tutti e tre gli edifici, come inizialmente previsto, ma solo nei due edifici esterni. Un secondo esperimento simile è previsto nel Comune di Matera, dove è presente anche lì un campo sportivo contiguo ad un condominio in cemento armato, ma in diverso contesto geologico caratterizzato da un sottosuolo carbonatico rigido, che permetterà di discriminare meglio il ruolo dinamico delle diverse tipologie di sottosuolo (Fig. 2).

La campagna di misurazioni effettuata nella città di Ferrara è durata due giorni. Sono stati installati 9 velocimetri (Lennartz 1 sec.) connessi ad acquisitori Reftek (Fig. 3a) nei due edifici esterni (Fig. 1a, triangolini rossi). Il segnale è stato registrato in continuo per tutta la durata dell'esperimento. I sensori sono stati installati sia al piano terra, sia in due punti sul tetto in entrambi gli edifici. Inoltre, sono stati installati due sensori nei piani intermedi, in uno dei due edifici, sulla stessa verticale. Al di là delle misure in continuo, alcune misure temporanee di rumore ambientale sono state eseguite in diversi punti sul tetto delle strutture in modo da caratterizzarne meglio il comportamento dinamico. Infine, per completare l'esperimento, sono stati installati 139 sensori sul campo di atletica (Fig. 1a, triangoli gialli). I 139 geofoni verticali di 4.5 Hz (Fig. 3c) sono stati installati sia lungo tre linee perpendicolari alle facciate degli edifici rivolte verso il campo di atletica, sia parallelamente ad esse (Linee 1,2,3, Fig. 1). Le registrazioni sul campo sportivo non sono state eseguite in continuo, per la limitata memoria degli acquisitori, ma mediante acquisizioni multiple, della durata di circa 4 minuti ciascuna. Un esempio delle registrazioni effettuate è presentato in Fig. 4. Da notare che per alcuni *data set* si sono verificati problemi di connettività tra i sensori e l'acquisitore (nel caso in Fig. 4. il sensore numero 47).

3. Risultati preliminari

Le analisi effettuate sono state motivate dall'assunzione che gli edifici, dopo essere stati messi in vibrazione da onde sismiche prodotte durante un terremoto o di origine antropica, modificano a loro volta lo scuotimento del suolo, agendo come fonti radianti secondarie. Le interazioni tra il campo d'onda incidente e quello generato dalle oscillazioni dei singoli edifici vengono studiate usando l'approccio di deconvoluzione applicato alle serie temporali registrate. In precedenti studi, si è dimostrato che le interazioni in oggetto possono essere analizzate mediante registrazioni simultanee di vibrazioni in una struttura edificata e a diverse profondità, in pozzi presenti nelle vicinanze (Petrovic e Parolai, 2016). Il campo d'onda generato dal singolo edificio può quindi interferire con quello generato da edifici posti nelle vicinanze. La velocità delle onde ed il loro tipo dominante possono presentare differenze a seconda della loro direzione di propagazione, tanto in prossimità della superficie quanto come in profondità. Per poter isolare nel campo d'onda misurato in superficie i contributi generati da diverse sorgenti e le loro mutue interazioni è quindi necessario effettuare le registrazioni sia in diverse posizioni delle strutture che nelle loro vicinanze. Questo è il motivo per cui si è proceduto all'installazione simultanea di sensori negli edifici e sul campo sportivo.

La prima fase di analisi delle registrazioni ottenute è consistita nell'identificazione delle caratteristiche dinamiche degli edifici, separatamente da quelle del suolo. Sono stati perciò calcolati i rapporti spettrali tra le registrazioni effettuate in diversi punti sul tetto e quelle simultanee alla base dello stesso edificio. I risultati sono riportati in Fig. 5. Grazie a tale



Fig. 3 - Strumentazione per l'indagine sull'interazione suolo-struttura e il comportamento dell'edificio: a) Reftek + 1s Lennarts; b) Tromino; c) Geofoni verticali a 4.5 Hz.

analisi è stato possibile identificare due picchi spettrali principali, a 3 e 4 Hz. Il picco a 3 Hz appare legato al movimento principalmente traslazionale, in direzione x , ed è particolarmente evidente nei punti 1 e 2 dell'edificio, a causa delle variazioni di rigidità della struttura, come si può evincere dall'analisi della planimetria. Il secondo picco a 4 Hz domina la componente x nei punti 1 e 2, e sulla componente y nei punti 3 e 4. Il picco è ben visibile in entrambe le componenti nei punti 5 e 6. Tale modo di vibrazione è stato interpretato come un modo rotazionale dell'edificio.

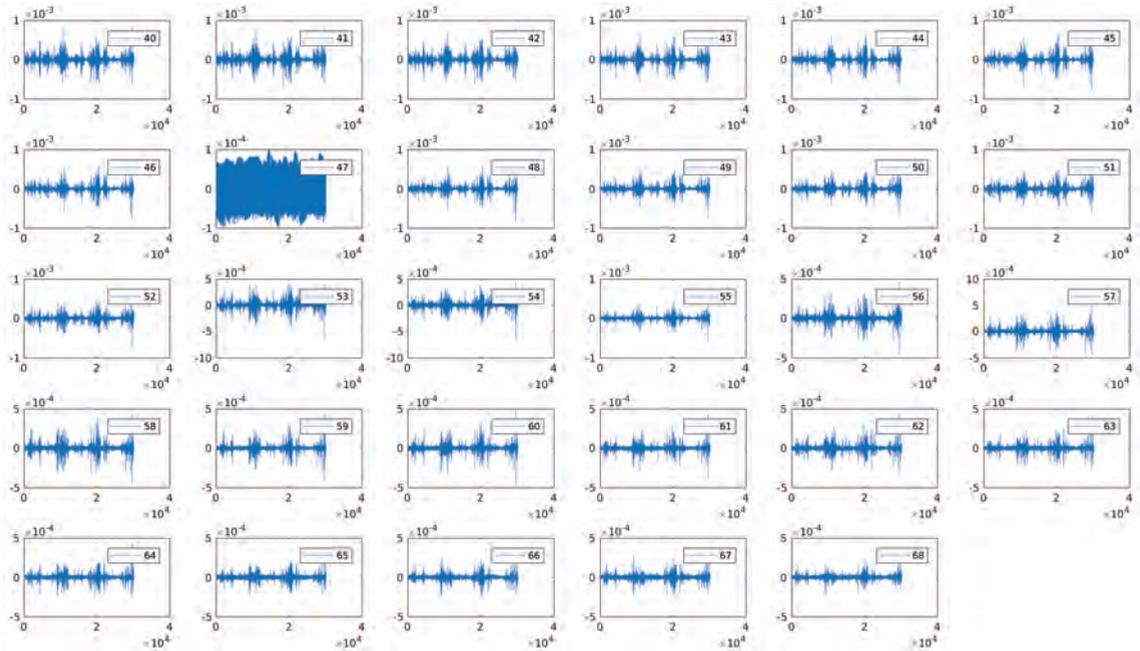


Fig. 4 - Esempio di registrazioni dei geofoni verticali a 4.5 Hz del rumore sismico su una linea sul campo sportivo.

Per identificare i segnali sismici rilasciati dall'edificio, si è successivamente iniziata un'analisi delle tracce registrate simultaneamente all'interno della struttura e sul campo sportivo. La Fig. 6 mostra, in modo preliminare, gli interferogrammi delle registrazioni di 4 minuti acquisite lungo la linea 1, usando come riferimento le registrazioni effettuate sul tetto dell'edificio, indicate in Fig. 6 come -45 m. Prima del calcolo degli interferogrammi, le tracce sono state filtrate tra 1 e 6 Hz,

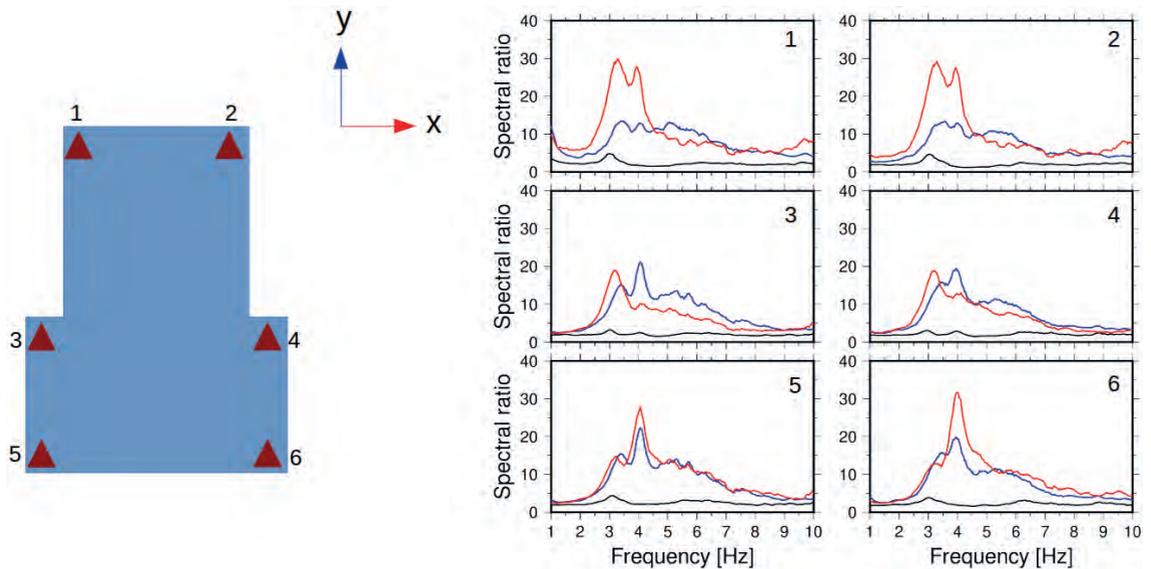


Fig. 5 - Rapporti spettrali calcolati utilizzando le registrazioni effettuate sul tetto dell'edificio e dal sensore installato alla sua base.

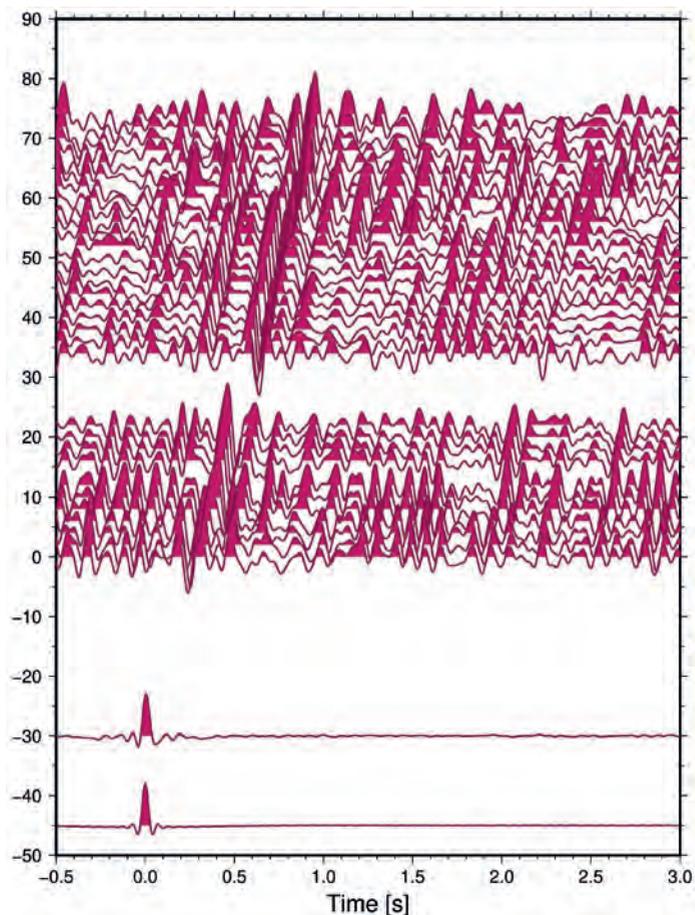


Fig. 6 - Interferogrammi calcolati utilizzando le registrazioni della linea 1 e considerando come riferimento la registrazione sul tetto della struttura.

banda di frequenza in cui, come dai risultati sopra indicati, vibra l'edificio. Già da questa analisi preliminare è possibile identificare un'onda secondaria generata alla base dell'edificio (-30 m in Fig. 6), che si propaga attraverso il campo.

4. Considerazioni conclusive

I risultati preliminari ottenuti dall'analisi dei dati raccolti mostrano chiaramente che gli edifici studiati, una volta portati in oscillazione da onde sismiche, agiscono da sorgenti secondarie di onde che si propagano poi attraverso il campo sportivo. Si conferma che le misurazioni di vibrazioni ambientali registrate simultaneamente negli edifici e sul suolo sono uno strumento adeguato allo studio dell'interazione fra edificio e suolo. Ulteriori analisi sono tuttavia necessarie per meglio identificare le complesse mutue interazioni tra onde e per determinare se tali interazioni possano indurre un'amplificazione o una diminuzione dello scuotimento.

Ringraziamenti. Si ringraziano i condòmini e gli amministratori che, con la loro disponibilità, hanno contribuito allo svolgimento dell'esperimento.

BIBLIOGRAFIA

- Colombi, A., Roux, P., Guenneau, S., Gueguen, P., Craster, R. V. (2016). *Forests as a natural seismic metamaterial: Rayleigh wave bandgaps induced by local resonances*. Sci Rep 6:19238; doi:10.1038/srep19238
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Oliveira, C. S. (2000a). *Experimental and numerical analysis of soil motions caused by free vibrations of a building model*. Bull. Seism. Soc. Am. 90 (6), 2037-2043.
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Semblat, J. F. (2000b). *Engineering seismology: seismic hazard and risk analysis: seismic hazard analysis from soil-structure interaction to site-city interaction*. 12 WCEE, Auckland, NZ.
- Guéguen, P., Bard, P.-Y., Chávez-García, F.J. (2002). *Site-City seismic interaction in Mexico City-like environments: an analytical study*. Bull. Seism. Soc. Am. 92, 794-811.
- Jennings, P.C. (1970). *Distant motions from a building vibration test*, Bull. Seism. Soc. Am. 60, 2037-2043.
- Kanamori, H., Mori, J., Anderson, D. L., Heaton, T. H. (1991). *Seismic excitation by the space shuttle Columbia*. Nature 349, 781-782.
- Kham, M., Semblat, J.-F., Bard P.-Y., Dangla, P. (2006). *Seismic site-city interaction: main governing phenomena through simplified numerical models*. Bull. Seism. Soc. Am. 96(5), 1934-1951.
- Laurenzano, G., Priolo, E., Gallipoli, M. G., Mucciarelli, M., Ponzio, F.C. (2010). *Effect of vibrating buildings on free-field motion and on adjacent structures: The Bonifratro (Italy) case history*, Bull. Seism. Soc. Am. 100 (2), 802-818.
- Petrovic, B. and Parolai, S. (2016). *Joint deconvolution of building and downhole strong-motion recordings: evidence for the seismic wavefield being radiated back into the shallow geological layers*, Bull. Seismol. Soc. Am. 106(4), 1720-1732.
- Petrovic, B., Parolai, S., Pianese, G., Dikmen, S. U., Moldobekov, B., Orunbaev, S., Paolucci, R. (2018). *Joint deconvolution of building and downhole seismic recordings: An application to three test cases*, Bulletin of Earthquake Engineering 16(3), 1633-1656, DOI: 10.1007/s10518-017-0215-6.
- Roux, P., Bindi, D., Boxberger, T., Colombi, A., Cotton, F., Douste-Bacque, I., Garambois, S., Gueguen, P., Hillers, G., Hollis, D., Lecocq, T. and Pondaven, I. (2018). *Toward Seismic Metamaterials: The METAFORÉ Project*. Seismological Research Letters, doi:10.1785/0220170196
- Wirgin, A., and Bard, P. Y. (1996). *Effects of buildings on the duration and amplitude of ground motion in Mexico city*. Bull. Seism. Soc. Am. 86(3), 914-920.

Utilizzo di rumore sismico per la caratterizzazione rapida degli edifici

N. TRAGNI¹, M.R. GALLIPOLI¹, M. LUPO¹, G. MASSOLINO², M. MUCCIARELLI²,
A. REBEZ², T.A. STABILE¹ e D. SANDRON²

¹ Istituto di Metodologie Ambientali Avanzate, CNR, Tito Scalo (PZ)

² OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

1. Introduzione

Le città devono rispondere a sollecitazioni sempre maggiori in termini di sicurezza urbana e sociale, prevenzione e mitigazione dei rischi ambientali (frane e terremoti). Gli attuali strumenti urbanistici si dimostrano incompleti a garantire la sicurezza del territorio urbano in termini di prevenzione, mitigazione e monitoraggio con logica di previsione del rischio. Infatti, in Italia le Linee Guida per la Microzonazione Sismica [GSM: Gruppo di lavoro MS (2008)], sebbene rappresentino il principale strumento per la pianificazione urbana in termini di rischio sismico, si focalizzano principalmente su problematiche geologico-tecniche del sottosuolo trascurando completamente la presenza degli edifici. Nell'ottica di considerare l'ambiente urbano come un unicum costituito dal suolo e dagli edifici, nell'ambito dell'OR4 è stato messo a punto un approccio metodologico che ha permesso di caratterizzare il patrimonio urbano, sottosuolo ed edifici, mediante l'applicazione di tecnologie non invasive, a basso costo e di elevata facilità d'applicazione (Pinzón *et al.*, 2018; Gallipoli *et al.*, 2019).

2. Scopo della ricerca

Per stimare le caratteristiche principali di un edificio e/o infrastruttura (frequenze fondamentali di vibrazione, smorzamenti equivalenti e forme modali) si può utilizzare come segnale di input le vibrazioni indotte dai terremoti e dal rumore ambientale. Sebbene il segnale dei terremoti garantisce la possibilità di discernere con maggiore dettaglio le caratteristiche della struttura in vari campi di spostamento, di contro i tempi di acquisizioni sono più lunghi e onerosi. Al contrario il rumore ambientale ha il vantaggio di essere una sorgente sempre presente in natura, generato da attività umane e naturali, è ubiquitario e composto da onde in un range di frequenze compreso tra 0.05 Hz-100 Hz (Gutenberg, 1958). Tale segnale può essere misurato sia sull'edificio che sul relativo suolo di fondazione mediante installazione di uno o più sensori sismometrici in maniera rapida e non invasiva. La configurazione dell'installazione dei sensori sull'edificio dipende dal grado di precisione desiderato nella stima delle grandezze fondamentali (Gallipoli *et al.*, 2010; Castellaro, 2016): una singola misura all'ultimo piano dell'edificio potrebbe essere sufficiente per stimare le frequenze fondamentali e gli smorzamenti equivalenti, per raggiungere una discreta conoscenza dei modi fondamentali di vibrare è sufficiente registrare rumore ambientale simultaneamente al piano più basso o nel campo libero e al piano più alto. La soluzione necessaria anche per stimare le forme modali è fare acquisizioni sincrone di rumore ambientale ad ogni piano e in campo libero come stazione di riferimento. Inoltre, per valutare eventuali modi di *rocking* è necessario

effettuare misure simultanee in prossimità del centro delle masse e nell'angolo dell'ultimo piano. Considerando la complessità di un edificio, essendo costituito da elementi strutturali e non, per stimare correttamente le grandezze fondamentali, è necessario posizionare i sensori vicino ai nodi trave-pilastro negli edifici in cemento armato e ai muri portanti per gli edifici in muratura.

Nell'ambito del progetto CLARA, tra il 5 e il 7 ottobre del 2015 una squadra composta da componenti dell'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale del CNR e dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale (OGS) ha effettuato una campagna di misure su 6 edifici pubblici siti nell'area urbana della città di Matera, selezionati in accordo con la pubblica amministrazione comunale. Essi appartengono alle due principali tipologie costruttive, muratura e cemento armato, e alle differenti destinazioni d'uso di edifici pubblici ed edifici adibiti a residenza scolastica (Fig. 1). Nell'ambito dell'attività AR 4.1 – Metodologie per la diagnostica non invasiva e multiscala di edifici ed infrastrutture, sono state eseguite misure di rumore ambientale a singola stazione in più punti dei 6 edifici selezionati, per un totale di 74 misure. Sono stati utilizzati cinque tromometri digitali a tre componenti (Tromino MoHo).

3. Metodologia

Sono state effettuate 74 misure di rumore sismico ambientale a singola stazione, 6 sui suoli di fondazione di ciascun edificio e 68 sugli edifici. Per ogni edificio è stata eseguita una misura

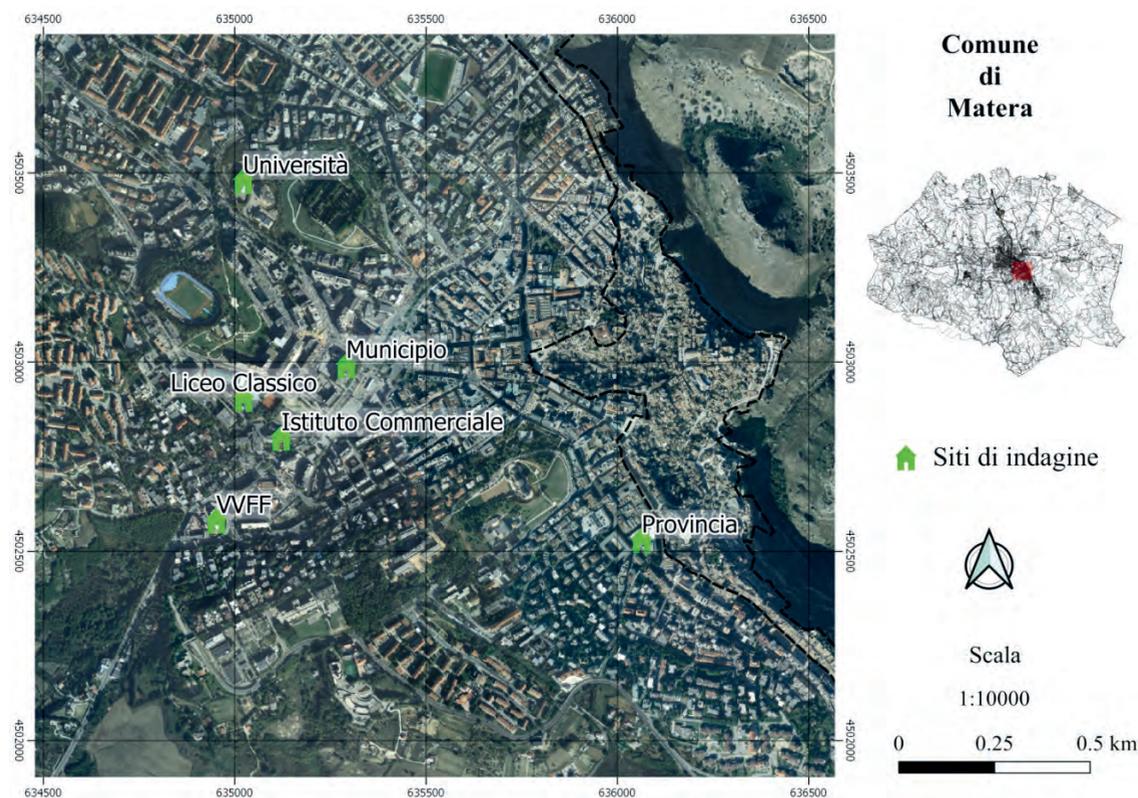


Fig. 1 - Indicazione degli edifici pubblici monitorati nella città di Matera.

all'esterno su suolo in condizioni di campo libero, con frequenza di campionamento di 128 Hz, di durata pari a 20 minuti per stimare la funzione di amplificazione del terreno di fondazione e misure in contemporanea in più punti all'interno della struttura di durata ciascuna di 12 minuti, campionate a 128 Hz, con *smoothing* al 3%, *windowing* di 20 secondi. Le acquisizioni su suolo sono state effettuate orientando il nord strumentale del sensore secondo il nord geografico, mentre quelle su edificio sono state realizzate disponendo il nord strumentale del tromografo nella direzione di maggior sviluppo della struttura, ovvero in direzione longitudinale. In ogni edificio sono state realizzate due modalità di acquisizione, in array verticale ed orizzontale. L'array verticale è stato realizzato posizionando ciascun sensore nello stesso punto ad ogni piano lungo una medesima verticale, mentre quello orizzontale posizionando ciascun sensore in diversi punti dell'edificio lungo la stessa linea nel piano. Durante entrambe le geometrie di acquisizione, è stato posizionato un sensore al piano più basso, a contatto con le fondazioni della struttura, che ha funzionato come sito di riferimento. Poiché tali acquisizioni sono state eseguite contemporaneamente, è stato possibile analizzare i dati con due tecniche spettrali, la tecnica spettrale a singola stazione, *Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio* [HVSr: Castro et al. (1998); Gallipoli et al. (2004); Di Giulio et al. (2005)] e la tecnica con stazione di riferimento, *Standard Spectral Ratio* [SSR: Parolai et al. (2005)]. Le misure sono state elaborate con il *software* Grilla (MoHo).

4. Risultati

Per brevità si riportano le acquisizioni e i risultati riguardanti la caratterizzazione del suolo e l'individuazione dei modi fondamentali di vibrazione della struttura del Liceo Classico E. Duni (Fig. 1). La struttura presenta una forma ad arco di cerchio. Sono state eseguite misure su due array verticali, una in posizione centrale e l'altra ad un estremo dell'edificio, e su uno orizzontale al penultimo piano (poiché l'ultimo aveva dimensioni diverse dagli altri). In entrambi i casi, il sensore di riferimento è stato posizionato nel seminterrato, al fine di eseguire l'analisi con la tecnica SSR. È stata effettuata una misura su suolo ad una distanza pari all'altezza dell'edificio (Fig. 2A). La funzione di amplificazione sismica locale mostra un chiaro ed elevato picco di amplificazione a circa 1.5 Hz, stabile anche nel tempo (Fig. 2B), indicativo di un significativo contrasto di impedenza tra il banco di terreno soffice superficiale, costituito da una successione di sabbie e argille subappennine, e le calcareniti sottostanti (Lupo e Gallipoli, 2011). Dai risultati delle analisi SSR, ciascun piano dell'edificio mostra due modi principali di vibrare, uno in direzione trasversale (componente est - ovest) a 2.7 Hz e l'altro in direzione longitudinale (componente nord - sud) a 4.2 Hz (Fig. 3B, E). Si riscontra un'asimmetria di comportamento tra i due estremi dell'edificio: il lato destro, essendo più rigido a causa della presenza della struttura trapezoidale della scalinata di ingresso, vibra essenzialmente sul piano orizzontale (Fig. 2B), il lato sinistro presenta anche una componente di *rocking* a 2.7 Hz, infatti tale frequenza è evidente non solo sulla componente trasversale ma anche su quella verticale (Fig. 2B). Tale comportamento si evidenzia ancor meglio nei risultati ottenuti lungo l'array orizzontale, ossia nella parte più rigida dell'edificio (punto A in Fig. 2A) la frequenza fondamentale è a 4.2 Hz e il moto avviene prevalentemente in direzione longitudinale, man mano che ci si sposta verso la parte più flessibile (punto D in Fig. 2A) la frequenza fondamentale non solo diminuisce, ma assume anche una componente trasversale e verticale inducendo quindi un moto di *rocking* a 2.7

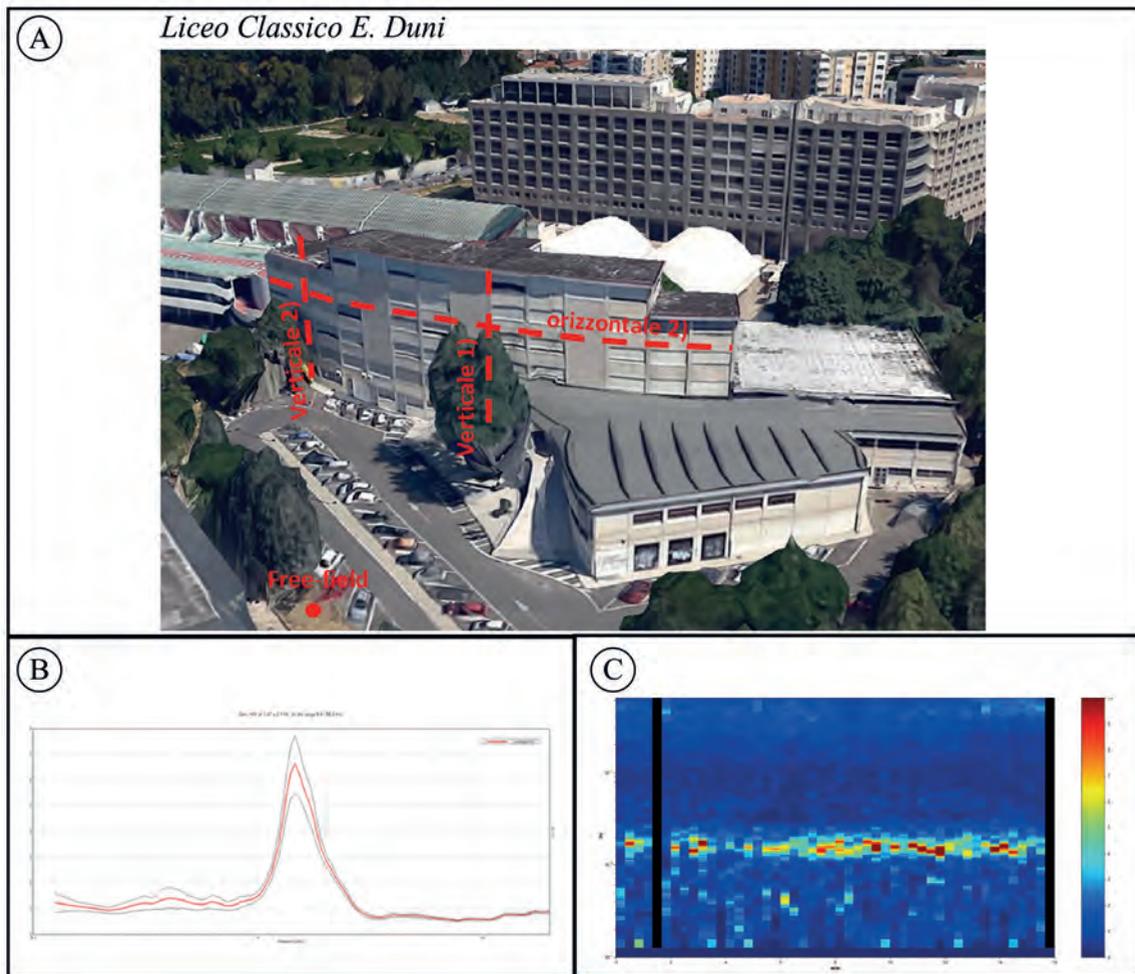


Fig. 2 - Scheda relativa al suolo: A) foto e indicazione dei punti di misure effettuati sull'edificio del Liceo Classico E. Duni; B) funzione HVSR stimata sul suolo di fondazione dell'edificio del Liceo; C) andamento nel tempo della funzione HVSR stimata sul suolo di fondazione.

Hz (Fig. 3D). Anche le forme modali mostrano una regolarità dell'andamento interpiano della parte più rigida dell'edificio con una prevalenza del moto in direzione longitudinale, mentre le forme modali della parte più flessibile mostrano un'irregolarità in entrambe le direzioni dovuto alle diverse dimensioni dell'ultimo piano (Fig. 3.C).

5. Considerazioni conclusive

Quest'approccio perseguito sia nell'acquisizione delle misure che nella elaborazione si è dimostrato efficace nel caratterizzare in maniera rapida, speditiva e non invasiva alcuni edifici pubblici della città di Matera. Sebbene l'utilizzo del segnale del rumore sismico ambientale per stimare le principali caratteristiche di un edificio sia ormai una tecnica lungamente validata e consolidata, in questo studio invece si è voluto sperimentare le geometrie di acquisizione di rumore

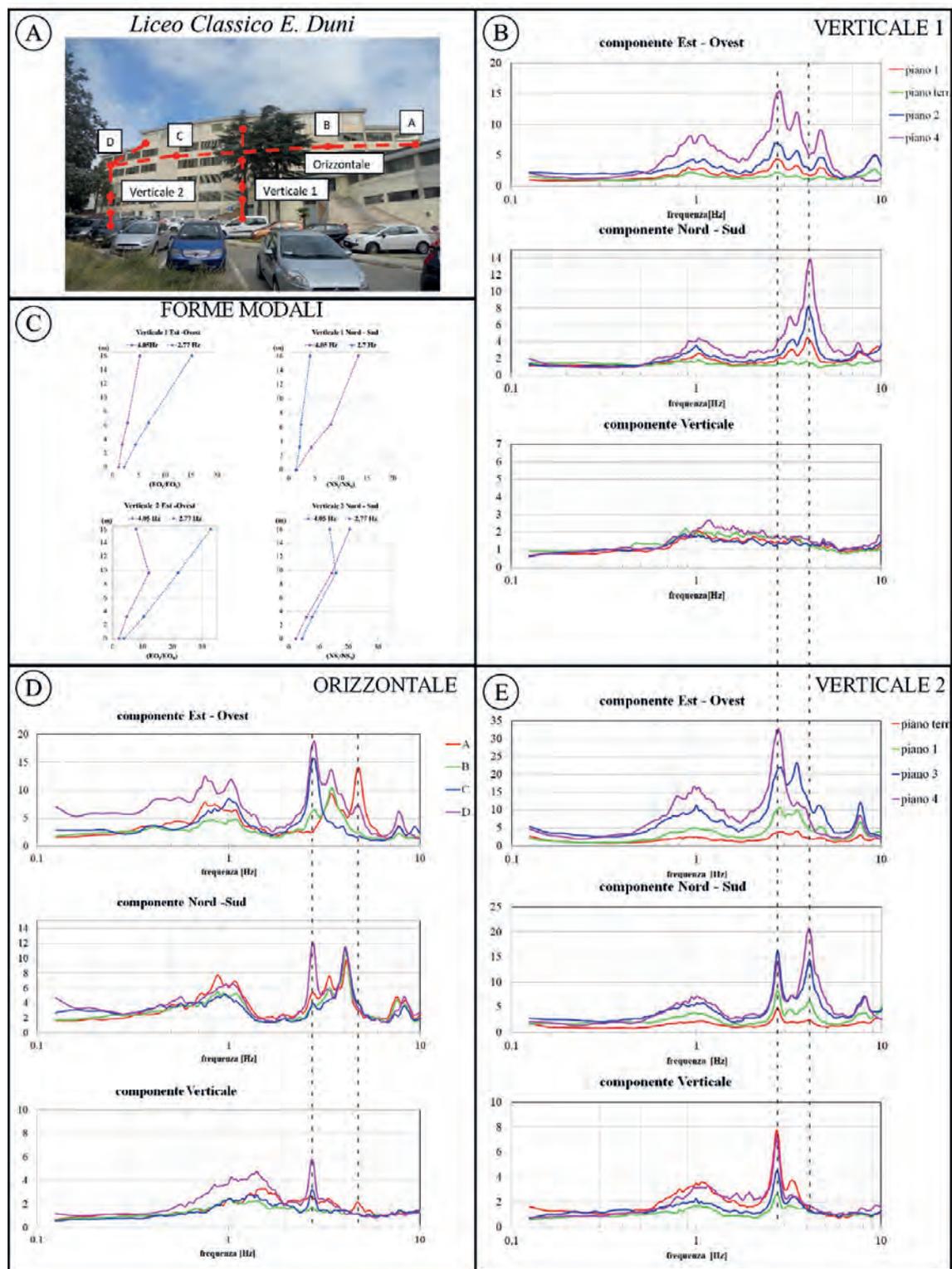


Fig. 3 - A) Indicazione dei punti di misura; Funzioni SSR, ottenute nelle due direzioni principali dell'edificio, longitudinale e trasversale, su ciascun piano dell'edificio del Liceo Classico "E. Duni" nelle due configurazioni di array verticale (B-verticale 1; E-verticale 2) e in quella orizzontale (D); C) forme modali ottenute sulla verticale 1 e verticale 2..

ambientale più idonee a fornire maggiori informazioni sul comportamento dell'edificio con un numero minimo ma sufficiente di misure facilmente eseguibile. Poter ricavare tali informazioni sul maggior numero degli edifici, sia pubblici che privati, nonché sulle infrastrutture, permetterebbe di caratterizzare il patrimonio urbano e di valutare possibili interazioni pericolose tra esso e il sottosuolo urbano che potrebbero incrementare i danni durante gli eventi sismici.

BIBLIOGRAFIA

- Castro R.R., Mucciarelli M., Pacor F., Federici P., Zaninetti A. (1998). *Determination of the characteristic frequency of two dams located in the region of Calabria, Italy*. Bulletin of Seismological Society of America, 88(2):503-511.
- Castellaro S. (2016). *Soil and structure damping from single station measurements*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 90: 480-493
- Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Castro R.R., Monachesi G., Contri P. (2004). *Structure, soil-structure response and effects of damage based on observations of horizontal-to-vertical spectral ratio of microtremors*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24(6):487-495.
- Gallipoli M.R., Mucciarelli M., Šket-Motnikar B., Zupančić, P., Gosar A., Prevolnik S., Herak M., Stipčević J., Herak D., Milutinović Z., Olumčeva T. (2010). *Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings*. Bull. Earthq. Eng. 8, 593-607. <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9133-6>
- Gallipoli M.R., Calamita G., Tragni N., Pisapia D., Lupo M., Mucciarelli M., Stabile T., Perrone A., Amato L., Izzi F., Lascaleia G., Maio D., Salvia V. (2019). *The Soil-Building Resonance Effect in Microzonation Study*. Submitted on Engineering Geology.
- Di Giulio G., Azzara R.M., Cultrera G., Giammarinaro M.S., Vallone P., Rovelli A. (2005). *Effect of local geology on ground motion in the city of Palermo, Italy, as inferred from aftershocks of the 6 September 2002 MW 5.9 earthquake*. Bulletin of Seismological Society of America, 95:2328-2341.
- Gutenberg B. (1958). *Microseisms*. Advan. Geophys., 5: 53-92.
- Lupo M., M.R. Gallipoli (2011). *Caratterizzazione dei terreni e risposta sismica locale dell'area urbana di Matera, Volume Speciale "Tecniche speditive per la stima dell'amplificazione sismica e della dinamica degli edifici Studi teorici ed applicazioni professionali"* a cura di Marco Mucciarelli, Aracne Editore, ISBN 978-88-548-xxxx-x, pp. 323-342.
- Parolai S., Facke A., Richwalski S.M., Stempniewski L. (2005). *Assessing the vibrational frequencies of the Holweide hospital in the city of Cologne (Germany) by means of ambient seismic noise analysis and FE modelling*. Natural Hazard, 34:217-230.
- Pinzón L.A., Pujades L.G., Macau A., Figueras S. (2019). *Increased seismic hazard in Barcelona (Spain) due to soil-building resonance effects*. Soil Dyn. Earthq. Eng. 117, 245-250. <https://doi.org/10.1016/J.SOILDYN.2018.11.022>

Sviluppo di sensori *ad hoc* per misure di vibrazioni in aree urbane

L. AMATO¹, D. SALA¹, M. ULIANO¹, G. ANTONUCCI¹ e G. DE VITI²

¹ Tecno In S.p.A., San Donato Milanese (MI)

² Monitoring Systems S.r.l., Napoli

1. Introduzione

Il problema delle vibrazioni degli edifici, in particolare indotto da sorgenti antropiche (traffico stradale e ferroviario, cantieri edili, ecc.), ha assunto negli ultimi trent'anni sempre maggiore importanza sia in relazione all'incremento delle sorgenti di vibrazioni sia alla variazione della loro tipologia come, ad esempio, il notevole incremento dei mezzi pesanti in circolazione.

In particolare, nelle aree urbane italiane, sovente interessate da edifici in muratura prospicienti gli assi viari oppure da monumenti, il problema delle vibrazioni può essere avvertito a differenti livelli, in relazione alla tipologia di veicolo transitante, la velocità di percorrenza e le condizioni delle pavimentazioni stradali sovente carenti di manutenzione.

In questi frangenti, è importante verificare se le vibrazioni siano tali da indurre o meno danneggiamenti alle costruzioni, soprattutto in presenza di evidenti danni architettonici.

Nel recente passato, i livelli delle vibrazioni sono stati misurati avvalendosi di personal computer collegati a schede di acquisizione dati e relativi sensori. Questa soluzione, sicuramente prestazionale, ha sempre posto grossi problemi logistici (ad esempio, il passaggio dei cavi, l'alloggio del personal computer, i consumi elettrici); pertanto, sulla scorta dell'esperienza conseguita è stato progettato e realizzato un apposito sensore, caratterizzato da dimensioni compatte e basso consumo, in modo da poter essere adoperato in modalità stand-alone oppure in una rete di dispositivi.

2. Metodologia

Lo studio è stato sviluppato tenendo conto della finalità del Progetto ovvero di voler strumentare, in maniera rigorosa, le strutture con un sistema proprietario dove integrare componentistica OEM, successivamente ingegnerizzata, considerando alcuni fattori quali:

- dimensioni dell'unità di acquisizione dati (di seguito riportate come UAD);
- alimentazione delle UAD;
- tipologia di sensore;
- struttura dei file;
- comunicazione dei dati acquisiti e degli allarmi.

Un aspetto dello studio ha riguardato l'analisi dei trasduttori presenti sul mercato. Com'è noto, la registrazione delle vibrazioni può essere eseguita con sismometri oppure con accelerometri.

Considerata la tipologia di applicazione (installazione su strutture) e dei circuiti elettronici, si è deciso di focalizzare l'analisi tecnica sui trasduttori accelerometrici di tipo esterno oppure *embedded* con caratteristiche di alimentazione a basso consumo.

I test eseguiti al banco prova hanno fatto propendere per la scelta per un trasduttore accelerometrico triassiale *MEMS* (*Micro Electro-Mechanical System*), con uscita analogica (in tensione) proporzionale all'accelerazione misurata, da installare esternamente all'unità di acquisizione.

In seguito alla scelta tecnologica, si è dato seguito alla progettazione vera e propria dell'*hardware*, alla realizzazione di un *breadboard* ed alla scrittura del software di gestione/acquisizione in linguaggio C++.

La progettazione del prototipo per la misurazione dei fenomeni sismici, da inserire in un sistema nodale, ha tenuto conto delle seguenti caratteristiche:

- scelta del trasduttore di misurazione: è stato individuato un trasduttore accelerometrico triassiale, con tecnologia MEMS, avente un fondo scala pari a $\pm 3g$, con un range in frequenza compreso tra 0,5 Hz e 550 Hz;
- dimensioni dell'accelerometro: il trasduttore accelerometrico è caratterizzato da dimensioni compatte pari a 4 mm x 4 mm x 1.45 mm;
- output dell'accelerometro: particolare attenzione è stato rivolto all'output del trasduttore che è in tensione, quindi, del tipo "analogico";
- qualità dell'accelerometro: ridotto valore di noise pari a $300 \mu g/\sqrt{Hz}$ rms;
- consumo ridotto: supply current pari a 350 microAmpere @ 3V.

In seguito a tale analisi, è stato ideato lo schema a blocchi di funzionamento dell'acquisitore sismico (Fig. 1) fondato sui seguenti principi:

- ingresso del segnale sismico in formato analogico;

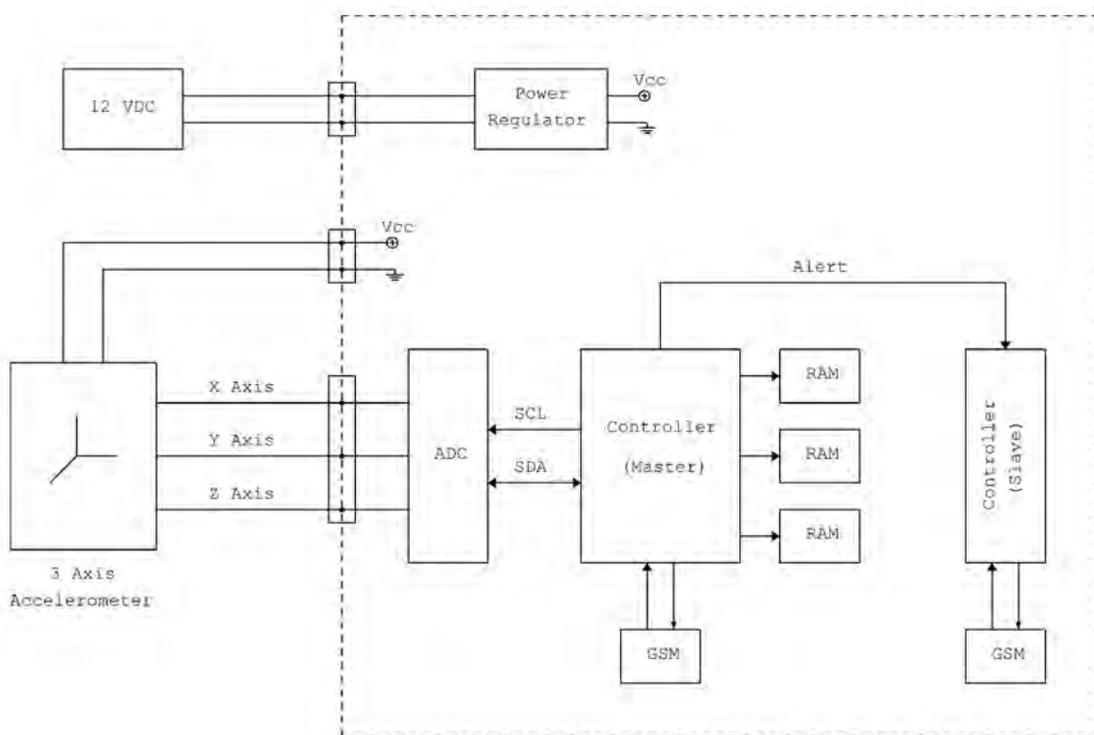


Fig. 1 - Schema a blocchi del sensore vibrometrico.

- segnale disponibile in forma separata per ciascun asse di misurazione;
- individuazione di idonei convertitori A/D per la trasformazione del segnale in digitale tenendo in considerazione un campionamento del segnale pari a 125 Hz;
- memorizzazione dei dati su memoria allo stato solido;
- sezione di trasmissione dei dati basata su modem integrato.

3. Sviluppo della strumentazione

Al termine del processo descritto, è stato realizzato un primo prototipo, tramite la preparazione di una *breadboard*, che ha costituito il primo passo per la progettazione di una scheda madre (*motherboard*) secondo lo standard GBR.

In seguito, si è proceduto all'assemblaggio nei ns. laboratori della componentistica elettronica di alto livello.

Ultimato l'assemblaggio si è proceduto al test funzionale della *breadboard* al banco di controllo mediante apparecchiature elettroniche (multimetro, oscilloscopio, ecc.) e *software* diagnostici.

I test iniziali dell'accelerometro hanno evidenziato un elevato rumore di fondo dovuto all'ingresso, nella catena strumentale, della frequenza della corrente di rete pari a 50 Hz (Fig. 2).

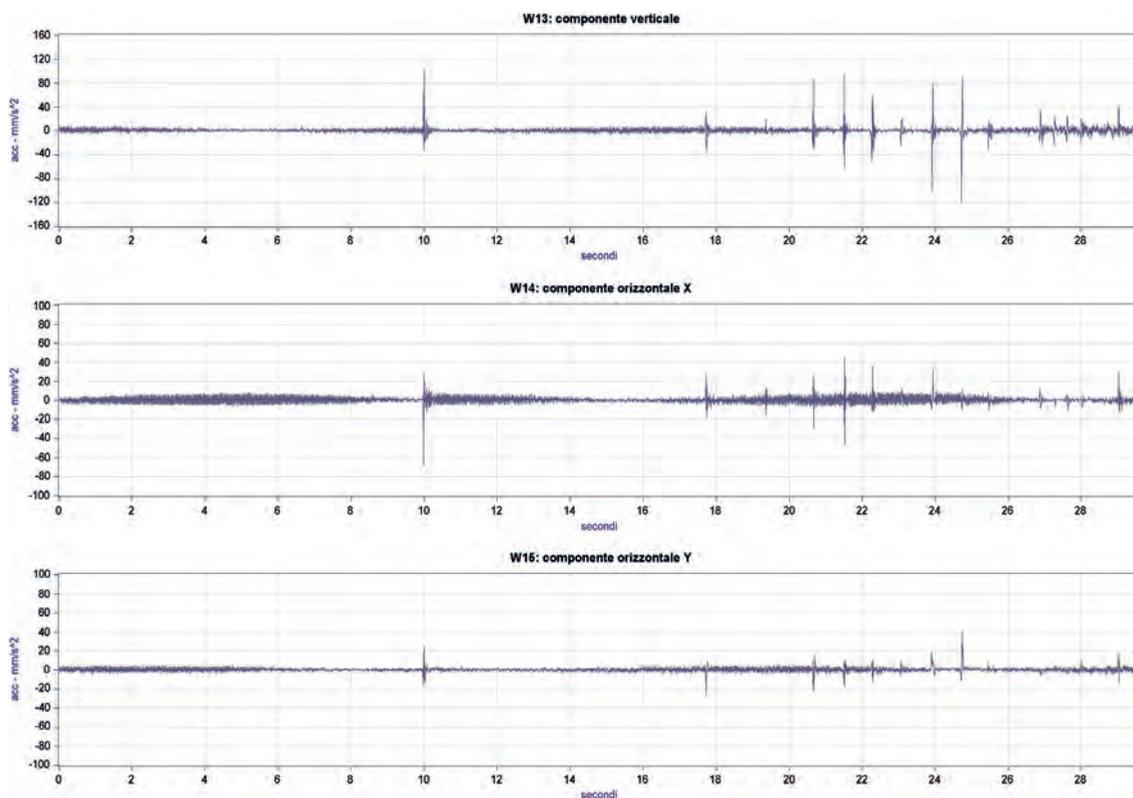


Fig. 2 - Segnale vibrometrico acquisito nel corso dei primi test del sensore.

Questa problematica è stata risolta apportando delle migliorie alla circuitazione elettronica e variando il tempo di acquisizione da 100 Hz a 125 Hz (Fig. 3).

4. Risultati

Il dispositivo è stato installato in alcuni cantieri edili, affiancando l'apparato convenzionale, costituito da geofoni collegati alla catena strumentale classica costituita da personal computer – scheda d'acquisizione dati. In questi contesti, la miniaturizzazione raggiunta ed i bassi consumi dell'apparecchiatura hanno permesso un'installazione distribuita bypassando le problematiche logistiche consuete. L'alimentazione di ciascun modulo è avvenuta sia con la corrente di rete oppure mediante l'utilizzo di un pannello solare da 20 W. Tale potenza è risultata necessaria non tanto per la gestione del microprocessore e del sensore accelerometrico (a bassissimo consumo energetico) ma per il funzionamento del modulo GSM utilizzato sia per l'invio dei dati ad un server FTP sia per l'invio di sms a seguito del superamento delle soglie di *Alert* o *Alarm*.

Inoltre, l'utilizzo di componentistica con un favorevole rapporto qualità/prezzo, ha evidenziato forme d'onda più che apprezzabili soprattutto se si considera che i valori di soglia riportati nell'allegato della norma italiana UNI:9916 (2014) sono ben superiore ad 1 mm/s.

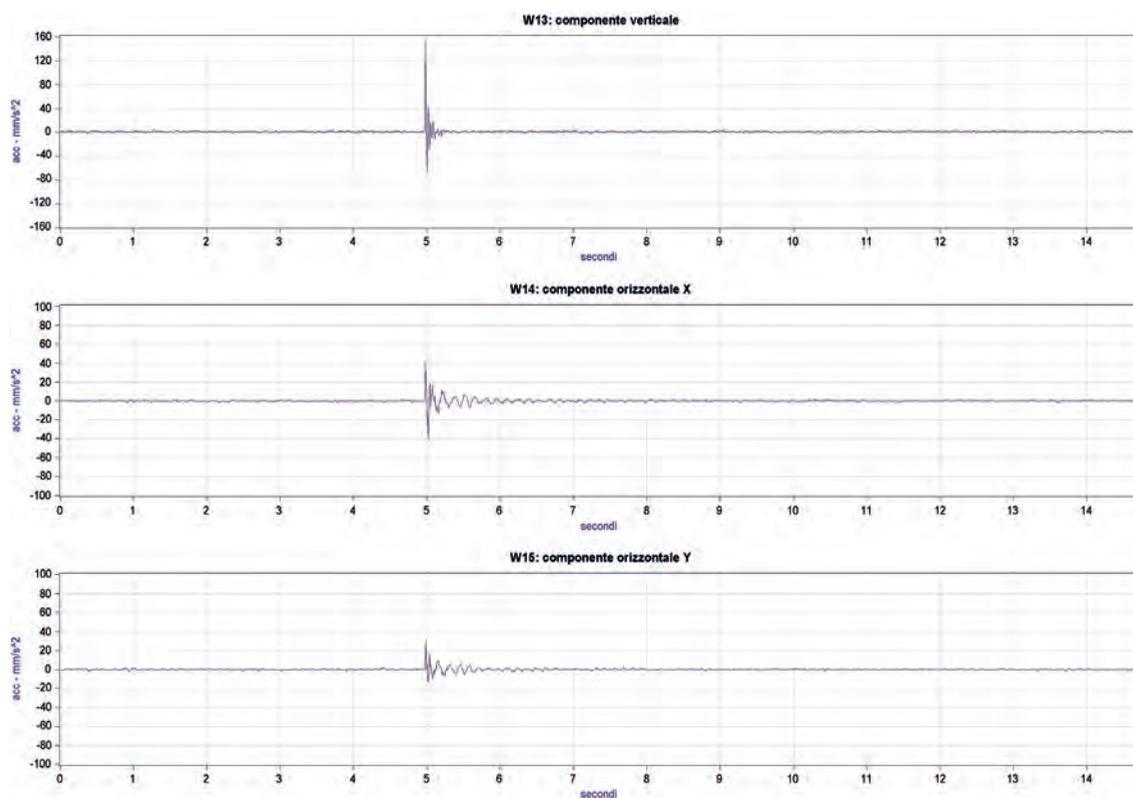


Fig. 3 - Segnale vibrometrico acquisito in seguito all'ottimizzazione del sensore.

5. Conclusioni

La sperimentazione finora condotta, ha evidenziato, rispetto ai trasduttori accelerometrici utilizzati come campione, un *ripple* che si attesta attorno a 0,05 mm/s ovvero più che accettabile tenendo conto della finalità delle misurazioni.

Sono in corso ulteriori sperimentazioni per ridurre ulteriormente questo valore per poter permettere l'utilizzo del sensore anche in altri ambiti.

BIBLIOGRAFIA

- Bachman H. et al. 1995. *Vibration problems in structures*. Practical Guidelines. Birkhauser.
- Dowding C.H. 1985. *Blast Vibration monitoring and control*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs.
- Harris C.M. 2009. *Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill Education; 6th edition.
- UNI 9916:2014. *Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici*.

OR5

**Implementazione di sistemi tecnologici
innovativi per l'acquisizione
e trasmissione di dati multi-parametrici
per il monitoraggio del sottosuolo
e delle strutture/infrastrutture**

Implementazione di sistemi tecnologici innovativi per l'acquisizione e trasmissione di dati multi-parametrici per il monitoraggio del sottosuolo e delle strutture/infrastrutture

C. SANTORO

Dipartimento di Matematica e Informatica, Università di Catania

Nell'analisi e valutazione dei rischi legati ai fenomeni naturali, le tecnologie di monitoraggio del territorio giocano un ruolo fondamentale sia nella fase di prevenzione dei fenomeni franosi che in quella di analisi post-fenomeno. L'obiettivo è quello di consentire l'acquisizione di dati sui movimenti del terreno, effettuare un'opportuna analisi dei dati stessi, e identificare elementi che possano essere indicatori di eventuali eventi imminenti nel breve o lungo termine (*early warning*). In maniera analoga, i dati raccolti a seguito dell'insorgenza di un evento possono essere utilizzati per comprendere quali indicatori considerare per attivare l'eventuale *early warning*.

Allo scopo di considerare i diversi aspetti legati all'identificazione dei movimenti del terreno, all'interno di CLARA si è pensato all'impiego di tecnologie particolarmente diverse tra loro che includono le seguenti soluzioni:

- reti di sensori inerziali superficiali;
- reti di sensori di profondità;
- sistemi volanti per l'acquisizione aerea di immagini delle zone da monitorare.

Per quanto concerne i "sensori inerziali superficiali", la soluzione adottata consiste in una rete di mini dispositivi, basati su microcontrollore, dotati di sensori inerziali e di un opportuno sistema di comunicazione wireless che consente ai dispositivi stessi di creare una *sensor network*, con lo scopo di trasmettere, verso un server, i dati acquisiti. L'adozione di tali sensori si rivela adatta a monitorare i movimenti superficiali del terreno, tuttavia, in casi di fenomeni importanti, è assai più opportuno essere in grado di identificare l'evoluzione del movimento dei diversi strati di terreno, in profondità. Per questa ragione, la seconda tipologia di sensori sviluppata all'interno del progetto CLARA è costituita da "sonde inclinometriche" le quali sono in grado di scorrere all'interno di guide tubolari metalliche: poiché tali guide vengono piantate in profondità sul terreno e possono deformarsi sulla base del movimento degli strati, facendo scorrere la sonda inclinometrica è possibile determinare le deformazioni, con le relative quote, e dunque ricostruire gli spostamenti dei vari strati.

Accanto alle tecnologie citate, l'"ispezione visiva" è sicuramente un ulteriore strumento che consente di valutare l'evoluzione di un fenomeno franoso. A questo scopo, all'interno del progetto CLARA, le tecnologie di monitoraggio elettronico sono affiancate da sistemi aerei in grado di effettuare fotografie/riprese aeree dell'area di interesse; in particolare, si è pensato di adottare un insieme di "velivoli autonomi" (*UAV - unmanned aerial vehicle*), nella fattispecie "multirotori" (noti anche come "droni") i quali, attraverso un volo coordinato, sono in grado di sorvolare l'intera zona da monitorare e catturare le immagini per una successiva analisi *off-line*.

I multirotori, all'interno di CLARA, non sono tuttavia funzionali al solo monitoraggio aereo ma anche come mezzi di servizio per la fase di *deployment* dei sensori superficiali; occorre infatti considerare che, spesso, le aree soggette a fenomeni franosi risultano essere particolarmente

impervie (es. crinali di montagna scoscesi), e pertanto difficili da raggiungere da parte di operatori umani. Per ovviare a questo problema e consentire comunque il monitoraggio, si è pensato di utilizzare gli UAV come “vettori” per i sensori, includendo sull’UAV un serbatoio in grado di contenere alcuni sensori (nell’ordine della decina): gli UAV, sorvolando l’area di interesse seguendo un opportuno piano di volo, possono dunque rilasciare dall’alto, in punti prestabiliti, i vari sensori, consentendo il monitoraggio di aree che, diversamente, non sarebbero raggiungibili.

In aggiunta agli UAV, come tecnologia di ausilio per il *deployment* dei sensori nelle zone da monitorare, il progetto CLARA prevede l’uso di “robot autonomi”, progettati ad-hoc per poter operare in zone impervie. Occorre infatti considerare che, se l’area è coperta da fitta vegetazione arborea, la probabilità che un sensore rilasciato da un UAV non raggiunga il terreno è estremamente alta, pertanto, in tali casi, la via terrestre sembra essere l’unica percorribile. Date queste condizioni specifiche, la soluzione adottata in CLARA è stata quella dell’uso di “robot bioispirati”, cioè robot autonomi dotati di sistemi di movimento e locomozione con caratteristiche ispirate dal mondo degli insetti (esapodi) e quindi con capacità di operare in zone dove difficilmente un operatore umano è in grado di agire.

Considerate queste premesse, le attività svolte all’interno dell’Obiettivo Realizzativo 5 del progetto CLARA sono state le seguenti:

- AR 5.1 - Monitoraggio tramite reti di sensori;
- AR 5.2 - Monitoraggio aereo del territorio tramite l’uso di sciame di UAV;
- AR 5.3 - Robot bio-ispirati per il posizionamento dei sensori;
- AR 5.4 - Realizzazione Sensore per rilevazione di movimenti orizzontali del terreno;
- AR 5.5 - Sviluppo di sensori integrati;
- AR 5.6 - Strategie adattative e distribuite per il *deployment* dei sensori e il supporto decisionale alla gestione delle emergenze.

Monitoraggio tramite reti di sensori

A. ASTUTI e S. CHILLARI

Meridionale Impianti, Caponago (MB)

L'obiettivo dell'attività 5.1 è quello di realizzare una *sensor network* con lo scopo di effettuare una mappatura costante degli spostamenti di zone di terreno, parti relative a opere di contenimento ed eventuali infrastrutture specifiche. I dati raccolti possono essere poi oggetto di una duplice analisi: da una parte la loro memorizzazione in un opportuno archivio storico può consentire la validazione dei modelli previsionali, in modo da derivare le soglie di allarme per un eventuale rischio frana; dall'altra parte, i modelli così validati e applicati ai dati acquisiti *on-the-fly* possono essere utilizzati per stimare, momento per momento, la probabilità di frana delle zone monitorate.

Cuore della *sensor network* è un dispositivo *embedded* che include, al suo interno, i sensori veri e propri, un'interfaccia di comunicazione *wireless* ed un microcontrollore con un adeguato *firmware*. Il dispositivo si suppone alimentato da una batteria, ragion per cui, uno dei requisiti fondamentali è che il consumo del dispositivo stesso sia il più basso possibile.

Dal punto di vista dell'elemento sensibile, la scelta è dettata dalla tipologia di grandezza fisica che si intende misurare. L'obiettivo è identificare i movimenti del terreno e, sebbene l'uso di un sensore GPS sembrerebbe la soluzione ideale, essa risulta impraticabile a causa degli elevati consumi di energia che caratterizzano un sensore di questo tipo. L'esistenza di movimenti del terreno può essere tuttavia identificata non solo tramite la posizione geografica ma anche attraverso la lettura di vibrazioni o inclinazioni, soprattutto quando queste grandezze superano determinate soglie specifiche; a tale scopo, i sensori di tipo accelerometrico a tecnologia *MEMS* (*Micro Electro-Mechanical System*) possono assolutamente servire allo scopo: un accelerometro triassiale è infatti in grado di monitorare sia vibrazioni (le quali producono accelerazioni) che inclinazioni del terreno (misurando le componenti dell'accelerazione di gravità); tali sensori sono altresì caratterizzati da un'elevata miniaturizzazione e da un bassissimo consumo di corrente, caratteristiche che li rendono pertanto ideali per l'applicazione di monitoraggio di cui alla presente attività. Dal punto di vista concreto, la scelta sul sensore da utilizzare è ricaduta sul circuito integrato LIS3DH (www.st.com/resource/en/datasheet/lis3dh.pdf), il quale ingloba, al suo interno, un elemento sensibile accelerometrico a tre assi con elevato range fino a +/-16 g, un'interfaccia dati di tipo SPI/I2C per il collegamento ad un microcontrollore, ed è inoltre caratterizzato da un consumo di corrente estremamente basso, nell'ordine dei 2 μ A.

Dal punto di vista della rete *wireless*, sono state studiate e testate diverse tecnologie e protocolli oggi disponibili nel campo dell'*Internet-of-Things*, tra cui Zigbee, SIGFOX, LORA e LORAWAN. L'esigenza è quella di avere una tecnologia di rete che potesse rispondere ai requisiti di elevata penetrazione, elevata copertura e (ancora una volta) consumi ridotti. Di contro, la tipologia di monitoraggio non richiede elevati *bit-rate* in quanto non necessita di trasmissioni *just-in-time*, ma solo a fronte di variazioni delle grandezze misurate. La risposta a questi requisiti sono le tecnologie *LPWA* (*Low Power Wide Area*) che vengono appunto utilizzate per connettere sensori e che sono caratterizzate da basse velocità, scambio di poche decine o centinaia di bit, e bassi consumi che consentono dunque una elevata durata delle batterie (anche superiore a 10 anni). Le soluzioni disponibili al momento ed in grado di garantire i requisiti citati sono la tecnologia *LoRa*

(Long Range) WAN, nata dal contributo di varie aziende unitesi nella LoRa Alliance, ed i servizi erogati da SIGFOX con tecnologia proprietaria. Entrambe le soluzioni consentono consumi ridotti, elevata copertura (circa 10 km) ed usano frequenze non licenziate (900 MHz), tuttavia, mentre la seconda soluzione è proprietaria (e quindi chiusa), la tecnologia LoRa è standardizzata da un'associazione *no profit* e pertanto risulta essere una soluzione aperta e disponibile per gli sviluppatori. Per tale ragione, la scelta è ricaduta proprio su questa seconda soluzione. LoRaWAN basa il livello fisico su una tecnica di modulazione denominata *chirp spread spectrum modulation* ed utilizzata da decenni negli ambienti militari e nelle comunicazioni aerospaziali per creare *link* di comunicazione a lungo raggio; il punto di forza è dunque quello di permettere distanze di comunicazione considerevoli con richieste di potenze limitate. Il protocollo degli strati superiori definisce invece una serie di regole e architetture di rete sempre con l'obiettivo di massimizzare la durata delle batterie, la capacità della rete, la qualità del servizio, la sicurezza e la copertura geografica. L'architettura di una rete LoRaWAN prevede una tipologia a "stella di stelle" in cui il *Gateway* (centro-stella) agisce da *bridge* trasparente per i messaggi tra *Device* ed il *Network Server*. I *Gateway* sono connessi al *Network Server* tramite una connessione IP, mentre i *Device* utilizzando una comunicazione *wireless single-hop* verso uno o più *Gateway*. La comunicazione verso i *Device* è in generale bidirezionale, ma può anche supportare il *multicast* per gestire l'aggiornamento o la distribuzione massiva di messaggi riducendo i tempi di comunicazione. Al fine di supportare la comunicazione LoRa, il dispositivo della *sensor network* progettata include l'integrato RN2483 della MicroChip (www.microchip.com/wwwproducts/en/RN2483), un

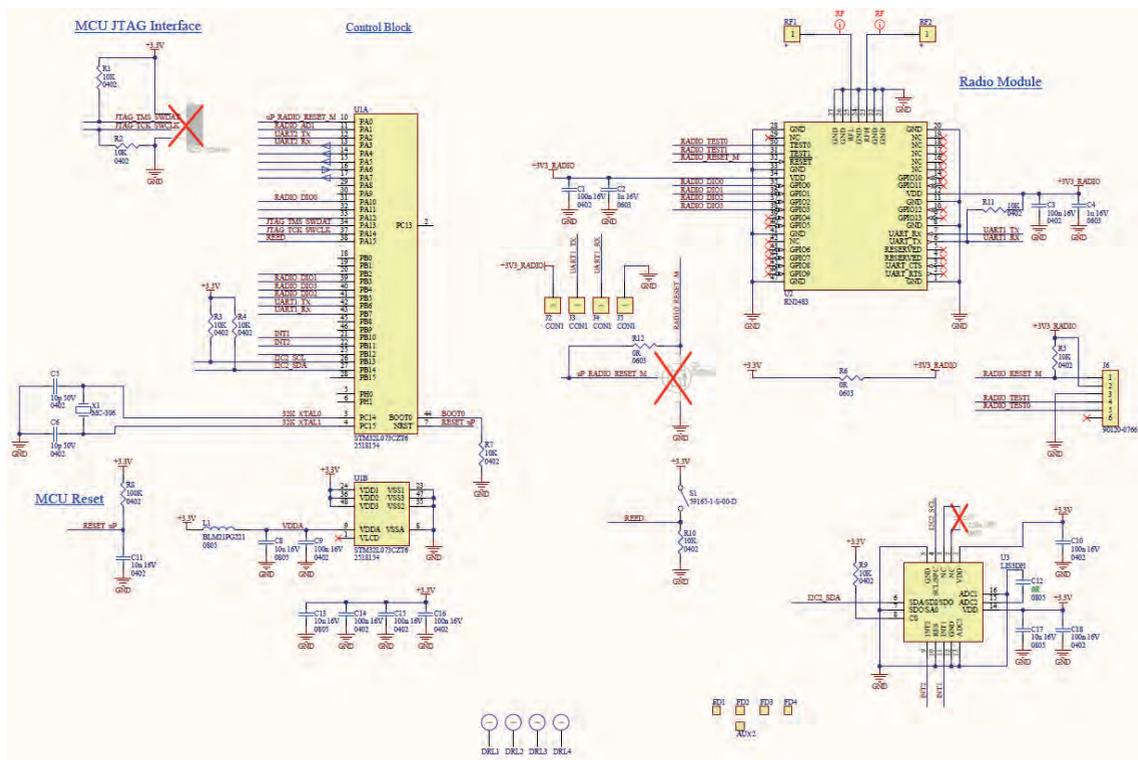
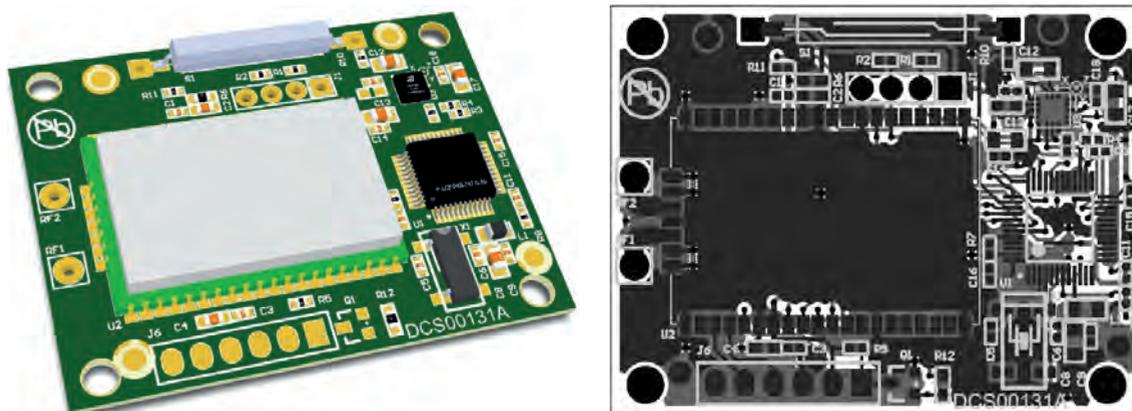


Fig. 1 - Schema elettrico del nodo della *sensor network*.

componente *embedded* che implementa sia la parte radio di LoRa che tutto lo *stack* del protocollo LoRaWAN, ed offre un'interfaccia UART per il collegamento ad un microcontrollore.

Per quanto concerne infine il microcontrollore, cuore del dispositivo, la scelta è ricaduta anche in questo caso su una soluzione STMicroelectronics ed in particolare sulla MCU STM32L073CZT6 (www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l073cz.pdf). Questo componente comprende un microprocessore a 32 bit ARM e diverse periferiche, incluse quelle di comunicazione necessarie per l'interfacciamento con il *device wireless* ed il sensore accelerometrico.

Sulla base delle scelte effettuate, il dispositivo finale che è stato progettato è basato sullo schema elettrico riportato in Fig. 1; in esso, dalle sigle riportate, è possibile individuare la MCU (componente a sinistra), il modulo radio (in alto a destra) e l'accelerometro (in basso a destra). La Fig. 2 riporta invece il *rendering* della *board* e il *layout* completo del PCB. Attraverso tale scheda è stato possibile effettuare la prototipazione dei sensori i quali hanno mostrato uno spessore molto contenuto (max. 8 mm) e un peso leggero, così da non creare difficoltà durante il loro posizionamento.



Monitoraggio aereo del territorio tramite l'uso di sciame di UAV

F. D'URSO¹, F. MESSINA¹, G. PAPPALARDO¹, C. SANTORO¹, L. CANTELLI², D. GUASTELLA², C.D. MELITA² e G. MUSCATO²

¹ Dipartimento di Matematica e Informatica, Università degli Studi di Catania

² Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, Università degli Studi di Catania

L'uso di reti di sensori superficiali costituisce solo una delle possibili tecnologie di monitoraggio del territorio che il team del progetto CLARA ha inteso investigare. Le ispezioni aeree costituiscono una forma alternativa di monitoraggio che consentono di valutare aspetti non considerati dalle reti di sensori. In tal senso, all'interno dell'attività 5.2, è stato sviluppato un sistema di monitoraggio basato su stormi/sciami di velivoli autonomi (UAV, *unmanned aerial vehicles*) i quali, cooperando tra loro, effettuano rilevazioni fotogrammetriche che possono poi essere utilizzate per valutare, *off-line*, il rischio di frana, o analizzare l'evoluzione di frane attraverso il confronto di una serie di immagini acquisite nel tempo della stessa area; inoltre, attraverso l'ispezione aerea è possibile identificare le zone più adeguate al posizionamento delle reti di sensori sviluppati nell'attività 5.1. L'uso di un insieme di UAV, piuttosto che di un singolo velivolo, si rivela una soluzione chiave per assicurare i requisiti di basso costo, riduzione dei tempi di missione e *fault-tolerance*. Considerando infatti che l'area da monitorare si suppone sia abbastanza ampia (ordine delle unità di chilometri), se da una parte l'uso di un classico velivolo con pilota umano comporta costi in genere alquanto elevati, dall'altra l'impiego di un singolo "drone" in volo autonomo non consente la copertura dell'intera area per problemi di autonomia delle batterie. Per ovviare a tali problemi, la soluzione adottata in CLARA è stata quella di considerare un insieme di UAV che, attraverso un volo coordinato (formazione "a stormo"), possano essere in grado di coprire l'intera area; tale soluzione consente da una parte di superare il problema dell'autonomia limitata, in quanto ogni UAV avrà assegnato solo una porzione specifica dell'area, e dall'altra di assicurare costi contenuti. In aggiunta, la presenza di più UAV in volo assicura un elevato grado di tolleranza ai guasti: qualora uno degli UAV dovesse manifestare dei guasti, la collettività potrebbe essere in grado di ri-organizzarsi e assegnare l'area dell'UAV non funzionante ad uno o più tra i velivoli attivi. L'obiettivo dell'attività 5.2 è stato dunque quello di:

1. definire la piattaforma *hardware/software* di riferimento per il singolo UAV;
2. progettare e implementare degli opportuni algoritmi per l'organizzazione in stormo, volo coordinato e copertura di un'area di territorio specifica.

Per quanto concerne l'*hardware*, le parti oggetto di analisi riguardano la struttura meccanica dell'UAV, il sistema di propulsione e l'elettronica per il controllo del volo. Dal punto di vista della meccanica e della propulsione, la scelta è ricaduta sui cosiddetti "multirotori", velivoli a decollo verticale dotati di un numero pari di propulsori (e parimenti di eliche) in grado di operare secondo quattro gradi di libertà. È stato dunque scelto un frame di tipo "esarotore" (vedi Fig. 1, parte sinistra) con un sistema di propulsione con eliche di un diametro fino a 9" (con passo 4.5" o 5"), peso in ordine di volo fino a 1 kg, e autonomia adeguata ai tempi di missione. Per quanto concerne l'*hardware* del sistema di controllo del volo (autopilota), dopo aver valutato lo stato dell'arte, è stata scelta la piattaforma PixHawk (<https://pixhawk.org/>), una soluzione *open* appositamente progettata per il controllo di UAV e UGV; il PixHawk include, al suo interno, una

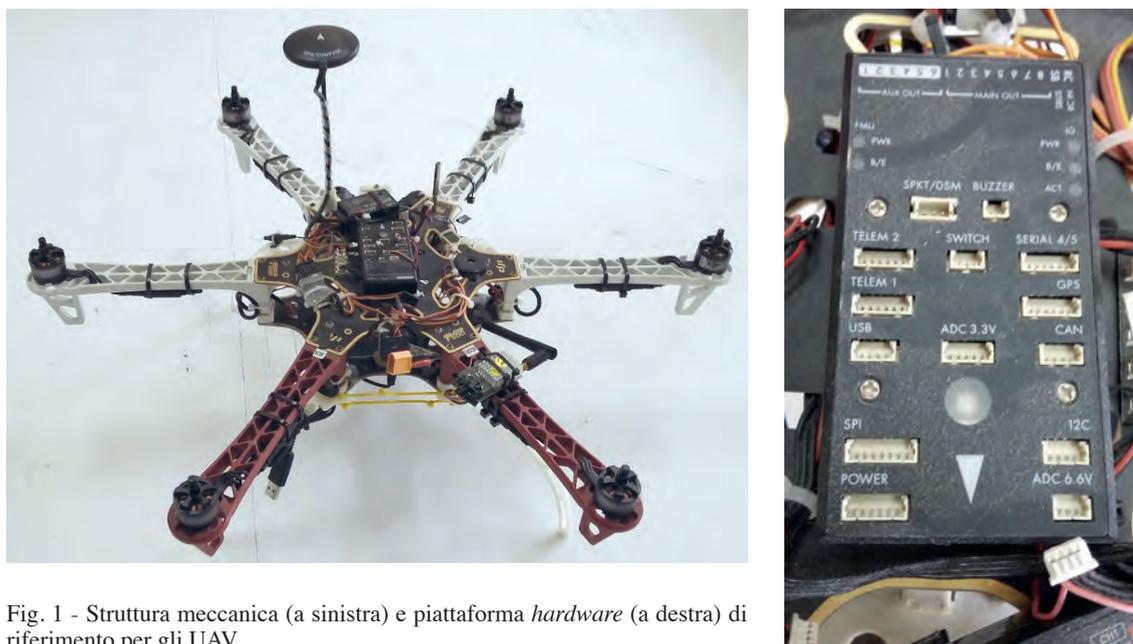


Fig. 1 - Struttura meccanica (a sinistra) e piattaforma *hardware* (a destra) di riferimento per gli UAV.

MCU STM32F7, un *set* di sensori inerziali ridondanti (accelerometro, giroscopio, magnetometro, barometro) e un GPS. Su questa soluzione *hardware* sono in grado di operare diversi *firmware* che implementano il controllo del volo, tra i quali PX4 (<http://pixhawk.org/>) e ArduCopter (<http://ardupilot.org/>), tuttavia i test condotti in laboratorio hanno suggerito l'impiego della seconda soluzione (ArduCopter) in quanto in più versatile dal punto di vista dell'interfacciamento con un *companion computer*. Quest'ultimo componente risulta infatti necessario per l'implementazione dell'algoritmo di volo coordinato (*flocking*) e copertura dell'area da monitorare, componente che, nella soluzione adottata, è costituito da una piattaforma *embedded* di tipo Raspberry PI. La piattaforma *hardware/software* di riferimento è dunque costituita dai seguenti componenti:

- frame esarotore da 550 mm di diametro, con eliche da 9", passo 5";
- controllo di volo basato su PixHawk e firmware ArduCopter;
- controllo di missione basato su Raspberry PI (denominato *companion computer*) su cui girano gli algoritmi descritti nel seguito.

Per quanto concerne gli aspetti relativi alla missione di monitoraggio, lo scenario base consiste in un insieme di UAV, ognuno equipaggiato con un sensore specifico (ad esempio una fotocamera), con il compito di monitorare una certa regione, trasmettendo i dati via via acquisiti ad una *Ground Base Station*. Ogni UAV è dunque equipaggiato, oltre che con i componenti già descritti, con due sistemi di comunicazione *wireless*: uno *long range*, che gli permette di comunicare con la *Ground Base Station*, ed uno *short range*, che gli permette di comunicare con gli altri UAV che concorrono per la missione. Sono state proposte due strategie di controllo missione: la prima (Guastella *et al.*, 2017; 2019) è basata su un algoritmo di pianificazione *off-line* delle aree da assegnare ai vari UAV, la seconda (De Benedetti *et al.*, 2014, 2015; D'Urso *et al.*, 2018, 2019) è incentrata su un approccio decentralizzato che consente agli UAV di auto-organizzarsi in uno stormo con caratteristiche specifiche e determinare dinamicamente un percorso ottimale per l'operazione di scouting/sorvolo dell'area. Il problema in questione è comunque noto in

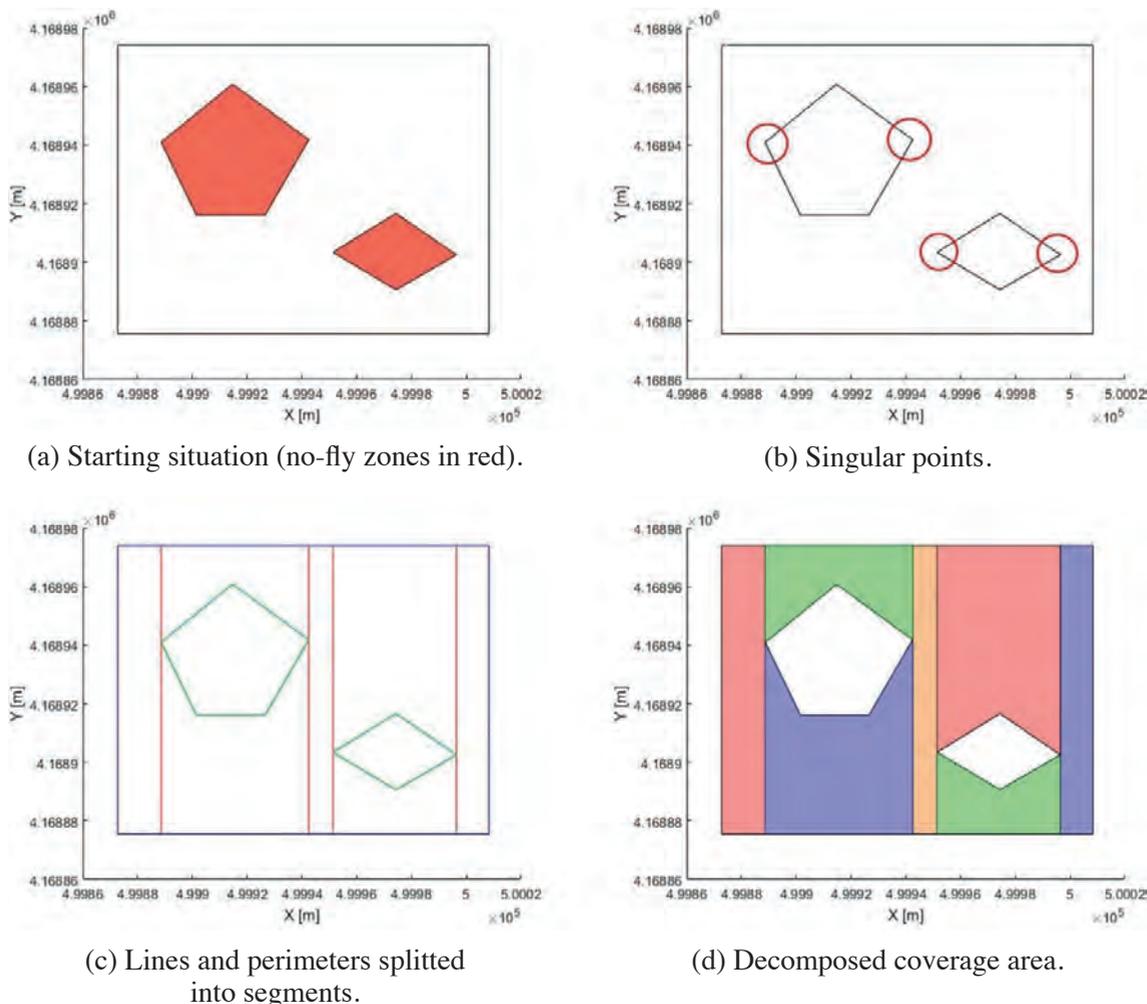


Fig. 2 - Decomposizione di Morse della ROI in sotto-regioni.

letteratura come *Complete Coverage Path Planning (CCPP)* e consiste nel definire una traiettoria che esplora completamente una *Region Of Interest (ROI)*, garantendo comunque l’elusione di eventuali ostacoli (Cao et al., 1988).

Il primo dei due approcci che sono scaturiti dai risultati del progetto CLARA è una tecnica pianificazione *off-line* completa del percorso di *coverage* in cui viene considerata una ROI che include alcune *no-fly zones*, cioè porzioni di territorio in cui il volo è vietato. Posto che la ROI sia opportunamente georeferenziata nell’ambiente, il primo passo consiste nel rappresentare la regione di interesse sotto forma di vista dall’alto 2D; la ROI, che come si è detto può anche includere *no-fly zones* di forma arbitraria, viene suddivisa in diverse regioni *free-to-fly* per mezzo di una tecnica nota come “decomposizione di Morse” (Acar et al., 2002), la quale è specificata nel seguito e mostrata in Fig. 2. Il primo passo della decomposizione consiste nello stabilire la tipologia di *slice*, *verticale* o *orizzontale*, e trovare i “punti singolari” delle *no-fly zones* (Fig. 2b); per ciascun punto singolare viene poi definita una linea parallela alla *slice* stabilita (verticale nel nostro esempio) e che copre tutta la larghezza dell’area da scomporre; se una linea interseca un

bordo di una qualsiasi *no-fly zone* (inclusa anche quella al quale appartiene il punto singolare stesso), tale linea si interrompe all'intersezione più vicina al punto singolare stesso. Una volta definite le linee, queste vengono spezzate in segmenti più piccoli in corrispondenza dei punti singolari, il perimetro dell'area da scomporre e il perimetro delle *no-fly zones* sono spezzati anch'essi in segmenti più piccoli in corrispondenza dei punti singolari o degli angoli (Fig. 2c) e infine, viene eseguito il collegamento di segmenti adiacenti (ovvero quelli che condividono un vertice comune), identificando così le regioni di coverage, libere da ostacoli (Fig. 2d).

Una volta che la ROI è stata suddivisa in sotto-regioni, il passo successivo è generare le traiettorie ottimali per il sorvolo di ogni sotto-regione. In tal senso, gli approcci più utilizzati in letteratura sono il movimento a spirale e quelli avanti-indietro (noto anche come “*back-and-forth*”, “*lawnmower*” o “*boustrophedon*”): la seconda strategia è preferibile in quanto in grado di garantire una coverage completa per qualsiasi tipo di forma (Galceran e Carreras, 2013; Di Franco e Buttazzo, 2016; Torres *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2011). L'algoritmo procede dunque a generare $2(n + 1)$ traiettorie planari per ogni regione, dove n è il numero di lati della sotto-regione in oggetto; vengono cioè considerate sia le traiettorie parallele che perpendicolari rispetto a ciascun bordo di una regione - ottenendo così $2n$ traiettorie - più altre due traiettorie parallele al sistema di riferimento xy della mappa (vedi gli esempi indicati in Fig. 3). Dalle $2(n+1)$ traiettorie occorre sceglierne una: la scelta è effettuata sulla base di aspetti energetici che tengono conto di due fattori: il primo è la lunghezza della traiettoria, mentre il secondo è il numero di “virate” che presenta la traiettoria stessa, le virate fanno infatti parte delle traiettorie e costituiscono una delle principali cause di perdita di tempo ed energia durante un percorso di coverage. In tal senso, il numero di virate viene calcolato secondo la formula:

$$U_{turns} = \frac{N_{lines} + 1}{2}$$

dove N_{lines} è il numero di tragitti di cui è composta la traiettoria.

L'ultima fase dell'algoritmo è la gestione della flotta (*flock*) di UAV in termini di suddivisione dei compiti di coverage tra i velivoli, adottando una strategia con consenta di bilanciare la lunghezza dei percorsi assegnati. Sulla base del numero di UAV scelti per la missione, possiamo considerare due diversi scenari: i) gli UAV sono più delle regioni di coverage; ii) gli UAV sono in numero inferiore o pari alle regioni di coverage. Nel primo scenario, si suddivide la traiettoria più lunga in due parti, questo processo si applica iterativamente fino a quando il numero di traiettorie non sia pari al numero di UAV; a questo punto il primo scenario si trasforma nel secondo. Nel secondo scenario, ad ogni UAV verranno assegnate diverse traiettorie cercando di ottimizzare gli spostamenti da una sotto-regione/traiettoria all'altra. In tal senso, l'algoritmo adottato privilegia le sotto-regioni adiacenti e pianifica il percorso per raggiungere ogni sotto-regione utilizzando l'algoritmo A* migliorato con un approccio *Line-of-Sight* come descritto in Guastella *et al.* (2018).

Un esempio di missione di coverage con una flotta di 3 UAV e 12 regioni è mostrato in Fig. 4. La parte sinistra mostra la suddivisione di Morse della ROI e i punti di partenza dei tre UAV, mentre la parte a destra mostra le traiettorie calcolate e come esse sono state assegnate ai tre UAV impiegati nella missione.

Il secondo algoritmo di volo coordinato e area coverage adotta un approccio diametralmente opposto rispetto a quello già descritto, in quanto si basa su una soluzione completamente

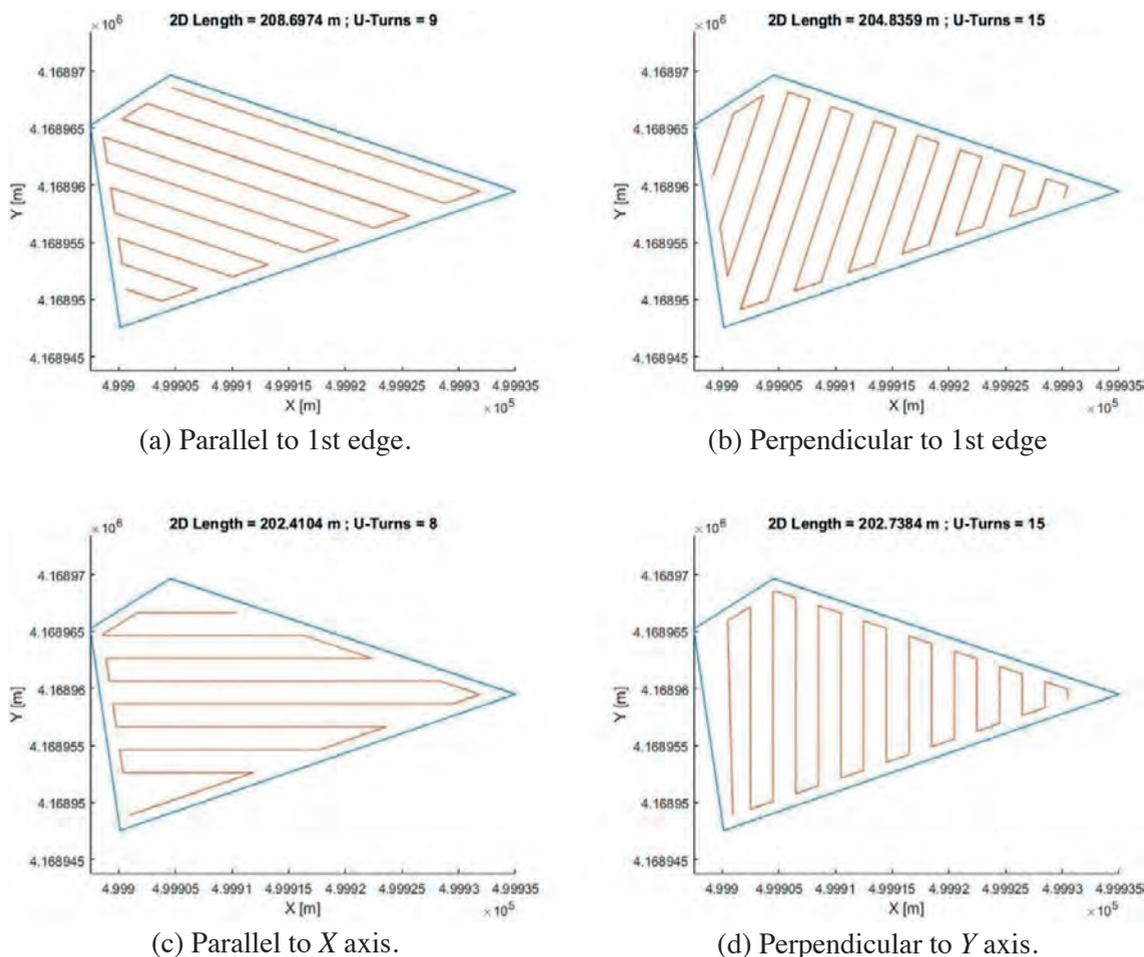


Fig. 3 - Esempi di alcune traiettorie generate per una specifica sotto-regione.

decentralizzata in cui sono gli stessi UAV che, attraverso un meccanismo di comunicazione e coordinamento, si auto-organizzano costantemente durante il volo allo scopo di coprire, al meglio, la ROI. Posto che ogni UAV sia dotato di un sistema di comunicazione *wireless* che gli consente di comunicare almeno con un sottoinsieme di tutti gli UAV usati nella missione, l’approccio si basa su tre meccanismi:

1. costruzione di un *overlay network* che ha lo scopo di consentire la comunicazione e l’interazione tra gli UAV;
2. auto-organizzazione degli UAV in uno “stormo” caratterizzato da una forma ben precisa;
3. pianificazione *on-line* del *path* per la copertura dell’area da monitorare.

L’algoritmo adottato presuppone che ogni UAV sia preventivamente identificato univocamente attraverso un *ID* numerico e che ogni UAV sia in grado di determinare, istante per istante, la propria *posa* (posizione) in termini di latitudine, longitudine, altitudine e angoli di Eulero.

La costruzione dell’*overlay network* ha un duplice scopo. Da una parte è necessario far sì che ogni UAV “conosca” tutti gli altri UAV dello stormo: sebbene la composizione della flotta

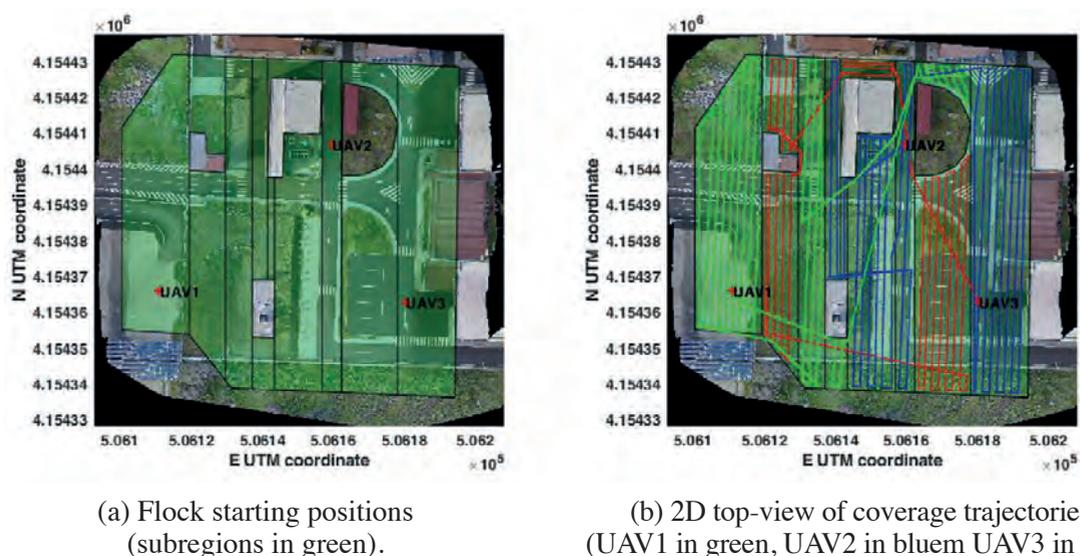


Fig. 4 - Esempio di percorsi pianificati con un gruppo di 3 UAV e 12 regioni da coprire.

di velivoli è sicuramente prefissata a inizio missione, è possibile che si verifichino dei *fault* in volo e che qualche UAV non sia più funzionante, in tal caso è necessario che tutti gli UAV siano informati dell'evento. Il secondo obiettivo dell'*overlay network* è permettere la comunicazione tra i vari UAV: occorre infatti considerare che, come già detto, si ipotizza la presenza, a bordo di ogni UAV, di un sistema di comunicazione *wireless short range*, il quale (per ragioni di consumo di energia) non è detto che riesca a coprire l'intero stormo ma sia in grado di raggiungere solo gli UAV più vicini, pertanto la presenza di un *overlay network* permette, attraverso un opportuno meccanismo di *forwarding* dei pacchetti, la comunicazione anche con gli UAV più lontani. La costruzione dell'*overlay network* si basa utilizza una tecnica semplice ma efficace che sfrutta un meccanismo di *gossiping*: ogni UAV invia periodicamente, in *broadcast*, le informazioni che esso possiede sulla composizione dello stormo le quali verranno ricevute dagli UAV "vicini"; questi ultimi, ricevuti i dati, integreranno le ulteriori informazioni a loro note e inoltreranno i dati così composti, in *broadcast*, ai propri vicini. Questo algoritmo, che viene eseguito periodicamente, consentirà via via ad ogni UAV di conoscere le seguenti informazioni: i) chi sono gli UAV dello stormo e qual è l'ID di ognuno di essi, ii) qual è la posa corrente di ogni UAV, iii) l'*hop count* (numero di salti) che un pacchetto dovrà fare per raggiungere un certo UAV.

Uno degli aspetti chiave dell'approccio basato sul volo coordinato è invece l'algoritmo di *flocking*, cioè quello che consente agli UAV di auto-organizzarsi in una formazione di volo ben definita. Il modello sfrutta i principi degli algoritmi di *flocking* noti in letteratura e basati sulle classiche regole di *separazione*, *coesione* e *allineamento* (Reynolds, 1987; Buraqadi e Doniec, 2009; Vasarhelvi *et al.*, 2014) le quali, applicate localmente ad ogni UAV, sono in grado di creare globalmente uno stormo e mantenerlo:

- **R1 - Separazione:** questa regola ha l'obiettivo di assicurare una distanza minima di sicurezza tra gli UAV per evitare possibili collisioni;
- **R2 - Allineamento:** questa regola permette di assicurare che tutti gli UAV mantengano la stessa direzione di movimento;

- **R3 - Coesione:** questa regola permette di garantire che lo stormo sia sempre coeso e che gli UAV non tendano ad allontanarsi, evento che, qualora si verificasse, potrebbe causare un partizionamento dello stormo stesso, condizione da evitare assolutamente.

Nella soluzione proposta, il comportamento di ogni regola è opportunamente adattato allo scopo di assicurare una forma specifica, per lo stormo, la quale è derivata a partire dalle esigenze dell'applicazione di monitoraggio. Nel nostro caso, l'obiettivo applicativo è quello di ricoprire una certa area fisica utilizzando un percorso ed una forma di *flock* ottimali in modo da evitare passaggi multipli, su una stessa area, da parte di più UAV. Questo fenomeno, al quale possiamo attribuire il nome di *over-covering*, deve essere minimizzato utilizzando un'opportuna formazione: in realtà, qualunque forma che vincoli gli UAV a volare "fianco a fianco" è in grado di scongiurare l'*over-covering*, mentre ogni altra forma in cui uno o più UAV volano "davanti" (o "dietro") un altro UAV non è adeguata, in quanto qualcuno dei soggetti andrebbe necessariamente a sorvolare una zona già parzialmente coperta da un altro UAV. La Fig. 5 mostra alcuni esempi: nel caso (a), le aree che verranno coperte dagli UAV 1 e 7 sono già state coperte dagli UAV 2, 3, 5 e 6; in tutti gli altri casi invece (casi b, c, d), nei quali gli UAV volano fianco a fianco, il fenomeno di *over-covering* è completamente evitato. Qualsiasi formazione dello stormo che soddisfi questa

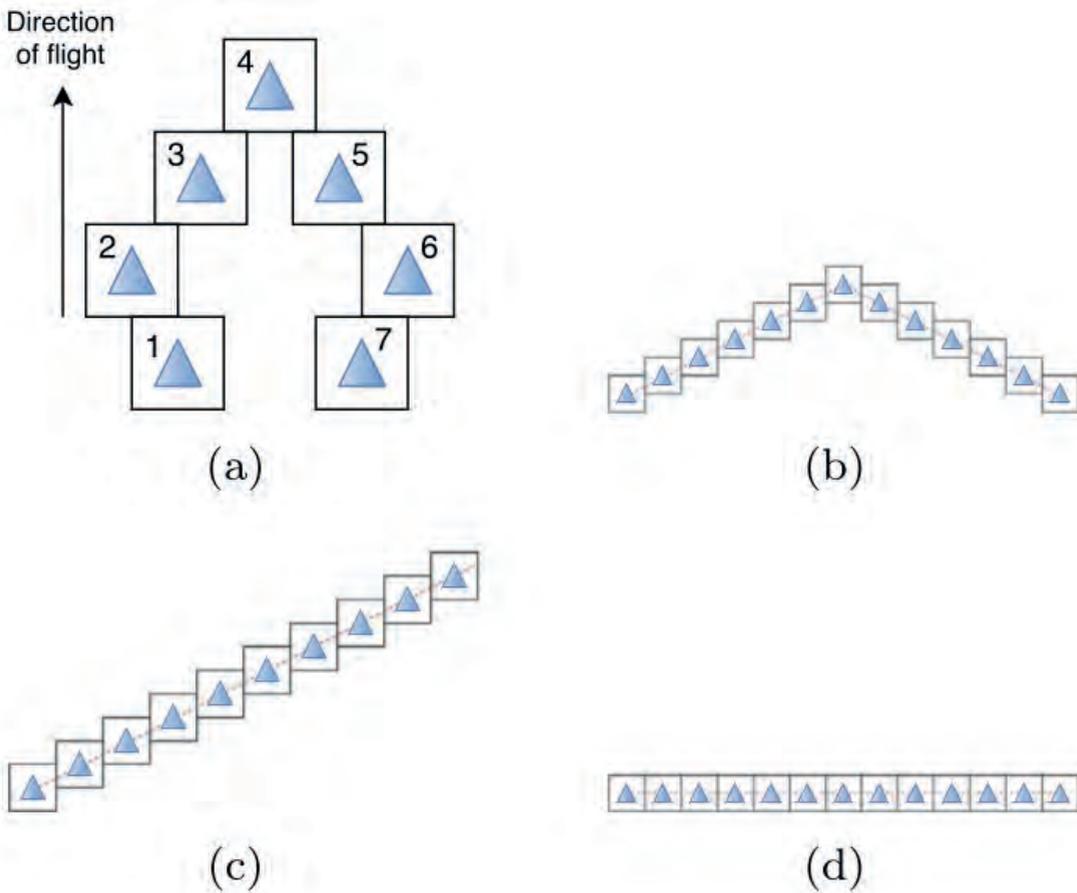
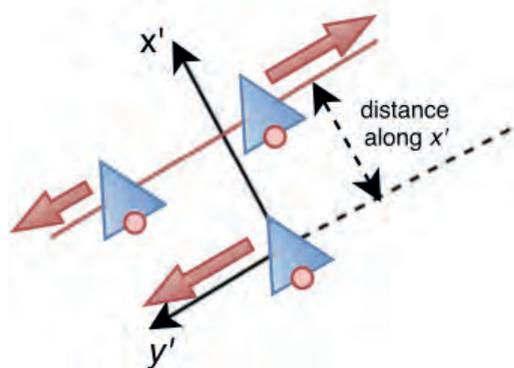


Fig. 5 - Esempi di formazioni di UAV in stormo.

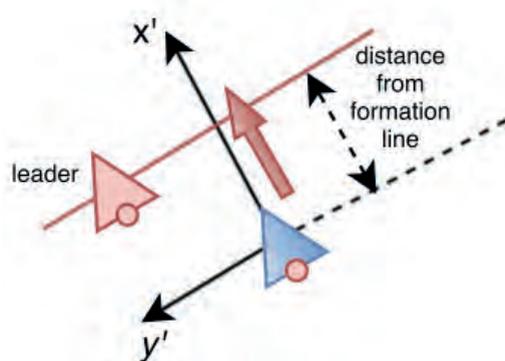
caratteristica, come la formazione a “V” o quella lineare, possono calzare perfettamente con i requisiti dell’applicazione di monitoraggio. Nel nostro caso specifico, la *flock shape* presa come riferimento è quella basata sul posizionamento lineare degli UAV lungo una linea di formazione, perpendicolare alla direzione di volo (caso d).

L’algoritmo di *flocking* opera applicando le regole R1, R2 ed R3 le quali sono state opportunamente progettate per consentire proprio il volo in formazione lineare. Detta *linea di formazione* la linea perpendicolare alla direzione di volo che passa dai centri di ogni velivolo, ogni UAV esegue, periodicamente, i seguenti passaggi:

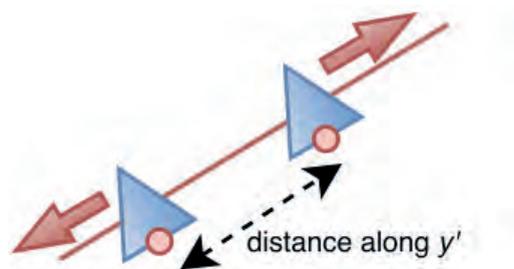
1. selezione del Leader. L’UAV che possiede il numero di ID più piccolo è selezionato come *leader* in dettaglio, se un UAV verifica che il proprio ID è il più piccolo, esso si auto-elegge come *leader* ed esegue l’algoritmo di *path planning* descritto più avanti; se invece un ID riconosce di non essere *leader*, identifica quale UAV è diventato *leader* ed esegue i passi successivi dell’algoritmo di *flocking*;
2. applicazione regola R1 - Separazione (*UAV non-leader*). L’obiettivo di questa regola è quello di non solo evitare collisioni ma anche far sì che gli UAV creino un spazio adeguato al fine di ospitare un nuovo UAV nella formazione; come illustra la Fig. 6, se è presente un UAV vicino alla linea di formazione, ma non allineato, gli altri UAV si allontanano in modo da permettere l’ingresso del nuovo elemento; in caso contrario, cercano comunque di mantenere una distanza mutua (sulla linea di formazione) che non sia inferiore ad una certa soglia predeterminata;



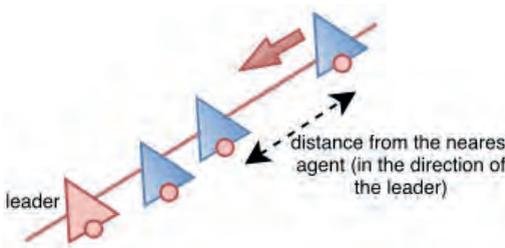
(a) Repulsion force, component c_a



(a) Cohesion force, component x



(b) Repulsion force, component c_b



(b) Cohesion force, component y

Fig. 6.

Fig. 7.

3. applicazione regola R2 - Allineamento (*UAV non-leader*). Questa regola ha l'obiettivo di assicurare la giusta direzione dell'UAV secondo la linea di formazione, obiettivo che viene raggiunto "copiando" l'orientamento del *leader*;
4. applicazione regola R3 - Coesione (*UAV non-leader*). L'obiettivo di questa è mantenere gli UAV adeguatamente vicini assicurando che la forma della formazione desiderata venga creata e mantenuta; come mostra la Fig. 7, vengono applicate due tipologie di "forze di coesione"; la prima, perpendicolare alla linea di formazione, consente ad un UAV fuori formazione di allinearsi con gli altri; la seconda, parallela alla linea di formazione, assicura che l'UAV non si allontani troppo dagli altri UAV;
5. pianificazione del percorso (*solo UAV leader*). La pianificazione del percorso ottimale è effettuata dall'UAV *leader* il quale, grazie ai messaggi scambiati continuamente per la creazione e mantenimento dell'overlay network, è in grado di conoscere le parti della ROI già coperte e quelle ancora da ricoprire; sulla base di queste informazioni, nota la "larghezza" dello stormo, il *leader* è in grado di pianificare un percorso a "zig zag" per la copertura delle parti da monitorare e, conseguentemente, seguire il percorso pianificato; tutti gli altri UAV, applicando le regole del *flocking*, seguiranno il *leader*, monitorando, a loro volta, le zone sulle quali sorvoleranno.

Uno degli obiettivi principali di questo secondo algoritmo di area *coverage* è quello di fornire una soluzione con un buon grado di tolleranza ai guasti. Questo aspetto si traduce nell'assicurare (in una certa misura) che il guasto di uno o più UAV non comprometta la missione, la quale deve essere portata ugualmente a termine. In altre parole, se un UAV si guasta, lo stormo deve proseguire il suo lavoro senza interruzioni e, infine, completare la missione recuperando pure le parti di area andate perse a causa dell'UAV guasto. L'approccio proposto ha questa caratteristica: se un UAV subisce un guasto, esso non manderà più la sua posizione pertanto, attraverso un meccanismo di *timeout*, le informazioni sull'UAV guasto saranno via via rimosse e l'algoritmo di *flocking* proseguirà considerando solo gli UAV funzionanti; allo stesso modo, il *leader* pianificherà un percorso tale da includere pure le parti relative all'UAV guasto che saranno ovviamente andate perdute.

BIBLIOGRAFIA

- Acar E.U., Choset H., Rizzi A.A., Atkar P.N. e Hull D., 2002, *Morse decompositions for coverage tasks*. Int J Robot Res.
- Bouraqadi N. e Doniec A., 2009, *Flocking-based multi-robot exploration*. In Proceedings of the 4th National Conference on Control Architectures of Robots, Toulouse, France.
- Cao Z.L., Huang Y. e Hall E.L., 1988, *Region filling operations with random obstacle avoidance for mobile robots*. J Robot Syst;5(2):87-102.
- De Benedetti M., D'Urso F., Messina F., Pappalardo G. e Santoro C., 2014, *Self-Organising UAVs for Wide Area Fault-tolerant Aerial Monitoring*. WOA 2015: 135-141.
- De Benedetti M., D'Urso F., Messina F., Pappalardo G. e Santoro C., 2015, *UAV-based Aerial Monitoring: A Performance Evaluation of a Self-Organising Flocking Algorithm*. 3PGCIC 2015: 248-255
- Di Franco C. e Buttazzo G., 2016, *Coverage path planning for UAVs photogrammetry with energy and resolution constraints*. J Intell Robot Syst.
- D'Urso F., Santoro C. e Santoro F.F., 2018, *Integrating Heterogeneous Tools for Physical Simulation of multi-Unmanned Aerial Vehicles*. WOA 2018: 10-15
- D'Urso F., Santoro C. e Santoro F.F., 2019, *An integrated framework for the realistic simulation of multi-UAV applications*. Computers & Electrical Engineering 74: 196-209 (2019)
- Galceran E. e Carreras M., 2013, *A survey on coverage path planning for robotics*. Rob Auton Syst.

- Guastella, D. C., Cantelli, L., Melita, C. D. e Muscato, G., 2017, *A Global Path Planning Strategy for a UGV from Aerial Elevation Maps for Disaster Response*. In ICAART (1) (pp. 335-342).
- Guastella D.C., Cavallaro N.D., Melita C.D., Savasta M. e Muscato G., 2018, *3D path planning for UAV swarm missions*. In: Proc. of the 2nd Int. Conf. on mechatronics systems and control engineering; p. 33-7.
- Guastella D.C., Cantelli L., Giammello G., Melita C.D., Spatino G. e Muscato G., 2019, *Complete coverage path planning for aerial vehicle flocks deployed in outdoor environments*. Computers & Electrical Engineering, 75, 189-201.
- Li Y., Chen H., Er M.J., Wang X., 2011, *Coverage path planning for UAVs based on enhanced exact cellular decomposition method*. Mechatronics;21(5):876-85.
- Reynolds C., 1987, *Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model*. In Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH '87, pages 25-34, New York, NY, USA, ACM.
- Torres M., Pelta D.A., Verdegay J.L., Torres J.C., 2016, *Coverage path planning with unmanned aerial vehicles for 3d terrain reconstruction*. Expert Syst Appl; 55:441-51.
- Vasarhelyi G. et al., 2014, *Outdoor flocking and formation flight with autonomous aerial robots*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, IROS '14, pages 3866-3873, Chicago, IL, USA.

Robot bio-ispirati per il posizionamento dei sensori

P. ARENA e L. PATANÈ

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, Università degli Studi di Catania

Se da una parte l'uso di velivoli permette di effettuare ispezioni visive delle aree da monitorare e rilasciare sensori in zone di territorio impervie, qualora le zone interessate siano anche ricoperte da fitta vegetazione, la via terrestre diventa l'unica adeguata, tuttavia l'impossibilità di raggiungere le aree con un operatore umano rende necessario l'uso di sistemi alternativi. In tal senso, l'impiego di "sistemi robotici" particolari risulta fondamentale e, tra le possibili scelte, le "strutture robotiche bio-ispirate" sono sicuramente degne di investigazione. I "robot bio-ispirati" sono infatti sistemi artificiali la cui struttura e locomozione è ispirata a caratteristiche del mondo animale e, specificatamente, agli individui che hanno naturali capacità di adattamento a terreni altamente incerti e non strutturati. Seguendo tale linea, all'interno del progetto CLARA, sono stati presi in considerazione strutture aventi "zampe" (quadrupedi, esapodi o ottapodi), dotati di sistemi avanzati ed adattativi di locomozione che favoriscono l'opportunità di muoversi agevolmente su terreni accidentati e non strutturati sui quali i tradizionali veicoli su ruote incontrano notevoli difficoltà.

Nello studio di un sistema robotico bio-ispirato, occorre tenere in considerazione due aspetti cardine. Il primo è quello relativo alla struttura meccanica del sistema di locomozione il quale è caratterizzato da scelte quali il "numero di arti" e la "capacità motoria" di ogni arto (numero e tipologia di giunti per arto); il secondo è quello del "controllo sincronizzato" dei giunti degli arti, operazione necessaria affinché il robot possa deambulare opportunamente.

Per quanto concerne il primo aspetto, la scelta è ricaduta su una struttura "esapode" (vedi Fig. 1). Il prototipo di robot realizzato presenta dunque sei zampe, ognuna con tre gradi di libertà e da tre servomotori in grado di controllare i giunti di "anca", "femore" e "tibia", per un totale di 18 attuatori; il robot è una versione modificata del PhantomX Hexapod Mark II di Interbotix Labs,

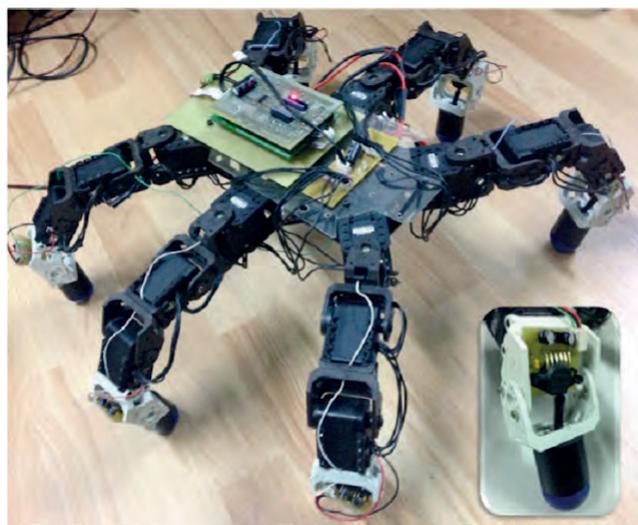


Fig. 1 - Robot Esapode.

il quale è stato customizzato includendo, come piattaforma di controllo, una scheda Arduino-Uno ed equipaggiando le tibie con sensori di pressione MPX5010GP; tali sensori sono dei trasduttori piezoresistivi in silicio in grado di fornire un'uscita analogica accurata proporzionale alla pressione applicata e si sono rivelati particolarmente utili per la modifica dei segnali di locomozione in funzione del carico delle varie zampe.

L'aspetto relativo alla struttura meccanica della locomozione è poi accompagnato dalla strategia di pilotaggio degli attuatori relativi alle zampe, strategia necessaria per consentire l'adeguato movimento; anche per tale aspetto si è preso spunto dalla biologia emulando, in particolare, le "strutture neurali" che gli insetti esapodi possiedono. In natura, numerosi animali adottano, per la locomozione, modelli ritmici convenzionali standardizzati, dettati da una "unità funzionale" di controllo neurale; tra i modelli neurali artificiali che descrivono tali dinamiche di locomozione, il *Central Pattern Generator (CPG)* è sicuramente il maggiormente diffuso: questo approccio modella le strutture presenti nel sistema nervoso che contengono i meccanismi necessari alla generazione di schemi stereotipati di locomozione, fornendo segnali di pre-azione (anche in assenza di *feedback* sensoriale) necessari alla deambulazione e ad un controllo di alto livello (Arena P. *et al.*, 1999, 2015; Arena E. *et al.*, 2011). La struttura del CPG è indicata in Fig. 2: qui i neuroni centrali B1, B2 e B3 costituiscono il cosiddetto *backbone* il quale ha il compito di generare i segnali per sincronizzare i neuroni laterali, etichettati con L1, L2, L3, R1, R2 e R3, e denominati *motoneuroni*, i quali sono responsabili del movimento delle sei zampe.

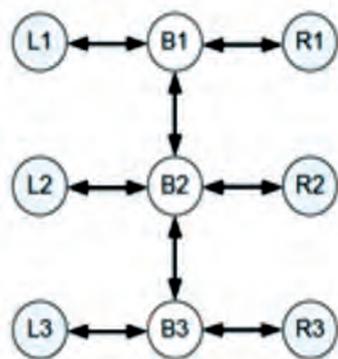


Fig. 2 - Modello neurale *Central Pattern Generator*.

Una delle possibili implementazioni hardware del CPG è rappresentata dalle reti cellulari non lineari (CNN), le quali consistono in *array* multi-dimensionali di sistemi dinamici non-lineari localmente accoppiati. Al fine di generare un CPG, vengono imposti determinati sfasamenti tra le celle che compongono la CNN, in modo che l'intera rete raggiunga un regime di sincronizzazione di tipo *phase-shift*. Considerando che le celle della CNN rappresentano il moto nei neuroni del robot, le fasi raggiunte dalle celle stesse corrispondono ad altrettanti sfasamenti nelle zampe del robot che, conseguentemente, innescano una andatura specifica. Come illustra la Fig. 3, ogni zampa ha una fase di contatto con il terreno (fase di *stance*, barra di colore bianco) ed una fase di sollevamento (fase di *swing*, barra di colore nero), e la durata di tali fasi, nonché la relazione temporale con le altre zampe, caratterizza la tipologia di moto. In Fig. 3 sono riportate tre diverse andature periodiche tipiche degli esapodi: da sinistra verso destra, lenta, media e veloce, detta



Fig. 3 - Schemi di tre diverse andature periodiche degli esapodi.

anche “tripode alternato”. Questa ultima andatura è quella più comune nella classe degli esapodi: le zampe che compongono i due “tripodi” - R1, R3, L2 e L1, L3, R2 - vengono mosse in modo sincrono, mentre i due tripodi si trovano in opposizione di fase tra loro. Gli altri tipi di andature non sono altro che una modifica di quella veloce di base, mediante una modulazione del ritardo di ciascuna zampa rispetto alle altre appartenenti allo stesso tripode.

Il modello del CPG mostrato in Fig. 2 è adatto a supportare le andature di locomozione indicate, ma non tiene conto dell’eventuale *feedback* del terreno che, nel robot prototipato, è invece fornito dai sensori di pressione. Questo dettaglio risulta essere particolarmente importante quando si considerano i terreni accidentati, in quanto un’informazione che permetta di identificare se una zampa sta supportando il robot e sta costituendo un valido punto di appoggio risulta fondamentale per consentire la corretta deambulazione e l’assenza di cadute. A tale scopo, la rete neurale di Fig. 2 è stata modificata secondo il modello mostrato in Fig. 5 in cui vengono utilizzati i segnali di *feedback* provenienti dai sensori: da una rete connessa a grafo non diretto, si passa ad una grafo diretto nella quale il blocco dei neuroni driver D1-D2 genera il pattern di locomozione di base (nel dettaglio si tratta di un controllo in antifase basato sui due oscillatori neurali D1 e D2). Da tale blocco si diramano due catene laterali, una per ciascun tripode, interfacciate tramite gli interneuroni I1 e I2. I motoneuroni (L1, L2, L3 e R1, R2, R3) sono dunque collegati agli interneuroni e, ognuno di essi, contiene due variabili di stato le quali controllano anca e femore

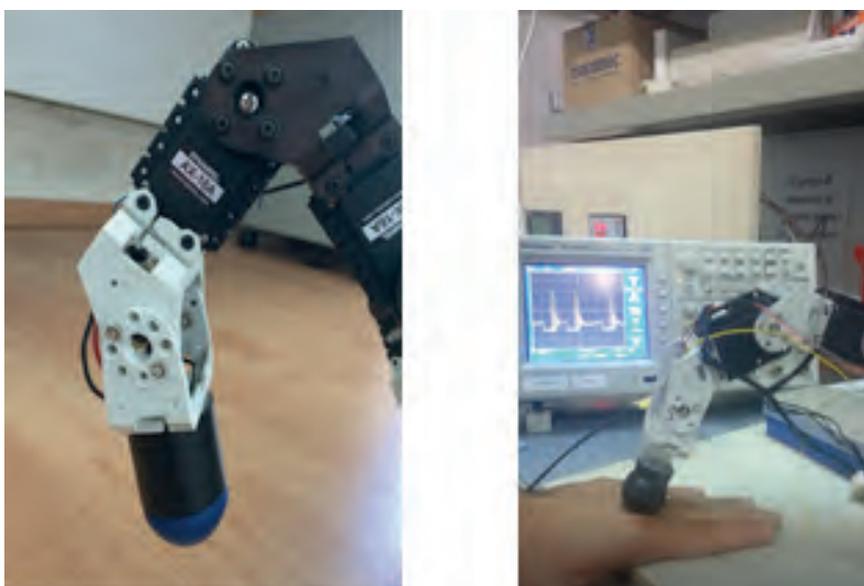


Fig. 4 - Particolare del sensore di pressione montato sulla tibia e sua caratterizzazione.

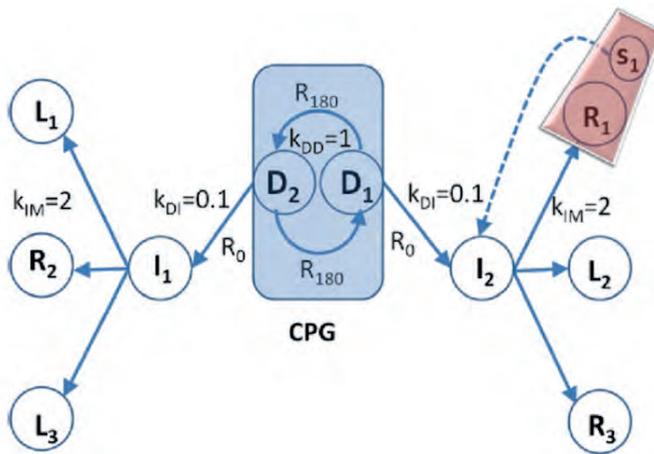


Fig. 5 - Modello CPG modificato per considerare il feedback dei sensori di pressione.

della zampa associata; il controllo della tibia è invece ottenuto da una modulazione del segnale di controllo del femore, ossia la sua posizione angolare viene aumentata o diminuita, durante il movimento, aggiungendo un angolo opposto rispetto a quello usato per il femore, per mantenere il piede perpendicolare al terreno. I due interneuroni (I1, I2), uno per ciascun tripode, sono controllati dai driver dei neuroni CPG (D1, D2). Questi stabiliscono la frequenza nominale e impongono lo sfasamento desiderato per gli interneuroni al fine di realizzare il tipo di locomozione desiderato.

Il *feedback* è generato dai sensori che producono segnali proporzionali alla pressione rilevata. Questi segnali (S1 in Fig. 5) modulano, in modo proporzionale, il valore delle uscite del corrispondente interneurone ogni volta che la zampa è in fase di appoggio; in particolare, se la zampa è in *stance*, la legge di controllo diminuisce la frequenza di oscillazione, e tutti i motoneuroni associati con questo interneurone seguono le stesse dinamiche al fine di non perdere la corrispondenza di fase tra i motoneuroni dello stesso tripode. In questo schema di *feedback*, il guadagno dal motoneurone verso il corrispondente interneurone (indicato con K_{DI} in figura) deve essere abbastanza debole per consentire questa temporanea deviazione in frequenza mentre il guadagno dagli interneuroni ai motoneuroni (indicato con K_{IM} in figura) deve essere alto per garantire che questa nuova frequenza, imposta dai neuroni sensoriali, sia adottata da tutti i motoneuroni appartenenti allo stesso tripode. In questo modo l'andatura complessiva è ancora un tripode ma con la fase di *stance* rallentata.

Il robot prototipato è stato oggetto di una serie di test volti a verificare il corretto comportamento del modello neurale sia in assenza che in presenza del segnale di feedback da parte dei sensori. Nel primo esperimento la retroazione da tutti i sensori di pressione posti nelle zampe è stata disabilitata ma i segnali dei sensori sono stati comunque acquisiti e confrontati con l'andamento del moto, come mostra la Fig. 6 la quale riporta il segnale di uscita (saturato) del motoneurone R2 insieme al segnale acquisito dal sensore di pressione posizionato in R2. L'andamento del sensore di pressione rileva chiaramente le fasi di *swing* e *stance* nell'oscillazione della zampa R2, tuttavia, non ha luogo alcuna modulazione nella dinamica del motoneurone. Questa tipologia di test si è rivelata utile per testare l'affidabilità dei sensori e anche per mettere a punto il suo valore di soglia.

Nel successivo esperimento, il *feedback* è stato abilitato per tutti i sensori di pressione posizionati nelle zampe. Riferendosi a ciascun tripode, la strategia adottata è stata la seguente:

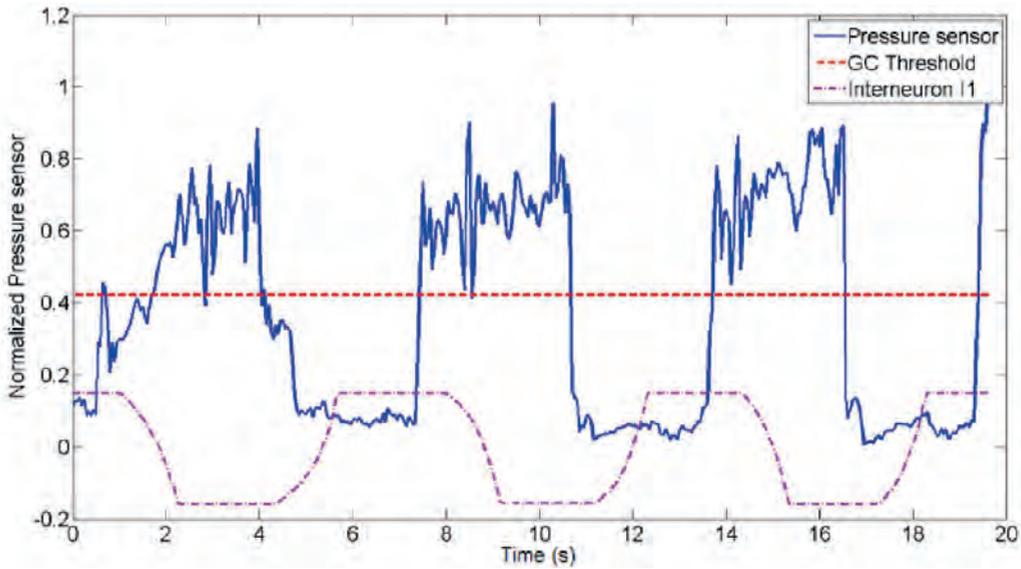


Fig. 6 - Uscita del motoneurone R2 e relativo sensore di pressione.

quando il valore del segnale acquisito dal sensore di pressione di una zampa del tripode supera una certa soglia, questo segnale agisce sul corrispondente interneurone (I1 per il tripode di R2 e I2 per il tripode L2) diminuendone la frequenza di oscillazione; tutte le zampe di quel tripode diminuiranno conseguentemente la loro frequenza di oscillazione e la fase di *stance* si svolgerà a bassa velocità. Quando il valore della pressione scende invece sotto la soglia per tutte le zampe appartenenti al tripode, si presume che tutte le zampe del tripode abbiano rilasciato il terreno e che si trovino nella fase di *swing*; il sensore ripristina allora la frequenza di oscillazione dell'interneurone corrispondente al proprio valore nominale e la fase di *swing* si svolgerà dunque alla velocità

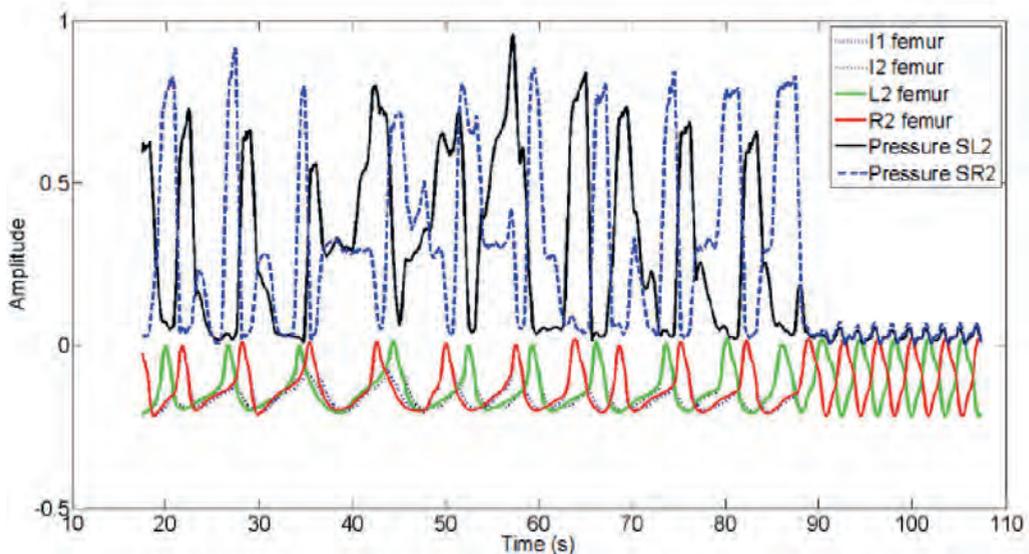


Fig. 7 - Variabili di stato di I1, I2, L2 e R2, e segnali acquisiti dai sensori delle zampe L2 e R2.

nominale. L'andamento delle uscite dei motoneuroni, in questo esperimento, è riportato in Fig. 7 che mostra le variabili di stato degli interneuroni I1 e I2, insieme con i segnali acquisiti dai sensori delle zampe R2 e L2. La figura mostra chiaramente che quando i sensori di pressione rilevano in modo affidabile il contatto con il terreno, la dinamica del corrispondente interneurone è rallentata; invece, durante la fase di *swing*, la frequenza di oscillazione viene ripristinata al valore nominale. Durante l'intervallo di tempo finale di Fig. 7, il robot è stato sollevato per alcuni secondi da terra: i segnali dei sensori di pressione si mantengono sotto la soglia, quindi nessuna modulazione di frequenza è imposta e i segnali relativi a I1 e R2, e a I2 e L2 sono pressoché identici.

Come ulteriore esperimento per verificare la capacità di movimento in ambienti diversi, il *robot* è stato fatto camminare su un percorso semplice con scalini alti 6 cm; l'obiettivo è stato quello di consentire la rilevazione degli scalini attraverso i sensori di pressione e adattare lo spostamento della zampa verticalmente per cercare un contatto affidabile con il terreno. Lo scenario è riportato in Fig. 8 insieme al diagramma di *stepping* dei tripodi. Il robot mostra

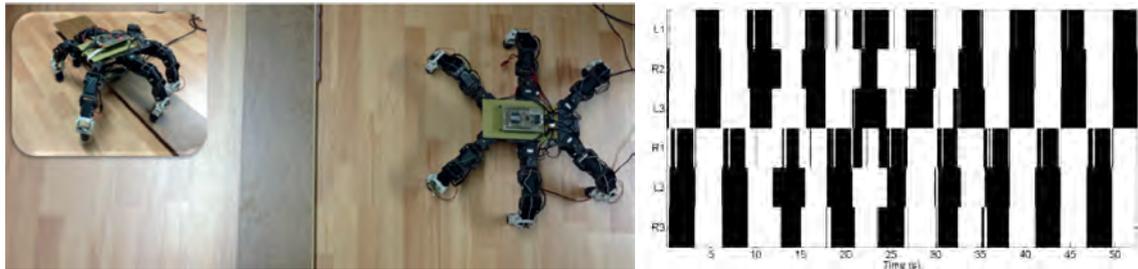


Fig. 8 - Scenario di riferimento (a sinistra) e grafico dell'andamento delle fasi dei tripodi (a destra).

un'andatura di base modificata dall'influenza dei sensori di pressione, che a loro volta modulano la costante di tempo delle equazioni dinamiche che governano gli interneuroni per enfatizzare la dinamica lenta/veloce durante le fasi di *stance/swing*. Il riflesso relativo alla ricerca dello scalino ("riflesso di ricerca" appunto) può essere altresì apprezzato in Fig. 9, che mostra l'evoluzione temporale degli angoli dei giunti di anca (coxa) e femore delle zampe del lato destro del robot

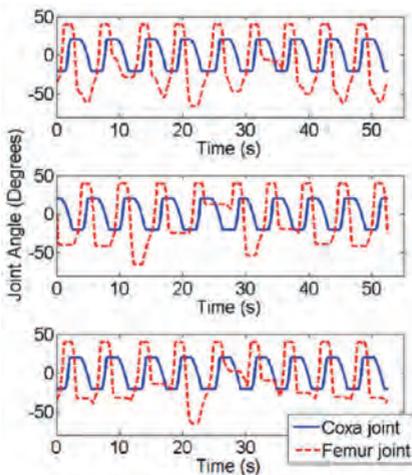


Fig. 9 - Andamento degli angoli di anca e femore durante l'arrampicamento del robot.

durante una prova di arrampicamento sperimentale. Sia la durata della fase di appoggio che la l'escursione dell'articolazione del femore sono controllate dall'informazione proveniente dai sensori di pressione utilizzati per identificare la condizione di contatto con il terreno (quindi l'inizio della fase di *stance*): se, durante la fase di appoggio, manca il contatto con il terreno (ad esempio c'è un dislivello nel terreno o se il robot incontra uno scalino, oppure se una zampa perde il contatto con il terreno durante l'arrampicata), la zampa modula il proprio movimento per conformarsi al livello del terreno. Il riflesso di ricerca, in caso di mancanza contatto, continua fino a quando viene rilevato un contatto attraverso i sensori di pressione o fino a un limite inferiore nel movimento del giunto.

BIBLIOGRAFIA

- Arena E., Arena P., e Patané L., 2011, *Efficient Hexapodal Locomotion Control Based on Flow-Invariant Subspaces*, at 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC), Milan, Italy, Aug. 28-Sept. 20 II.
- Arena P., Fortuna L., Branciforte M., 1999, *Reaction-Diffusion CNN Algorithms to Generate and Control Artificial Locomotion*, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS I: FUNDAMENTAL THEORY AND APPLICATIONS, VOL. 46, NO. 2.
- Arena, P. Furia, L. Patané and Pollino M., 2015, *Fly-inspired sensory feedback in a reaction-diffusion neural system for locomotion control in a hexapod robot*, 2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), Killarney, 2015, pp. 1-8. doi: 10.1109/IJCNN.2015.7280544.

Sensore per rilevazione di movimenti orizzontali del terreno

A. ASTUTI e S. CHILLARI

Meridionale Impianti, Caponago (MB)

I sistemi citati, ossia ispezione visiva e reti di sensori, sono in grado di monitorare egregiamente i movimenti della parte superficiale di un'area di terreno sottoposta a controllo, tuttavia non consentono di identificare eventuali spostamenti che avvengono in profondità e che sono dovuti a dissesto idrogeologico. A tal proposito, le sonde inclinometriche rappresentano oggi uno dei metodi più diffusi per avere una misura efficace dei movimenti degli strati interni del terreno: l'obiettivo dell'attività 5.4 all'interno del progetto CLARA è stato dunque quello di estendere la tecnologia WSN, introdotta nell'attività 5.1, al rilevamento delle frane in profondità attraverso l'integrazione di sonde inclinometriche appositamente progettate per lo scopo.

Una sonda inclinometrica è composta da una parte fissa ed una mobile; la prima è costituita da un tubo metallico all'interno del quale una guida consente lo scorrimento della parte mobile; il tubo è inserito in profondità all'interno del terreno in posizione verticale in modo che gli eventuali spostamenti degli strati sotterranei possano deformarlo; all'interno del tubo scorre la parte mobile che contiene il sensore vero e proprio (la sonda) il quale legge le deformazioni sulla base della differente inclinazione (rispetto alla verticale) delle varie parti del tubo in cui è effettuato lo scorrimento.

Dal punto di vista meccanico, la sonda è costituita da tre parti principali: il "box sensore", il "blocco mobile" e il "tubo-guida". Il "box sensore" (vedi Fig. 1) è il contenitore dove viene inserita

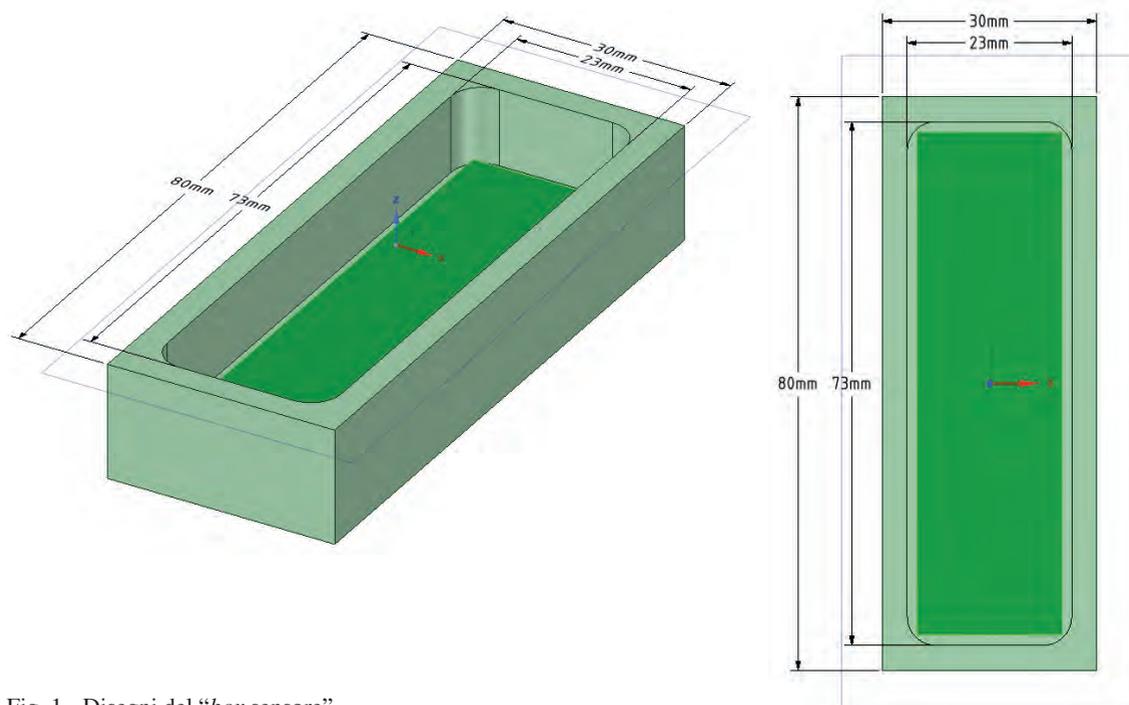


Fig. 1 - Disegni del "box sensore".

l'elettronica della sonda inclinometrica. Il *box* è realizzato in materiale plastico, lavorato per sottrazione da un pieno con una fresa a controllo numerico; la parte superiore del parallelepipedo è lavorata creando una tasca di forma rettangolare così da permettere alla scheda di inserirsi perfettamente, mentre sulle facce dei due lati corti sono stati realizzati due fori per l'ingresso dei cavi di connessione. È previsto che il sensore, dopo il cablaggio, venga resinato per renderlo conforme alla normativa IP68.

Il "blocco mobile" (Fig. 2) è costituito da una struttura meccanica in alluminio, leggera e resistente, in cui viene alloggiato il "box sensore". Al centro della struttura in alluminio viene fissato il *box* con il sensore, alle estremità invece sono fissati due carrelli con due ruote dotate di molle di ritorno. Questi due carrelli, impernati sul punto centrale e liberi di ruotare attorno ad esso, sono i responsabili del posizionamento verticale della sonda all'interno del tubo inclinometrico. Il carrello è composto da due supporti di acciaio, debitamente forati, ai quali sono ancorati due ruote realizzate in materiale plastico. Ogni ruota è dotata di un cuscinetto per minimizzare gli attriti dovuti allo scorrimento. L'ancoraggio mediante la molla è effettuato tramite due punti di fissaggio uno solidale con il carrello, l'altro solidale alla struttura esterna.

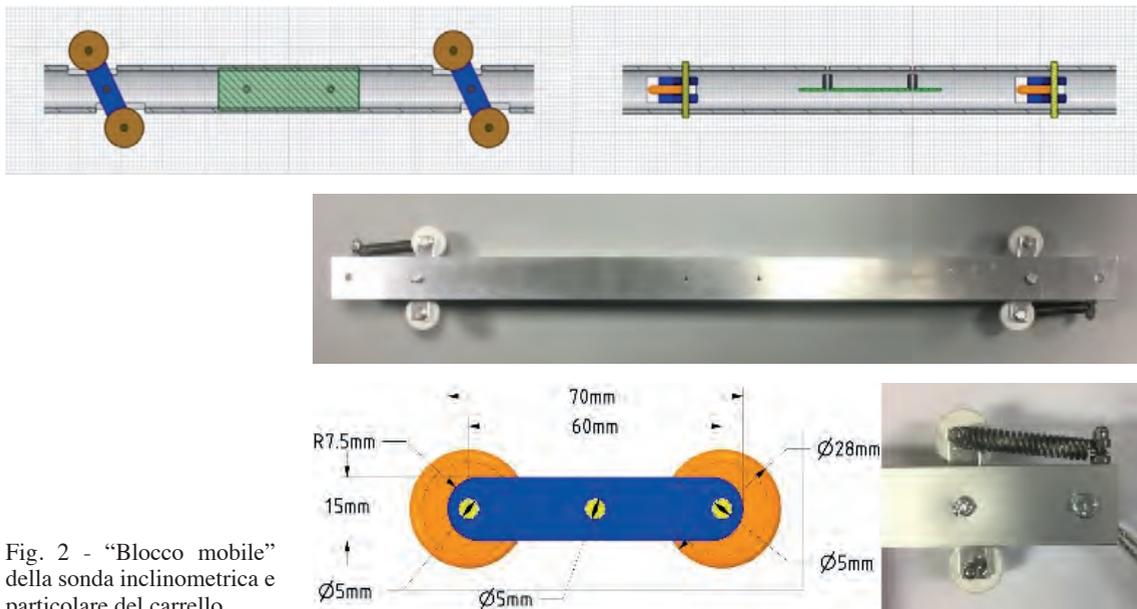


Fig. 2 - "Blocco mobile" della sonda inclinometrica e particolare del carrello.

La sonda, così composta, può essere inserita all'interno del "tubo-guida" (Fig. 3) il quale possiede degli opportuni alloggiamenti che consentono ai carrelli di scorrere con la certezza che l'asse verticale della sonda sia corrispondente a quello del tubo inclinometrico stesso assicurandone così il corretto funzionamento. Le dimensioni effettive del tubo-guida sono riportate nella figura.

Dal punto di vista dell'elettronica, la sonda è equipaggiata con una scheda elettronica, progettata ad hoc, che include un microcontrollore e, come elemento sensibile, un accelerometro; l'algoritmo che opera all'interno del microcontrollore misura le inclinazioni a partire dall'acquisizione delle tre componenti dell'accelerazione di gravità effettuata dall'accelerometro; queste informazioni sono poi inviate, in superficie, tramite un cavo il quale supporta una comunicazione seriale di

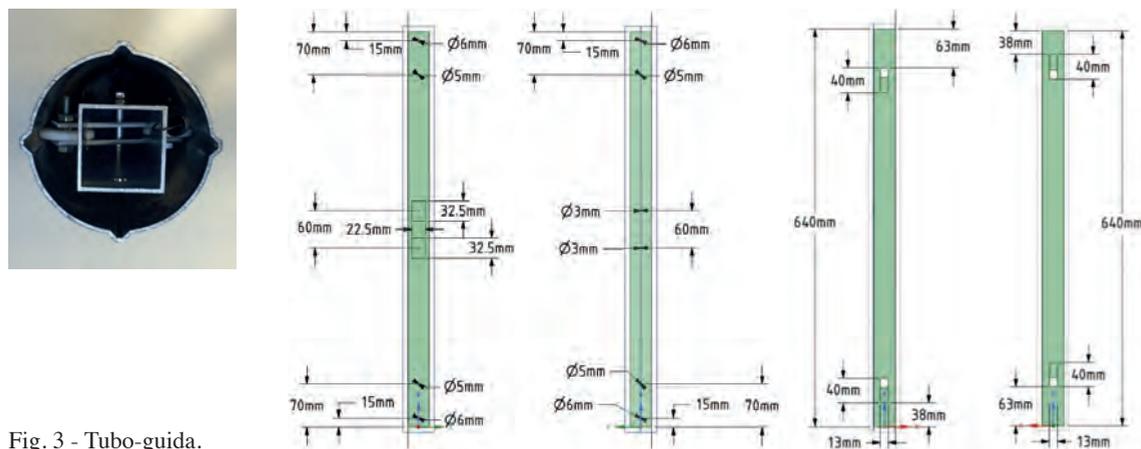


Fig. 3 - Tubo-guida.

tipo RS485; è infatti previsto che la sonda di misura sia connessa (via cavo) ad una *base station*, in superficie, la quale ha il compito sia di fornire l'alimentazione all'elettronica sia di ricevere, via *link* RS485, i dati acquisiti. Come illustra la Fig. 4, il microcontrollore scelto per questo progetto è il *chip* STM32F051K6T6, una MCU a 32 bit con *core* ARM Cortex-M0 CPU, in grado di operare con un *clock* fino a 48 MHz ed equipaggiato con 32 Kbytes di *Flash memory* e 8 Kbytes di *SRAM*; sebbene la MCU sia dotata di oscillatore interno, si è scelto di includere, nella scheda elettronica, un oscillatore esterno a 8 MHz per aumentare la precisione del clock di sistema del microcontrollore stesso. Per quanto concerne invece il sensore accelerometrico, è stato

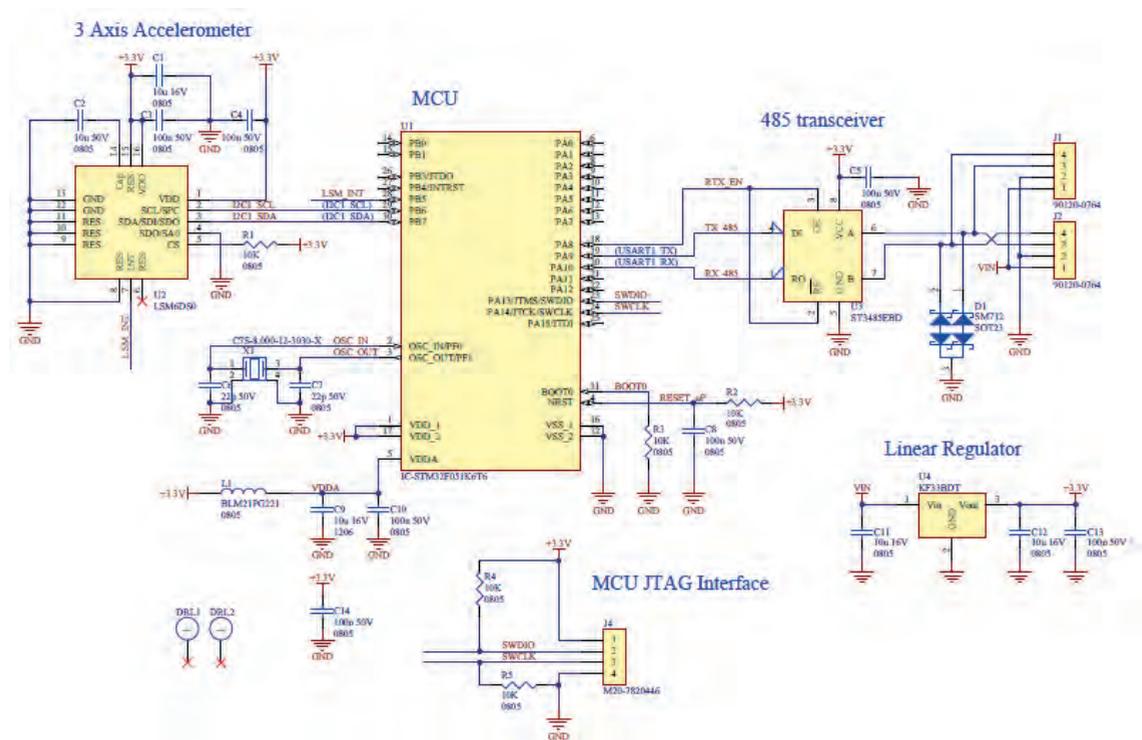


Fig. 4 - Schema elettrico della scheda elettronica della sonda inclinometrica.

scelto il *chip* LSM6DS0, un sensore integrato accelerometro+giroscopio con sensibilità massima di ± 16 g e ± 2000 dps, il quale è connesso alla MCU attraverso l'interfaccia di comunicazione I²C ed una linea di IRQ. L'ultimo componente degno di nota è il *transceiver* RS485, costituito dal *chip* ST3485EBD il quale include i *driver* necessari per adattare il livello di tensione delle comunicazioni RS485 a quello TTL-3.3 supportato dalla MCU.

La scelta della componentistica è stata effettuata non solo sulla base delle caratteristiche di prestazioni e di risoluzioni richieste ma anche tenendo conto delle dimensioni che la scheda finale deve avere; considerando le dimensioni del tubo-guida, la scheda è stata progettata con una lunghezza di 70 mm e una larghezza di 20 mm, così come mostra la Fig. 5 che riporta il disegno del PCB, il *rendering* in 3D e le fotografie della scheda alloggiata all'interno del *box* sensore.

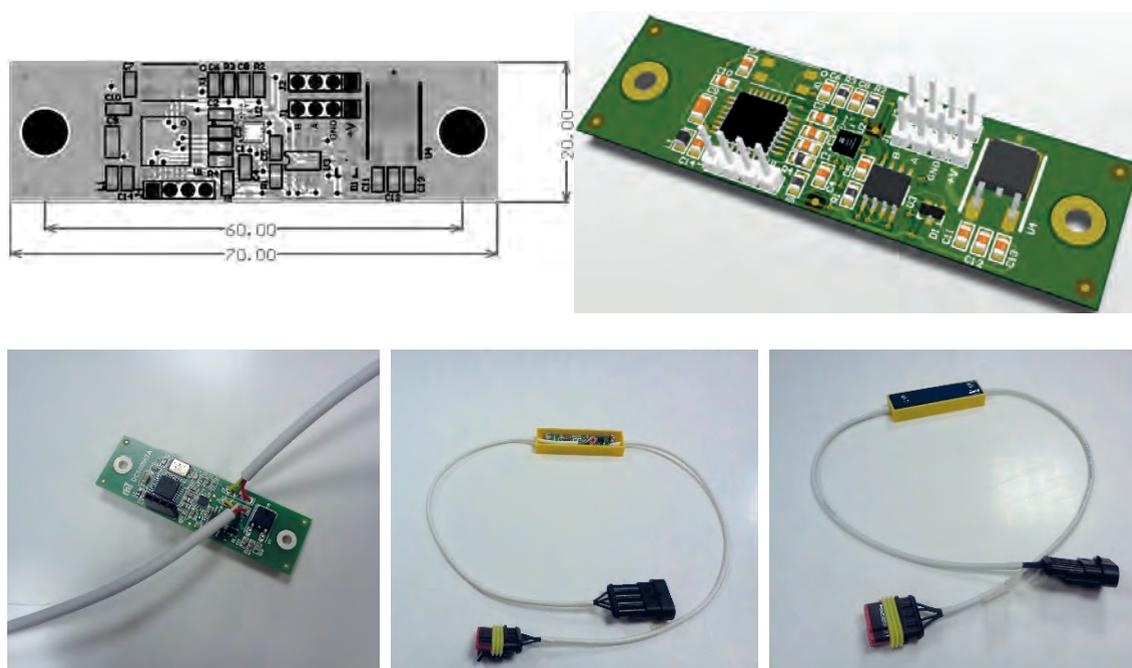


Fig. 5 - PCB con dimensioni, *rendering* 3D della scheda elettronica e foto della scheda alloggiata nel *box* elettronica.

Sviluppo di un sistema con sensori integrati per monitoraggio frane

F. PEDRIELLI¹ e F. PETRUCCI^{1,2}

¹ Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

² Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Ferrara

1. Introduzione

In base alle esperienze pregresse del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara in tema di indagini del sottosuolo sia di tipo geofisico, sismico e di analisi delle perdite da condutture si è ritenuto rispondente al Bando per la "Smart City" anche l'analisi della componente *underground* e si è proposto, fra i vari temi, quello del monitoraggio di movimenti del terreno. Le attività svolte nell'ambito di CLARA si basano sull'utilizzo di sonde con sensori MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) per la misura della deformata di frane in terreni fino alla profondità di 20-30 m. Il movimento franoso provoca uno slittamento degli strati superficiali del terreno la cui deformata viene abitualmente rilevata tramite carrelli con inclinometri che vengono fatti scendere in tubi con binari di guida fino alla profondità desiderata. Il sistema richiede intervento manuale ed elaborazione successiva per ottenere la deformata indotta sul tubo dal movimento franoso.

Il sistema da noi proposto prevede l'inserimento fino alla profondità desiderata di una serie di tubi, da 1 m ciascuno, collegati fra di loro da snodi cardanici (Fig. 1a) e contenenti una bussola (Fig. 1b) con sensori inclinometrici MEMS (Fig. 1c). Il sistema di rilevamento dei sensori elettronici (Figg. 1 e 2) è affidato ad una scheda in superficie (Fig. 1d) che effettua la raccolta e trasmissione dei dati, che vengono inviati ad un *server*. Un sistema così costituito permette di avere la rappresentazione del fenomeno in tempo pressoché reale, potendo ottenere i dati inclinometrici con cadenza dell'ordine del minuto. A differenza dei rilevamenti manuali, che avvengono con cadenze semestrali o annuali, questa rappresentazione in tempo reale permette di seguire il movimento nei momenti di maggior interesse in modo da controllare quali rischi si presentano in condizioni di particolari eventi idrometeorologici.

Il risultato finale è quindi quello di offrire agli enti preposti, interessati ai movimenti del terreno, un sistema di basso costo, senza intervento manuale di misura e con presentazione numerico/grafica dei dati in tempo reale, loro memorizzazione e tempestività di informazione.

2. Metodologia

In base alle esperienze pregresse il lavoro più importante è consistito nella scelta fra vari sensori per rilevarne l'affidabilità, assenza di derive nel tempo e, non ultimo, il costo. A tal proposito, sono stati studiate almeno 4 tipologie di sensori MEMS per inserirle in una bussola di plastica (Fig. 1b) con tenuta stagna che permetta di seguire gli spostamenti del tratto di tubo (Fig. 1a). Il tubo, in acciaio inox, presenta un diametro esterno di 42,5 mm, spessore di 3 mm, necessario per evitare flessioni sotto la spinta del terreno, e viene collegato al successivo mediante uno snodo cardanico.

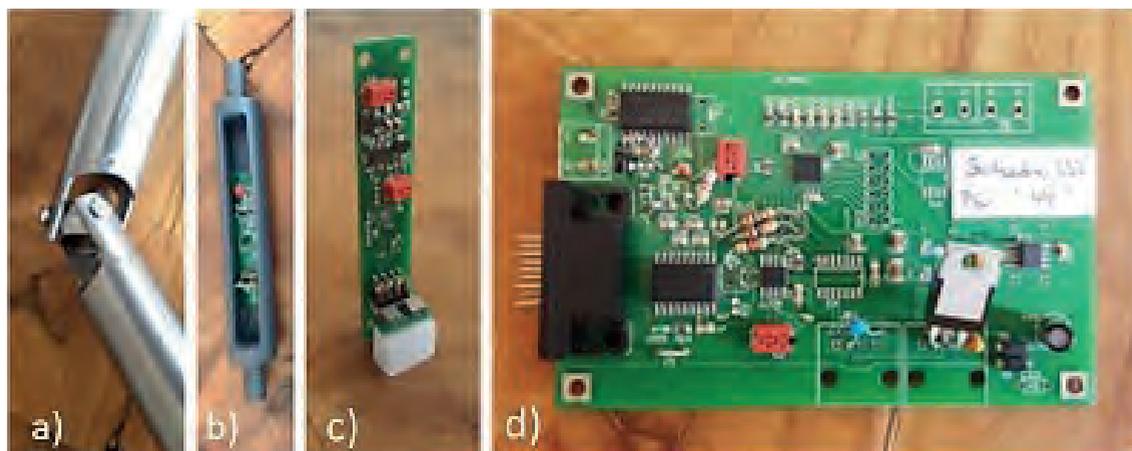


Fig. 1 - Componenti del sistema di monitoraggio frane: a) giunto, b) bussola, c) scheda sensori, d) scheda superficie.

All'interno del tubo, a circa 20 cm dal termine basso del medesimo, viene ancorata con due viti la bussola porta sensore. La bussola termina con una appendice per permettere il passaggio del cavo di alimentazione e trasmissione dati che giunge fino in superficie. Tutto il sistema deve ovviamente essere a tenuta stagna a causa della presenza di falde alle varie profondità.

I sensori sono messi in coppia, uno ruotato di 180° rispetto all'altro, per ottenere l'orizzontalità per via di calcolo e non dovendo quindi metterli "in bolla" meccanicamente. La scelta di un microprocessore per ogni sensore permette di ridurre il cavo di alimentazione/trasmissione dati a soli 4 poli effettuando chiamate codificate ad ogni sensore senza interferenza di segnali. Il cavo a 4 poli permette di interfacciare sulla stessa linea fino a 64 sensori nel caso si rendessero necessarie misure multiple.

Il progetto ha poi richiesto lo studio di una scheda di superficie che interroghi tutti i sensori in discesa nella serie di tubi snodati infissi nel terreno e, nello stesso tempo, attende chiamata da remoto o invia, a tempo cadenzato, i dati rilevati. L'intervallo di campionamento minimo è fissato in 1 minuto ma per la mole di dati che si recupera viene normalmente esteso a due ore. Rimane comunque la possibilità di incrementare la frequenza di misura, su richiesta dell'utente, in caso di previsione di possibili smottamenti ed in concomitanza con eventi meteo sfavorevoli.

Il sistema di rilevamento avviene utilizzando sensori inclinometrici (accelerometri MEMS - Fig. 1c) posti in una bussola, fissata al tubo di acciaio, permettendo quindi il rilevamento di variazioni dell'inclinazione del tubo medesimo. Gli inclinometri sono stati posizionati a sbalzo, in doppio, su di una schedina (Fig. 1c) che provvede alla conversione dei dati, alla sua trasmissione in superficie su chiamata/risposta tramite bus seriale di dati RS485 di collegamento fra le schedine accelerometriche e la scheda di superficie con un semplice cavo piatto a 4 poli.

Si è scelto di utilizzare due sensori in controfase (orientamento x, y opposto) per ridurre gli effetti di deriva termica e temporale del sensore. Oltretutto la rottura di uno di essi, anche se estremamente improbabile per l'elettronica integrata dei MEMS, permette di avere una vita del sistema di rilevamento di oltre 10 anni. Tutto il sistema è alimentato sia da rete, dove possibile, sia da batteria con pannello solare di ricarica.

Lo studio ha permesso di scegliere 4 tipologie di sensori per gli inclinometri da posizionare nel tubo a snodi multipli (Fig. 2). Sono stati analizzati 3 sensori sono di tipo MEMS ed 1 di tipo resistivo. Nei tre MEMS due erano accelerometri di tipo elastico/capacitivo, nei quali la variazione di inclinazione produce uno spostamento dal punto di equilibrio di una micro massa, ricavata per fotoincisione direttamente sul silicio che costituisce la base per l'elettronica integrata. La variazione della posizione crea una variazione di capacità dell'ordine dei 10^{-15} Farad: capacità che solo con circuiti elettronici integrati sullo stesso supporto permette di evidenziare misure che con tecnologie non "integrate" sarebbe impossibile rilevare con l'accuratezza, la precisione e, soprattutto la ripetibilità richiesta.



Fig. 2 - Sistema montato pronto per essere installato: a) tubo snodato, b) in fase di posa nel terreno.

Per questa tipologia di accelerometri sono stati presi in considerazione:

1. St Microelectronics
2. Kionics
3. Memsic E2020

I primi due modelli (triassiali) sono basati sul principio della deformazione elastica convertita in variazione di capacità elettrica mentre il terzo opera con rilevamento termico differenziale della emissione di una sorgente di calore integrata nel *microchip*. Fra questi sistemi di misura di inclinazione con risoluzioni simili e fondo scala $> +/-60^\circ$, si è scelto il Memsic MXD2020E per la sua struttura differenziale e per la stabilità di misura nel tempo.

Come 4° tipo sono stati presi in considerazione anche i sensori Fredericks a liquido elettrolitico che operano allo stesso modo della "livella a bolla" che rileva la variazione di resistenza dovuta allo spostamento della bolla d'aria dalla posizione di equilibrio.

In base alla sperimentazione effettuata, si è scelto il sensore MXD2020E della società Memsic come sensore affidabile su lunghi periodi, tipici dell'analisi dei movimenti franosi. Tale sensore è uno strumento economico a basso rumore, a doppio asse X e Y con tecnologia CMOS al di sotto del micron. Il sensore permette la misura di accelerazioni statiche (gravità) fino a 1 g con

risoluzione di 1 mg (a frequenze < 1 Hz tipiche dei movimenti franosi). Accettando livelli di frequenza dell'ordine di 10 Hz potrebbe permettere la misura dinamica delle accelerazioni, tipiche di movimenti sismici seppur con risoluzione leggermente inferiore (dell'ordine di 2 mg). Con questa configurazione si evitano residui di isteresi dovuta alla deformazione elasto/plastica dei materiali impiegati, sempre presente anche nei metalli/semimetalli come il silicio.

La misura dell'inclinazione sugli assi X e Y corrisponde alla proiezione dell'accelerazione di gravità (lungo Z). In condizione di perfetta verticalità la $acc_x = 0$ e $acc_y = 0$: per questo vengono chiamati inclinometri. Ogni sensore presenta delle variazioni nella sensibilità con la temperatura ambiente. Nel caso delle frane si presenta una variazione annuale al massimo di 10 gradi entro i primi due metri mentre in profondità scende esponenzialmente e si stabilizza oltre i 15 m di profondità. Le misure inclinometriche (accelerazioni rapportate alla gravità "g") possono essere espresse in mm/m che corrispondono ai mm di spostamento orizzontale per ogni metro in verticale (lunghezza del tubo di acciaio) e corrispondono all'angolo misurato in radianti con buona approssimazione per angoli < 10°. Quindi 1 mg (0,00981 m/s²) corrisponde a 1 mm/m.

Variazioni nello spostamento dalla verticale creano quindi una variazione della componente orizzontale dell'accelerazione di gravità lungo X e Y. Il sensore Memsic è dotato inoltre di un sensore di temperatura che, opportunamente tarato, restituisce la temperatura alle varie profondità.

L'analisi termica del sensore presenta due valenze: la prima per correzioni termiche della risposta dei sensori, nel caso venga richiesta alta precisione (in questo modo si raggiungono precisioni dell'ordine di 0,5 mg); la seconda per evidenziare fenomeni di variazione locale della temperatura a causa della percolazione causata da piogge e/o scioglimento di manto nevoso, fattori che influenzano la dinamica del movimento franoso. L'analisi termica delle variazioni di temperatura con la profondità del terreno sarà presentata nella parte 4.

3. Analisi inclinometrica

L'analisi dei dati di spostamento inclinometrico, rilevati con il sistema precedentemente descritto, ha fornito informazioni utili al controllo continuo del sistema franoso da postazione remota permettendo di individuare le deformate e, quindi, le varie profondità delle superfici di slittamento. La cadenza di interrogazione va dal minuto primo alle 24 ore. In casi normali si è scelta una cadenza bioraria

In condizioni di particolare gravità (forti piogge, disgelo rapido della precipitazione nevosa) il controllo con cadenza ogni minuto può fornire informazioni su una variazione veloce degli spostamenti.

Il controllo remoto può essere effettuato sia tramite PC, tablet o smart phone permettendo il controllo praticamente in tempo reale da parte dei responsabili.

Per la prima parte di controllo remoto degli spostamenti del sottosuolo si riportano i grafici degli spostamenti dei tubi inclinometrici alle varie profondità (1-9 m).

Per controlli rapidi della situazione, viene impostato il fondo scala a 2 cm: in questo modo allontanamenti da X=0 e Y=0 evidenziano movimenti interessanti e a rischio.

Facendo uno zoom sui grafici con fondo scala 2 mm (Fig. 3) si evidenzia la variabilità della misura gravimetrica su base giornaliera, inferiore a 1 mg (milli g; cioè < 1 mm per metro di lunghezza).

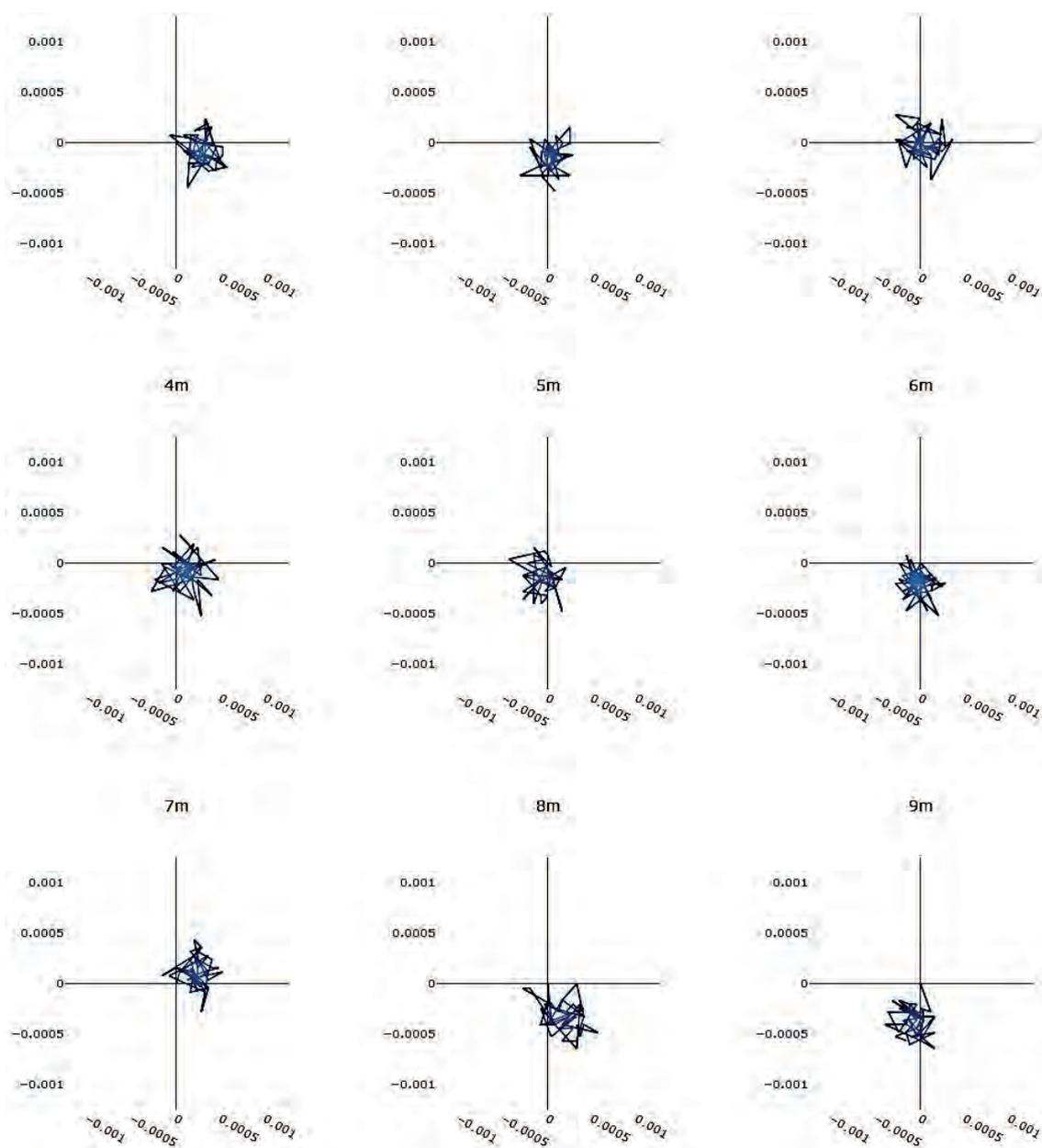


Fig. 3 - Spostamenti giornalieri X, Y in pianta alle profondità da 1 a 9 m (fondo scala 2 mm).

Le serie storiche tramite una serie di rappresentazioni grafiche (Fig. 4) forniscono informazioni su:

- gli spostamenti differenziali X e Y alle varie profondità, cioè le inclinazioni di ogni singolo tubo da 1 m;
- il modulo degli spostamenti per ogni tubo ($\sqrt{x^2 + y^2}$);
- l'integrale del modulo-deformata, che rappresenta l'accumulo dei singoli spostamenti differenziali.

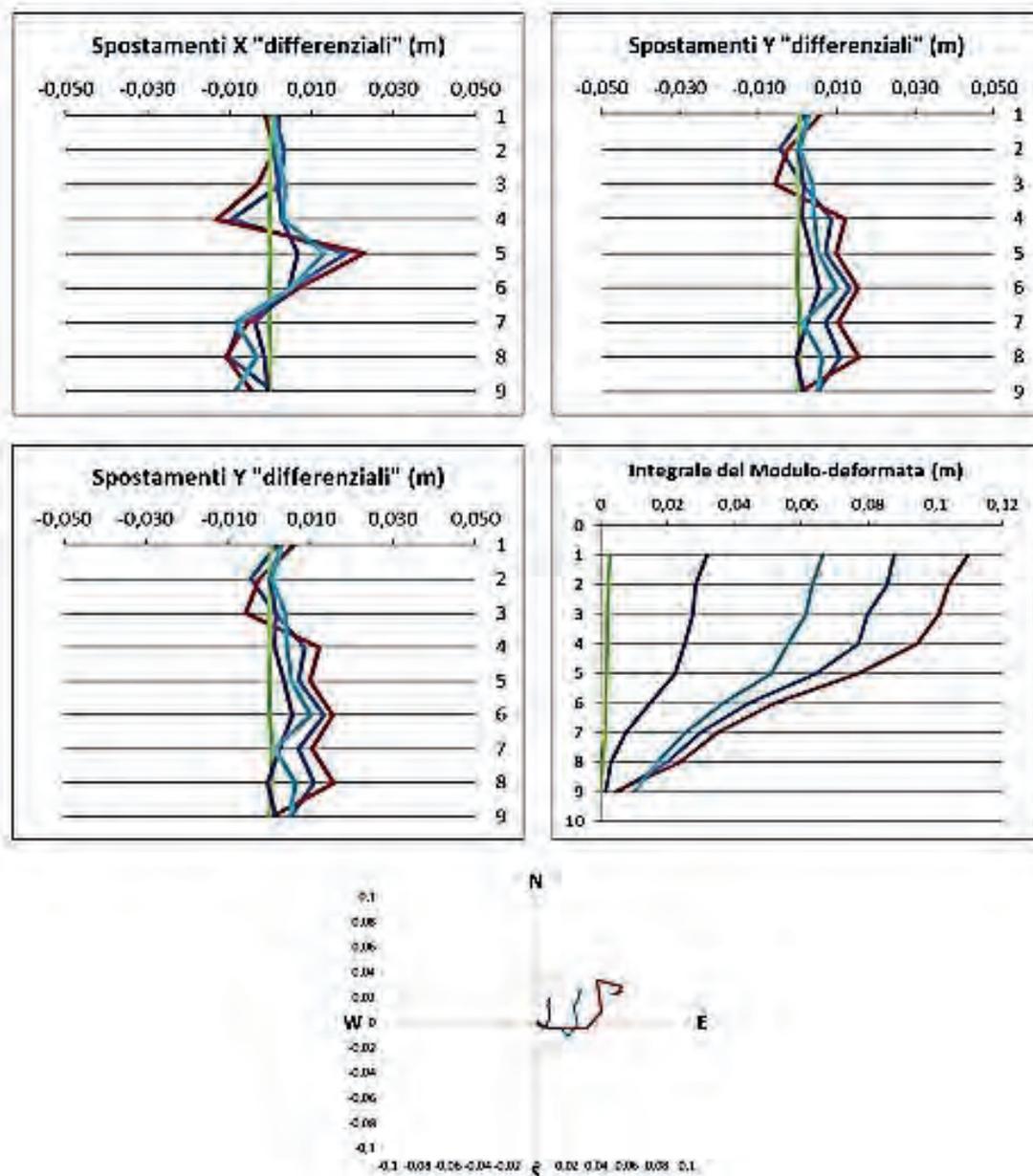


Fig. 4 - Riassuntivo degli spostamenti (differenziali/integrali) nel tempo alle varie profondità.

Viene inoltre rappresentato, in pianta, l'accumulo degli spostamenti tenendo fisso il punto più profondo, considerato fermo.

L'analisi rilevabile dai grafici permette di evidenziare il comportamento temporale del corpo di frana rispetto all'inclinazione di "zero" rilevata al momento dell'installazione del sistema di monitoraggio.

Dall'analisi dei dati appare chiara la presenza di una superficie di slittamento della frana a 5 m e 8 m di profondità; la variazione è evidenziata per un periodo di 5 mesi (curva mensile di diverso colore).

4. Analisi termica

Altro fattore di novità del sistema sviluppato è dato dall'analisi della temperatura del terreno alle varie profondità che, pur rispecchiando quanto desunto dalla teoria, presenta anomalie che possono interessare al fine dell'analisi sulla dinamica degli smottamenti. L'andamento della temperatura è una caratteristica molto importante del terreno, dato che può permettere di individuare eventuali anomalie termiche dovute ad un alto contenuto d'acqua nel terreno per la correlazione con eventuali movimenti sulla superficie di scorrimento della frana. Viene anche utilizzata per analizzare il terreno come sorgente/pozzo di calore per favorire l'installazione di eventuali impianti geotermici.

La funzione caratteristica della temperatura, per ciascun metro monitorato, presenta un andamento sinusoidale per cui si può calcolare la diffusività termica del terreno, tramite la seguente equazione:

$$T(x, t) = \bar{T} + \frac{A}{2} e^{-\frac{z}{d}} \sin\left(\omega t - \frac{z}{d} + \varphi\right)$$

dove \bar{T} è la temperatura media del terreno ($^{\circ}\text{C}$) alla profondità in cui essa non è più influenzata dalla temperatura superficiale, A è l'ampiezza della variazione annua della temperatura superficiale; ω è la frequenza angolare, pari a $2\pi/t = 2\pi/365$ giorni; φ è la costante di fase e d è la profondità di smorzamento (dumping depth). Questa grandezza si ricava dalla relazione: $d = \sqrt{365D_t/\pi}$ dove D_t è la diffusività termica (espressa in m^2/giorno), in prima approssimazione indipendente dalla temperatura. È una grandezza scalare definita come: $kt/c_p \cdot \rho$, con k_t la conducibilità termica, c_p il calore specifico a pressione costante e ρ la densità.

Alla luce dei risultati ottenuti dal monitoraggio delle temperature in profondità e dalle correlazioni con la piovosità e i livelli della falda acquifera, si ritiene che il sistema si possa rivelare un ottimo supporto anche per quanto riguarda le misure di temperatura in profondità. L'analisi dell'andamento termico (Fig. 5a), rappresenta l'andamento di tipo sinusoidale annuale. L'andamento termico in profondità mostra chiaramente lo sfasamento del picco di temperatura che aumenta con la profondità.

Nel grafico di Fig. 5b, depurato dalla sinusoide annuale, si evidenzia la profondità alla quale percola la componente idrica dalla superficie con zone di accumulo dell'acqua e conseguente

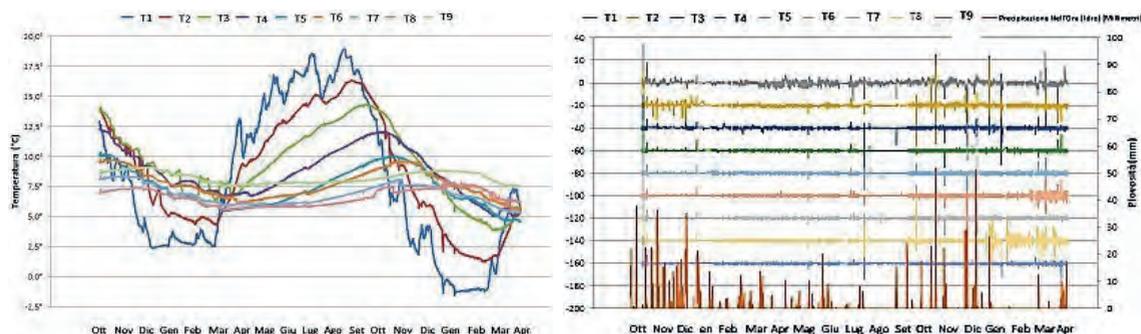


Fig. 5 - Riassuntivo dell'analisi termica alle varie profondità.

rischio di movimento franoso. Nella stessa figura, la scala di sinistra è artificiale per evidenziare le varie profondità mentre in basso (in rosso) è rappresentata la piovosità (scala di destra) evidenziando come diverse intensità di pioggia penetrino più o meno in profondità.

BIBLIOGRAFIA

- Triglia A. e Iadanza C., “*Il Progetto IFFI - Metodologia, risultati e rapporti regionali*” Rapporto sulle frane in Italia (APAT, Roma) 2007.
- American Society for Testing and Materials - D4622-86 (ASTM), “*Standard Test Method for Rock Mass Monitoring Using Inclinometers*” (1993).
- Panizza M., “*Geomorfologia Applicata*” (La Nuova Italia Scientifica, Roma) 1988.
- Cruden D.M. e Varnes D.J., “*Landslides types and processes*”, in “*Landslides: Investigation and Mitigation - Transportation Research Board Special Report*”, vol. 247 (Nation. Acad. Press, WA) 1996, p. 36.
- Senturia S.D., “*Microsystem Design*” (Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA) 2001.
- Maluf N. and Williams K., “*An introduction to microelectromechanical systems engineering*” (Artech House, USA) 2004.
- Korvink J.G. e Paul O., “*MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*” (Noyes Publications) 2005.
- Kionix, “*AN 012: Accelerometer errors*” (2007). Disponibile alla pagina web: <http://www.kionix.com/sensors/application-notes.html>
- MEMSIC MXD2020EL data sheet disponibile alla pagina web:
https://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/Accelerometer-Datasheets/MXD2020E_FRevH.pdf

Strategie adattative e distribuite per il *deployment* dei sensori e il supporto decisionale alla gestione delle emergenze

A. DI STEFANO e G. MORANA

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e Informatica, Università degli Studi di Catania

I sistemi di monitoraggio del territorio, come quelli illustrati nei paragrafi precedenti, hanno la caratteristica di tenere sotto controllo l'evoluzione di un fenomeno naturale e identificare opportuni *marker* che potrebbero costituire campanelli d'allarme per eventi importanti e/o catastrofici. Tuttavia, quando l'evento dovesse malauguratamente verificarsi, occorre mettere in campo soluzioni differenti che consentono invece agli esperti di prendere decisioni ed intraprendere azioni rapide basandosi sulla valutazione dello stato attuale del territorio e della popolazione coinvolta. I problemi più o meno prevedibili nel quadro di un buon piano di emergenza possono essere affrontati con maggiore efficacia potendo usufruire di tutti gli strumenti che in tempo reale forniscono informazioni sullo stato attuale del dissesto e sulla sua evoluzione.

In particolare, le attività di supporto logistico alla evacuazione e di coordinamento di individui e mezzi di soccorso all'interno della zona sotto attacco sismico potrebbero operare grazie alla presenza sul territorio di una rete di sensori che possa fornire in tempo reale informazioni sullo stato del territorio e che possa contare su una infrastruttura di comunicazione tra questi, centrali operative di coordinamento e utenti (ausiliari di protezione civile e altri operatori di soccorso e popolazione in fuga). Tuttavia, uno scenario caratterizzato da eventi catastrofici che modificano fortemente un territorio può vedere compromessa l'infrastruttura di comunicazione e i sensori (che possono andare in *fault* o diventare inaccessibili), occorre dunque pensare alla possibilità di poter creare una rete ausiliaria per un breve periodo, un transitorio iniziale di emergenza in attesa del ripristino di condizioni più stabili della rete elettrica e di quella di comunicazione. Pensiamo cioè ad una *wireless sensor network* (WSN) composta da nodi che monitorano l'area d'interesse (entro un opportuno raggio di copertura) e inoltrano informazioni verso nodi base station, dove i dati vengono elaborati e convogliati verso la centrale operativa. Tipicamente, le prestazioni di una rete di sensori, in termini di qualità (precisione, tolleranza) dei dati rilevati, tempi di consegna, tolleranza agli errori, robustezza e consumo di energia sono influenzate da diversi aspetti, come le caratteristiche hardware dei sensori, in termini di circuiti elettronici e tecnologia radio utilizzata, tipo di monitoraggio sincrono e asincrono degli eventi, l'acquisizione continua di flussi di dati, la quantità di sensori che si installano nell'area rilevata, la loro distanza e l'interazione tra di essi. Naturalmente le scelte da compiere sono determinate dalla natura stessa dell'applicazione.

Tra le caratteristiche che dovrebbe avere una rete dati di supporto provvisorio alla comunicazione possiamo individuare:

- facilità di poter essere messa in atto rapidamente: i) distribuzione dei sensori facile e rapida, ii) in luoghi non sempre facilmente accessibili e iii) semplice ed immediata attivazione;
- topologia irregolare (perfino composta da sottoreti tra loro non comunicanti);
- ridondanza dei nodi;
- basso consumo energetico, con una alimentazione autonoma (es. batterie, pannelli solari o altro che permetta una autonomia energetica per un tempo limitato in attesa del ripristino di minimi supporti energetici);

- capacità di sopravvivere un tempo adeguato alla durata di ripristino anche parziale della infrastruttura di comunicazione e di poter essere mantenuta funzionante in modo semplice (tramite aggiunta di sensori a *runtime*).

Pensiamo dunque a *wireless sensor network* (WSN) composte da sensori che possono essere distribuiti sul territorio da un elicottero o da un drone, sparpagliati in maniera inevitabilmente irregolare. L'esigenza primaria che perseguiamo in questa ricerca è quella di poter contare su un sistema in grado di continuare a funzionare, nel breve, il più a lungo possibile; tanto da poter supportare in emergenza la comunicazione, fino al ripristino di reti energetiche e di telecomunicazioni. Un challenge particolarmente importante nel nostro scenario è, dunque, la ricerca di strategie efficaci per la gestione energetica dei sensori. Infatti, anche se il basso costo e le dimensioni ridotte dei sensori possono permettere una copertura densa e ridondante di sensori e una grande flessibilità nel loro utilizzo, questi hanno limiti stringenti in termini di capacità computazionali e di memorizzazione e, soprattutto, di energia disponibile, assicurando un tempo di sopravvivenza ridotto dei sensori. Di solito, la vita dei sensori è correlata alle loro batterie che, nel nostro scenario applicativo, non possono essere sostituite o ricaricate. Progettare una strategia efficace per gestire correttamente la durata della batteria significa poter aumentare l'intervallo di tempo in cui la rete di sensori può funzionare.

L'adozione di soluzioni adeguate per garantire un basso consumo energetico per la raccolta dei dati è uno dei problemi più dibattuti nel campo delle reti di sensori. Tra gli aspetti principali da considerare nella ricerca di una soluzione adeguata possiamo citare il tipo di rete (*overlay network*) creata e la tipologia dei parametri presi in considerazione per garantire continuità di funzionamento, minimizzare il costo energetico e massimizzare dunque il *lifetime* (si può puntare sulla minimizzazione della distanza dei sensori che comunicano, la minimizzazione del numero di trasmissioni, ecc.).

Il processo di raccolta dei dati, e in particolare la strutturazione e la topologia della rete di sensori, è molto importante: una gestione efficace della relazione tra il numero di trasmissioni e ricezioni, combinata con un'adeguata organizzazione di sensori vicini, ha spinto a realizzare tecniche ancora più efficaci per la gestione dell'energia. È possibile identificare almeno tre diversi approcci: i) *cluster-based*, ii) *multihop* (a catena) e iii) *Minimum Spanning Tree (MST)-based*.

Le tecniche basate su *cluster* (Zhenhua *et al.*, 2007; Selvakennedy *et al.*, 2007; Chuang *et al.*, 2009; Younis e Fahmy, 2004) prevedono una quantità limitata di sensori con un livello di energia più elevato che colleziona i dati raccolti dai vicini e si fa carico del costoso processo di trasmissione dei dati alla *base station* (dopo un processo di aggregazione dei dati). Il sensore che si occupa della trasmissione alla *base station* è chiamato *Cluster Head*. Tuttavia, i principali inconvenienti delle soluzioni *cluster-based* risiedono nel numero di passaggi necessari per la creazione, la gestione ed il mantenimento dei cluster: se questi aspetti non sono adeguatamente tenuti in conto, potrebbe essere necessaria una grande quantità di messaggi di controllo, rendendo trascurabili i vantaggi introdotti dall'organizzazione di *clustering*.

PEGASIS e le sue estensioni (Lindsey e Raghavendra, 2002; Yueyang *et al.*, 2006) sono due esempi di soluzioni *multihop* (a catena). Basano il loro funzionamento sulla costruzione di catene di sensori in cui ogni sensore riceve i dati da una singola fonte e trasmette i dati a una singola destinazione. Questi dati, attraverso un processo di aggregazione, vengono infine raccolti in un singolo sensore (che cambia ad ogni round) e che inoltra i dati alla stazione base. Questo meccanismo riduce fortemente il consumo di energia per la raccolta dei dati, ma il numero di

informazioni e messaggi necessari per costruire la catena rende molto difficile l'uso in uno scenario reale. Gran parte delle soluzioni come PEGASIS hanno bisogno di conoscere la posizione iniziale dei sensori, ma ciò non è possibile se non con una approssimazione grossolana (un ricevitore GPS è tipicamente caratterizzato da un consumo ed un costo elevato e ciò è in contrasto con i nostri obiettivi).

Sebbene quelli che sfruttano un'organizzazione gerarchica dei sensori, come i protocolli *cluster-based* e quelli basati su catene di sensori, sono soluzioni efficaci, come dimostrato in Krishnamachari *et al.* (2002), l'uso di strutture ad albero, dove gli *edge* sono i sensori e la *root* è la *base station*, rappresenta la migliore soluzione per consumare meno energia. Molti studi relativi all'utilizzo di strutture di WSN basate su *Minimum Spanning Tree* (Ozgur Tan e Korpeoglu, 2003; Li, 2003; Li *et al.*, 2004; Heinzelman *et al.*, 2002) mostrano infatti che la raccolta e l'aggregazione di dati avviene in modo efficiente dal punto di vista energetico. Se i sensori sono organizzati in una *overlay network* rappresentata da una *Spanning Tree* che riduce al minimo le distanze tra di loro, l'intero WSN consumerà, durante il suo funzionamento (rilevamento, TX / RX e dati di aggregazione), la più bassa quantità di energia. Tuttavia, come accade in tutte le soluzioni strutturate (come le precedenti), anche la creazione del *MST* ottimale potrebbe richiedere una grande quantità di messaggi e di carico computazionale rendendo così questo tipo di approccio inadeguato al nostro scenario di riferimento. Per sfruttare i vantaggi introdotti dall'approccio *MST-based* mantenendo un limitato consumo si può ricorrere a soluzioni sub-ottime per la costruzione di *MST*. Alcuni lavori (Li, 2003; Li *et al.*, 2003) si sono orientati in tal senso. Khan *et al.* (2009) hanno proposto una classe di algoritmi, denominata *Nearest Neighbor Tree* (*NNT*), in grado di costruire, in modo semplice ed efficace, *MST* approssimativi ed efficienti dal punto di vista energetico. La forza della loro soluzione deriva dalla possibilità di creare l'albero utilizzando una bassa quantità di messaggi [con complessità $O(n)$], grazie all'adozione di un semplice meccanismo che consente di semplificare il controllo per evitare i cicli, che è il passo più pesante nella costruzione di un *MST*. Usando per ogni nodo un rango unico appartenente ad un insieme totalmente ordinato, e collegandolo al vicino più vicino tra quelli con un rango più grande, si ottiene che ciascun sensore ha la garanzia che la connessione stabilita non crea un ciclo. Molte soluzioni sono state proposte per la costruzione di *Minimum Spanning Tree* (*MST*) ottimali e quasi ottimali su WSN: le differenze tra queste soluzioni riguardano principalmente il trade-off tra il numero di messaggi necessari per la costruzione del *MST* e la sua qualità in termini di consumo energetico.

In tal senso, l'algoritmo distribuito proposto all'interno del progetto CLARA, e dettagliato in Di Stefano e Morana (2011), è in grado di costruire un *MST* quasi ottimale scambiando la più bassa quantità di messaggi rispetto alle altre soluzioni attuali. L'innovazione principale introdotta da questo algoritmo, chiamato *DAAM* (*Distributed Algorithm for Approximate MST*), è una tecnica innovativa per evitare i cicli, uno degli aspetti più importanti da affrontare per la creazione di *MST*. Queste caratteristiche rendono la soluzione proposta appropriata per la gestione di reti di sensori *wireless* che rilevano ambienti critici, come appunto è il nostro di riferimento, in cui le difficoltà di raggiungere le aree da monitorare costringono a una distribuzione casuale dei sensori. *DAAM* (Di Stefano e Morana, 2011) adotta una strategia simile all'algoritmo *NNT* (Khan *et al.*, 2009): infatti, entrambi costruiscono l'albero coordinando i sensori attraverso lo scambio di messaggi ma differiscono per il meccanismo utilizzato per evitare i cicli.

BIBLIOGRAFIA

- Chuang P., Yang S. e Lin C., 2009, *Energy-Efficient Clustering in Wireless Sensor Networks in Proceedings of ICA3PP (Algorithms and Architectures for Parallel Processing)*, LNCS 5574, pp. 112-120.
- Di Stefano A. e Morana G., 2011, *A distributed Algorithm for building approximate MSTs in random-distributed WSNs*, Wireless Advanced.
- Heinzelman W., Chandrakasan A. e Balakrishnan H., 2002, *An Application-Specific Protocol Architecture for Wireless Microsensor Networks*. IEEE Trans. On Communication, vol. 1, no. 4, pp. 660-670.
- Khan M., Pandurangan G. e Kumar V.S.A., 2009, *Distributed Algorithms for Constructing Approximate Minimum Spanning Trees in Wireless Sensor Networks*, IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems, vol. 20, no. 1.
- Krishnamachari B., Estrin D. e Wicker S., 2002, *The Impact of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks*, Workshop on Distributed Event-Based Systems (DEBS). 2002).
- Li N., Hou J., and Sha L., 2003, *Design and Analysis of an MST-Based Topology Control Algorithm*, IEEE INFOCOM, 2003.
- Li X., 2003, *Algorithmic, Geometric and Graphs Issues in Wireless Networks*, Journal of Wireless Communication and Mobile Computing, vol. 3, no. 2, pp. 119-140.
- Li X., Wang Y., Wan P., Song W. e Frieder O., 2004, *Localized Low-Weight Graph and Its Applications in Wireless Ad Hoc Networks*, IEEE INFOCOM, 2004.
- Lindsey S. e Raghavendra C., 2002, *PEGASIS: Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems*, IEEE Aerospace Conference Proceedings, Vol. 3, 9-16 pp. 1125-1130.
- Ozgur Tan H. e Korpeoglu I., 2003, *Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless Sensor Networks*, In SIGMOD Record, Vol. 32, No. 4, December 2003 pp 66-71.
- Selvakennedy S., Sinnappan S., Shang Y., 2007, *A biologically- inspired clustering protocol for wireless sensor networks*. Comput. Commun. 30, 14-15 (Oct. 2007), pp 2786-2801.
- Younis O. e Fahmy S., 2004, *Heed: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks*, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 3, no. 4, pp. 366-379.
- Yueyang L., Hong J. e Guangxin Y., 2006, *An Energy-Efficient PEGASIS-Based Enhanced Algorithm in Wireless Sensor Networks*, in China Communications, August 2006, pp 91-97.
- Zhenhua W., Xiaodong H., Hong Z. e Chang L., 2007, *Research on Clustering Strategy for Wireless Sensor Network Based on Fuzzy Theory*, in Proceedings of MSN (Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks), LNCS 4864, pp. 596-604.

OR6

**Sistemi informativi *Cloud Open* per
gli enti territoriali per la difesa del suolo,
la gestione dell'allerta e dell'emergenza**

Sistemi informativi *Cloud Open* per gli enti territoriali per la difesa del suolo, la gestione dell'allerta e dell'emergenza

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

Obiettivi dell'OR6 del progetto CLARA

È ormai diffusa la consapevolezza, sia nella comunità scientifica che tra i tecnici e gli operatori del settore, che il crescente numero di riscontri della fragilità del nostro territorio ai dissesti naturali è solo in parte dovuto agli ormai indiscutibili effetti dei cambiamenti climatici, ma è altresì ascrivibile alla sempre maggiore pressione antropica cui sottoponiamo l'ambiente che ci ospita (EEA, 2010). Nonostante ciò si è ancora lontani da una soddisfacente traduzione di questa nuova sensibilità in effettive politiche territoriali. È infatti ancora troppo poco sentita tra le comunità locali la necessità di adottare rapidamente nuovi modelli di sviluppo basati su criteri di sostenibilità ambientale ed adattamento ai cambiamenti climatici, piuttosto che sulle politiche correnti di sfruttamento del territorio che hanno condotto alla progressiva alienazione delle popolazioni dall'ambiente nel quale vivono e traggono le risorse a loro necessarie. Tra le priorità individuate in sede comunitaria è stata infatti riconosciuta la necessità di superare questo stato di alienazione dell'ambiente naturale da quello antropizzato, attraverso la partecipazione diretta dei cittadini alla definizione di nuove politiche locali di gestione sostenibile del territorio e di adattamento ai cambiamenti climatici. Spesso si assume che il cambiamento passi dalla progressiva digitalizzazione del tessuto urbano, ma il semplice ricorso a nuove tecnologie di informazione e comunicazione non è di per sé garanzia del raggiungimento degli obiettivi preposti. Infatti, la digitalizzazione pervasiva delle nostre città, benché sia certamente condizione abilitante per lo sviluppo di comunità partecipative e creative, non è di per sé condizione sufficiente perché la comunità diventi una *Smart Community* in grado di reinterpretare la gestione del proprio territorio riconciliando ambiente e sviluppo. Perché la città digitale diventi una *Smart City* occorre che il flusso di informazioni diventi circolare, che i cittadini siano sia consumatori che produttori di nuova informazione e che ad ogni ciclo si produca nuovo valore. CLARA pone al centro del suo progetto l'uomo-cittadino e utilizza la tecnologia *Cloud* per progettare nuove applicazioni *Web 2.0* in grado di combinare *remote sensing* e *social sensing* per una gestione partecipata delle emergenze ambientali.

Tutto ciò premesso nell'ambito dell'OR6 si è proceduto con l'analisi dei modelli di gestione del rischio idrogeologico in ambito urbano e periurbano. Successivamente si è analizzato il flusso informativo tra tecnici, decisori, volontari e popolazione nel corso di eventi climatici avversi. Lo studio che si è condotto è stato finalizzato a determinare un modello per l'integrazione di informazioni spaziali e temporali da porre a base dello sviluppo di una piattaforma open cloud per la gestione dei rischi naturali in ambiente urbano.

Alle attività dell'OR6 del progetto CLARA hanno contribuito, oltre ad Etna Hitech, il Consorzio ITER, Dedagroup, il Consorzio TeRN, Meridionale Impianti, l'Università di Catania e Sidercem.

EEA (Agenzia Europea dell'Ambiente) (2010) 'Adapting to Climate Change', *Thematic Assessment Report in the European Environment State and Outlook 2010 (SOER 2010)*.

Analisi del flusso informativo e delle sorgenti dati per la comunicazione bidirezionale tra tecnici, decisori, volontari, e popolazione

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

1. Introduzione

Finalità dell'obiettivo realizzativo 6 (OR6) del progetto CLARA è stato lo studio di una piattaforma *software* Cloud Open che sia di supporto alla rapida prototipizzazione di sistemi informativi di supporto alla gestione dei rischi naturali in ambiente urbano. Requisito della piattaforma software in studio è l'esposizione di servizi base che possano essere utilizzati quali blocchi costituenti per l'implementazione di applicazioni di diffusione di allerta, per l'attivazione di azioni di protezione civile (evacuazioni, chiusura di strade, ecc.), nonché per attività di controllo e prevenzione al fine di monitorare l'evoluzione di fenomeni naturali quali inondazioni e frane, e per fornire indicazioni alla popolazione residente nelle aree soggette a rischio idrogeologico.

L'obiettivo dell'OR è stato perseguito conducendo preliminarmente un'analisi delle modalità operative di intervento del servizio di protezione civile in caso di eventi calamitosi e conducendo parallelamente un'analisi della sequenza di eventi che hanno caratterizzato l'alluvione del 01/10/2009 che ha colpito i comuni di Giampileri, Molino e Altolia. Le due analisi appena menzionate hanno permesso di definire i requisiti funzionali e prestazionali del portafoglio di procedure elementari che possano insieme costituire un *toolbox* per lo sviluppo di applicazioni di prognostiche dei rischi idrogeologici in ambito urbano e periurbano.

2. Il sistema italiano di previsione e protezione del territorio dal rischio idrogeologico

L'impatto di eventi estremi di tipo idrogeologico rappresenta un problema di considerevole importanza per le comunità urbane di tutto il territorio nazionale, attesa la frequenza di eventi che provocano annualmente danni alle infrastrutture urbane e soprattutto perdite di vite umane.

Gli eventi naturali che sono stati presi in considerazione nel corso di questo studio sono stati solo quelli innescati da piogge e per questi sono state analizzate le cause prevalenti. Oltre al presunto impatto dei cambiamenti climatici, la responsabilità maggiore per il verificarsi di frane e piene impulsive (*flash flood*) in ambienti urbani e periurbani è sicuramente da attribuirsi a fattori antropici. Le attività umane determinano infatti l'incremento del grado di rischio cui è soggetto un territorio urbanizzato nel caso di eventi meteorici per due ragioni speculari: da un lato le attività umane modificano la morfologia del territorio con interventi di trasformazione del suolo che lo rendono più fragile rispetto al verificarsi di eventi estremi, dall'altro lato la crescente pressione antropica determina un incremento della concentrazione di persone, beni e infrastrutture nelle località urbane. La maggiore fragilità territoriale combinata con una maggiore presenza di persone e beni accresce considerevolmente il grado di rischio cui sono potenzialmente esposte le aree urbane.

Tra le attività umane cui maggiormente è possibile attribuire la responsabilità di incrementare la fragilità territoriale vi è l'abbandono delle campagne e di pratiche agricole sostenibili, l'abusivismo edilizio, la deforestazione, gli incendi di interfaccia, l'estrazione incontrollata di materiali da costruzione dalle cave di roccia e dai letti dei fiumi, l'occupazione antropica delle aree di rispetto torrentizio e fluviale, la carente manutenzione e pulizia degli alvei fluviali e delle reti di drenaggio artificiali.

La crescente pressione antropica sul territorio nazionale in uno con le attività di trasformazione e sfruttamento dei suoli che non tengono conto della sostenibilità ambientale, oltre alla mancanza di attività di cura territoriale ha concorso ad incrementare sostanzialmente le aree classificate a rischio idrogeologico, per cui circa il 48% del territorio nazionale è oggi classificato a rischio, ma vi sono regioni in cui tale rischio è sensibilmente più alto, come la Sicilia, la Toscana e la Liguria per citare quelle più popolate.

Attesa la fragilità del territorio e quindi la frequenza con cui si manifestano eventi meteorici tali da innescare frane di scorrimento e piene che provocano danni a beni e persone, il sistema di Protezione Civile Nazionale è particolarmente addestrato e preparato per mettere in campo tutte le necessarie azioni di mitigazione degli effetti di un evento naturale estremo e di soccorso delle popolazioni colpite. È comunque da sottolineare come questi eventi siano da fronteggiare non solo attraverso interventi in emergenza condotti dalle forze di difesa civile, ma soprattutto attraverso interventi strutturali di messa in sicurezza del territorio. Ma il tema delle buone prassi di ingegneria per la gestione sostenibile del territorio non è stato trattato perché al di fuori dello scopo del progetto CLARA.

Il sistema di protezione civile nazionale è organizzato su basi di sussidiarietà, ovvero l'evento naturale che rappresenta una minaccia per la popolazione deve essere affrontato in prima battuta dal servizio di protezione civile dell'autorità più vicina all'evento stesso, autorità che in generale è quella comunale. Il Servizio di Protezione Civile delle autorità superiori dovrà intervenire solo nel caso l'evento sia di intensità tale, o abbia impatto su di un'area tale, da non poter essere gestito efficacemente dall'autorità locale.

In maggior dettaglio il servizio di Protezione Civile è organizzato nei seguenti tre livelli:
il livello nazionale (Dipartimento Nazionale di Protezione Civile);
il livello regionale (Dipartimenti Regionali di Protezione Civile);
il livello locale, rappresentato dai Comuni.

Per quanto riguarda gli eventi indotti da piogge, la responsabilità della previsione degli eventi meteorici è di pertinenza del livello regionale, in ogni regione è infatti stato istituito il Centro Funzionale Decentrato Multirischio (CFDM) che tra le diverse funzioni ha anche quella di produrre giornalmente l'avviso di previsione degli eventi meteorici intensi e il conseguente bollettino del rischio idrogeologico.

La produzione da parte di ciascuna regione dei rispettivi avvisi giornalieri del rischio idrogeologico è coordinata dal Dipartimento Nazionale, la cui funzione non è quella di sostituirsi ai Centri Regionali ma è quella di verificare la coerenza del quadro di unione della classificazione del livello di rischio atteso operato al livello regionale. Potrebbe infatti accadere che due regioni contigue operino due valutazioni discordanti per due aree contigue.

Di seguito si riporta in figura l'immagine del bollettino giornaliero previsionale del rischio idrogeologico atteso elaborato dal CFDM della Regione Sicilia.

L'avviso riportato in Fig. 1 mostra come la fase operativa corrispondente allo stato di



Fig. 1 - Avviso giornaliero del rischio idrogeologico.

rischio venga determinata per 9 macro-aree e che sia rappresentata attraverso un codice colore corrispondente a quattro livelli di allarme.

Il bollettino oltre ad essere reso pubblico è inviato ai sindaci dei comuni della regione. E sono questi che in corrispondenza della fase operativa attesa per la macro-area in cui ricade il proprio comune, devono mettere in essere i provvedimenti idonei a mitigare l'impatto dell'evento atteso. Alcuni tra i provvedimenti che possono essere adottati da un sindaco vi è la chiusura delle scuole, di uffici pubblici, l'interdizione al traffico da parte di motocicli, il diniego dell'autorizzazione allo svolgimento di manifestazioni, la mobilitazione di forze di protezione civile locale e naturalmente è esclusiva responsabilità del sindaco provvedere all'allertamento della popolazione.

Il motivo per cui la traduzione in provvedimenti operativi delle fasi determinate a livello regionale, sia di competenza del livello locale è perché solo l'amministrazione locale è a conoscenza delle fragilità strutturali e temporanee che caratterizzano il territorio comunale e che determinano la resilienza dello stesso rispetto all'evento meteorico atteso. In maggior dettaglio solo le strutture tecniche dell'amministrazione locale sono a conoscenza ad esempio della capacità drenante della rete fognaria, dello stato di adeguatezza degli impianti idrovori, della presenza di cantieri mobili e di manifestazioni pubbliche che potrebbero diminuire il livello minimo di sicurezza di cittadini e operai che dovessero essere colti all'aperto dal maltempo atteso. Conseguentemente solo al livello locale possono essere adottati quei provvedimenti idonei a mantenere il livello minimo di sicurezza dei cittadini anche nel caso si dovessero verificare le condizioni meteorologiche avverse attese.

Sulla base dello studio effettuato che ha riguardato sia l'analisi delle procedure di gestione del rischio idrogeologico da parte delle autorità preposte, sia l'analisi della sequenza di eventi che hanno caratterizzato l'evoluzione dell'evento calamitoso del 01/10/2009 che ha colpito alcuni comuni della provincia di Messina, si sono definiti i requisiti funzionali della piattaforma in studio.

3. L'alluvione del 01/10/2009 che ha colpito i comuni di Giampilieri, Molino e Altolia

In questo paragrafo verrà fornita una breve ricostruzione degli eventi della sera del primo di ottobre che hanno colpito la Sicilia nord-orientale e che hanno avuto quale conseguenza la perdita di 37 vite umane.

La mattina presto del 30 settembre 2009, il gruppo di esperti meteorologi del Servizio di protezione civile nazionale stava preparando il bollettino meteorologico, che viene pubblicato giornalmente. In particolare, quella mattina gli esperti stavano analizzato il potenziale impatto di un fronte di bassa pressione centrata vicino alle isole Baleari e le previsioni per il giorno successivo erano che il fronte avrebbe interessato progressivamente nel suo movimento da ovest verso est l'intera regione Sicilia provocando acquazzoni e temporali diffusi. Ed anche se la precipitazione prevista era al più moderata, considerato che le caratteristiche del fronte erano tali da poter generare fenomeni temporaleschi localmente intensi, e poiché inoltre non è possibile prevedere i tempi, la posizione e l'intensità di tali fenomeni convettivi, gli esperti emisero un avviso di condizioni meteo avverse.

Nel 2009 il servizio di previsione delle condizioni meteorologiche avverse, contrariamente a quanto avviene oggi, era gestito centralmente dal Servizio Nazionale di Protezione Civile. Oggi il servizio nazionale si limita a rendere noto ai Centri Funzionali Regionali (CFDM) un bollettino di previsioni meteorologiche cosiddette "soggettive", ma sono i Centri Regionali che hanno la responsabilità di elaborare le previsioni meteorologiche della propria regione. Ogni Centro funzionale regionale ha inoltre il compito di prevedere il deflusso idrico che potrebbe essere generato dalle precipitazioni previste in ciascuna località di interesse della propria regione e conseguentemente è responsabile dell'emanazione dell'avviso di condizioni avverse. Successivamente all'elaborazione degli avvisi da parte di tutti i CFDM regionali, il Centro Nazionale di Protezione Civile verifica che il quadro di unione degli avvisi regionali sia coerente.

Il CFDM della Regione Sicilia valuta le condizioni meteorologiche avverse per ciascuna delle 9 sotto regioni idrologiche in cui è suddivisa la Sicilia. È in fase di discussione se diminuire la granularità della suddivisione al fine di incrementare il dettaglio della previsione, aumentando il numero di sotto regioni idrologiche da 9 a 21 (Fig. 2).

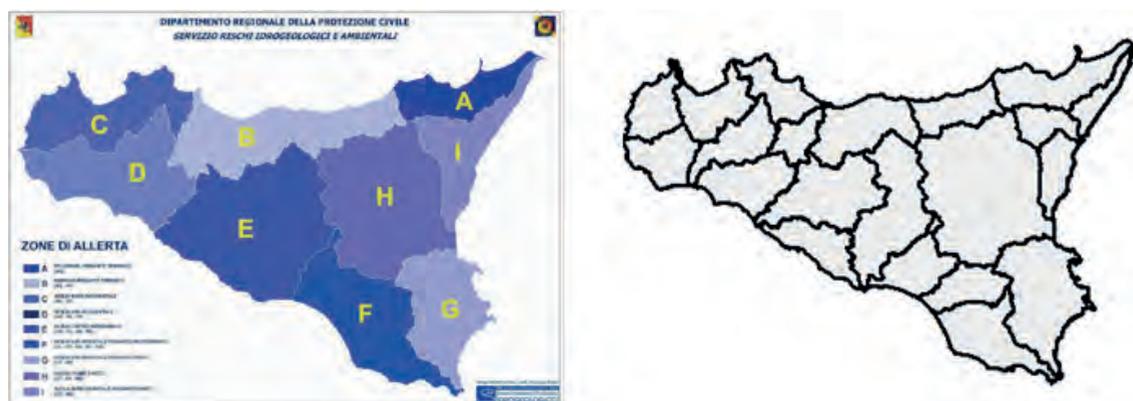


Fig. 2 - Suddivisione corrente delle sotto regioni idrologiche vs quella futura.

Per ognuna di queste 21 nuove sotto regioni, la curva caratteristica di crescita della frequenza di alluvione è ancora in fase di verifica (Brigandi e Aronica, 2015).

Nel corso del 2009, all'epoca dell'evento tragico dell'alluvione di Giampileri, il Centro Funzionale della Regione Siciliana non era in funzione, perché è stato dichiarato operativo solo il

4 novembre 2014 e come è stato descritto, in sua assenza, gli avvisi di criticità erano elaborati e pubblicati direttamente dal Servizio di Protezione Civile Nazionale.

In conseguenza della previsione di avverse condizioni meteorologiche, e poiché il tasso di umidità del suolo era prossimo alla saturazione, a causa di piogge che si erano verificate un paio di giorni prima e che avevano interessato tutto il sud Italia, con altezze di pioggia cumulata di circa 40-60 mm nel NE della Sicilia; il 30 settembre alle ore 16:00 il servizio di protezione civile nazionale emise per la regione Sicilia un avviso di criticità per il rischio idrogeologico per le successive 36 ore. Il livello di avviso era di “preallarme”, che è equivalente al livello di allerta giallo “*be-aware*” del *National Severe Weather Warning Service* (UK) ed equivalente al “*hazard-watch*” del *National Weather Service* (USA).

Secondo le procedure operative standard italiane nel caso di “pre-allarme”, tutti i comuni e le autorità locali interessate devono predisporre una attività di monitoraggio dell’evoluzione della situazione meteorologica e devono essere consapevoli e preparati ad adottare tutte le misure emergenziali previste dal piano di protezione civile locale, nel caso le condizioni meteo volgano al peggio. L’avviso di criticità, pubblicato dal Servizio di Protezione Civile Nazionale, era stato consegnato come di consueto a tutte le autorità locali della Regione Siciliana incaricate della gestione delle emergenze. Ciò significa che l’avviso era stato inoltrato a 390 comuni, quasi un terzo dei quali situati nella parte nord-orientale della Sicilia, ai dipartimenti tecnici regionali, al dipartimento regionale delle foreste, ai vigili del fuoco, ai corpi di polizia, alle centrali elettriche e TLC, alle autorità stradali e ferroviarie ed a molti altri. Tutte queste organizzazioni e autorità sia pubbliche che private in questi casi hanno l’obbligo di cooperare per prevenire pericoli e ripristinare le condizioni minime di sicurezza per le persone residenti. Il sistema di protezione civile italiano è strutturato nel rispetto del principio di sussidiarietà. Secondo questo principio, le autorità più vicine ai cittadini sono responsabili della prima risposta a un evento avverso e le autorità più vicine sono i comuni. Solo nel caso in cui non siano in grado di far fronte all’impatto di un evento estremo, a causa della sua intensità o estensione, possono essere coinvolti i livelli regionali e nazionali di protezione civile.

Tornando alla descrizione degli eventi del 1° ottobre 2009, le condizioni meteo del mattino erano di tempo sereno su tutta la Sicilia, ma subito dopo mezzogiorno nella parte occidentale della Sicilia iniziarono le precipitazioni meteoriche. Il fronte di instabilità proveniva dal mare tunisino e dallo stretto di Sicilia e progressivamente stava interessando tutto il territorio siciliano spostandosi da ovest verso est. Questo fronte stava causando piogge diffuse e qualche temporale locale, ma non sarebbe stata la causa primaria dei drammatici eventi di quella sera. Nel frattempo, un temporale a singola cella si stava sviluppando in prossimità della costa jonica della Regione Calabria. Fino alle 16:30 non aveva raggiunto una dimensione ed una intensità tale da rappresentare un pericolo, ma a partire dal primo pomeriggio, minuto dopo minuto, la sua energia crebbe considerevolmente. Dalle 18:00 alle 20:00 il temporale rilasciò quasi tutta la sua energia in un’area abbastanza concentrata di appena 25 km², situata a sud della città di Messina. L’evento è stato registrato da un unico pluviometro a Santo Stefano di Briga, che si trova a pochi chilometri di distanza dalla zona interessata. L’altezza cumulata delle precipitazioni registrate a Santo Stefano di Briga è stata di 225 mm, con un’intensità di picco di circa 53 mm/h (Basile e Panebianco, 2013). Solo 2 ore dopo che la singola cella temporalesca si è evoluta in una multicella a correnti pulsanti, e tutta la sua potenziale pericolosità poteva essere riconosciuta, si sono verificati alcuni precursori dei disastrosi eventi di quella sera. Alle 18:46 la notizia della chiusura dell’autostrada

A18 si è diffusa su Internet. La A18 è l'autostrada che collega Messina e Catania, ed era stata chiusa in entrambe le direzioni alle 18:30 a causa di una frana verificatasi al 7° km da Messina. Dal momento in cui la A18 era stata chiusa, molti automobilisti decisero di provare a raggiungere le loro destinazioni percorrendo strade secondarie. Tuttavia, questa fu una pessima decisione, che fu presa principalmente a causa della mancanza di informazioni riguardo allo stato della viabilità, all'evoluzione delle condizioni meteorologiche ed in mancanza di specifiche istruzioni da parte delle autorità preposte. Infatti, in quelle ore tutto il sistema viario della zona stava collassando, perché molti tratti della rete erano stati interrotti da diverse frane e la presenza di veicoli privati che avevano abbandonato le aree sicure di Messina nel tentativo di raggiungere quelle colpite dal nubifragio, non fecero che aggravare sensibilmente il carico di lavoro dei mezzi di soccorso.

A quel punto sarebbe stato chiaro a chiunque fosse stato in grado di avere una visione olistica di ciò che stava accadendo, che la situazione stava rapidamente volgendo al peggio. Il grado di saturazione dei suoli dell'area era così elevato che chiunque si fosse trovato in prossimità di un pendio di montagna sarebbe stato in grave pericolo. E questa era la situazione in cui si trovavano quasi tutti gli abitanti della zona. Ed inoltre non erano pienamente consapevoli del pericolo che stavano correndo. Più di un'ora dopo la chiusura dell'autostrada, in pochi minuti dalle 19:40 alle 19:50 diverse frane interessarono alcuni villaggi situati nella zona. E poi finalmente il fronte di instabilità proveniente dalla parte occidentale della Sicilia raggiunse la regione nord-orientale della Sicilia contribuendo a spazzare via la cellula temporalesca.

Ci vollero diverse settimane per ripristinare le condizioni di sicurezza nell'area. Nel villaggio di Giampileri (Fig. 3), il più vicino alla città di Messina, si registrarono 21 morti e 928 sfollati, nel villaggio di Scaletta Zanclea 16 morti e 447 sfollati e nel villaggio di Itala 227 sfollati.



Fig. 3 - Giampileri il giorno dopo (fotografie di Giuseppe Basile).

4. Analisi conclusiva degli eventi dell'alluvione del 01/10/2009

Riguardo al drammatico sviluppo degli eventi del 1° ottobre le seguenti immagini satellitari scattate da EumetSat forniscono un ulteriore punto di vista su ciò che accadde quella sera. (Fig. 4).

Le immagini satellitari mostrano che alle 17:00 quasi tutto il cielo sopra la Sicilia era ancora sereno e che vi era un fronte di instabilità che stava cominciando ad interessare le zone costiere occidentali della Sicilia, tale fronte sarebbe stato a breve la causa della pioggia moderata che era stata correttamente prevista il giorno prima dal Servizio di protezione civile nazionale. Ma è visibile anche una piccola cellula temporale localizzata sopra lo stretto di Messina e che è stata cerchiata in giallo per renderla più visibile. Lo sviluppo di questa piccola cellula sarebbe dovuto essere oggetto di monitoraggio costante, e già nel 2009 era disponibile quanto necessario per una attività di monitoraggio efficace, perché lo stretto di Messina è caratterizzato da un traffico marittimo ad alta densità ed esistevano già da allora le infrastrutture, per il monitoraggio strumentale e per raccogliere le osservazioni, di supporto alla gestione del traffico navale.

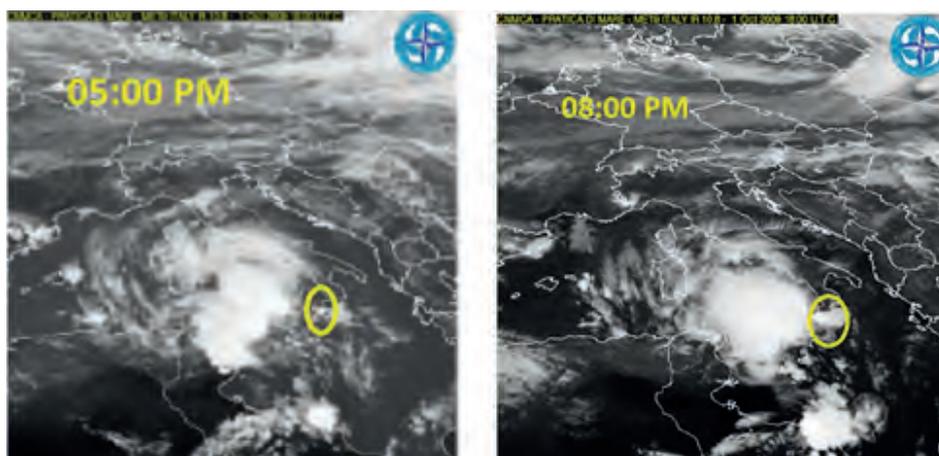


Fig. 4 - Immagini satellitari alle 17:00 e alle 20:00 del 01/09/2009.

Ipotizzando che tale azione di monitoraggio fosse stata condotta, o meglio, ipotizzando che le informazioni in possesso del sistema di controllo del traffico navale fossero state condivise con le altre autorità. Supponendo inoltre che non appena il temporale avesse innescato la frana sulla autostrada alle 18:30 anche l'autorità stradale fosse stata in grado di condividere l'informazione relativa a tale evento in tempo reale, e così via con tutto l'elenco dei comuni e delle autorità non appena fossero state danneggiate le infrastrutture civili di pertinenza.

La supposta disponibilità di messaggi, diffusi tramite internet, che riportino eventi non appena si verificano e che siano resi disponibili in un formato tale da risultare leggibili automaticamente da un dispositivo connesso ad internet (PC, *smartphone*, palina elettronica, semaforo, sirena, ecc.), apre nuove frontiere nella gestione delle emergenze. Possiamo immaginare un mondo in cui esperti, primi soccorritori, persone interessate e sensori (ad es. pluviometri, idrometri e termometri) sono in grado di attivare un avviso leggibile da un dispositivo non appena registrano un pericolo, una condizione di allerta o il superamento di una soglia. Questa tecnologia già è

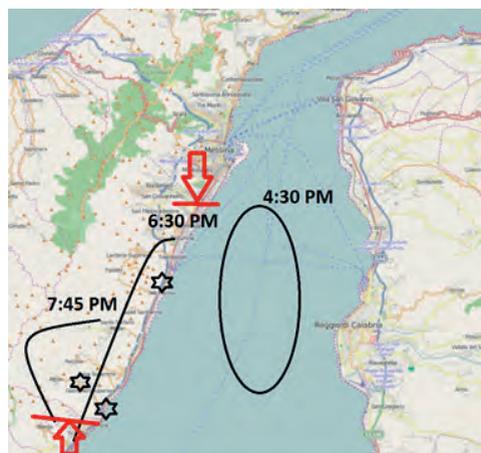


Fig. 5 - Rappresentazione della successione degli eventi del 01/09/2009.

disponibile, quindi la sfida è su come sfruttare efficacemente questo potenziale massa di informazioni eterogenee e sparse, per informare efficacemente e tempestivamente i cittadini al fine di garantire un livello minimo di sicurezza. Il ragionatore che è stato progettato in CLARA è in grado di dare alcune delle risposte attese. È in grado prima di tutto di analizzare i fatti di interesse e solo questi. Il criterio principale utilizzato per filtrare i fatti di interesse rispetto alla posizione corrente delle persone che stanno interrogando il sistema oltre alla loro destinazione. Il secondo criterio è la dimensione delle finestre temporali utilizzate per selezionare i fatti di interesse. Si è utilizzata una finestra mobile adattiva, che adatta le sue dimensioni in base alla certezza e alla distanza dal pericolo. Più il cittadino è in prossimità del previsto pericolo e maggiore è la confidenza sul verificarsi dell'evento, maggiore sarà la risoluzione dei messaggi di avvertimento resi visibili dal dispositivo nell'intorno del cittadino stesso. Di conseguenza, la finestra mobile ridurrà di conseguenza le sue dimensioni, riducendo allo stesso tempo il numero di regole da attivare e in questo modo il ragionatore manterrà la sua capacità di fornire risposte in tempo quasi reale. Analizzare i fatti di interesse significa applicare modelli previsionali rilevanti per l'analisi della tipologia di eventi che si stanno per verificare nell'intorno della persona di interesse. Le domande a cui il ragionatore deve rispondere sono: il pericoloso evento che è stato previsto per oggi, accadrà adesso? Da qualche parte intorno a me si sta già verificando quanto previsto? Ed è esattamente il tipo di pericolo che è stato previsto o è qualcosa di diverso e forse qualcosa di peggio? Mi sto muovendo verso un'area in cui il pericolo sta colpendo con maggiore gravità o verso una più sicura? Inoltre, posso ottenere istruzioni se sono state rese disponibili dall'autorità competente e se corrispondono al mio profilo personale (genitori con bambini piccoli, pendolare, persona anziana, persone con bisogni speciali, ecc.)?

La capacità del ragionatore di rispondere correttamente a queste come ad altre domande dipende sensibilmente dalla significatività semantica della struttura dei messaggi. Ma ci sono ancora molte altre domande alle quali non è semplice rispondere. Una di queste domande che è ancora aperta e per la quale si sta ancora cercando una soluzione soddisfacente riguarda la determinazione della fiducia delle persone nei messaggi di avviso. Più in dettaglio il problema è trovare un insieme di regole in grado di filtrare solo i messaggi di avviso più affidabili e della cui attendibilità è ragionevole fidarsi. Una soluzione banale potrebbe essere quella di rendere disponibili solo i messaggi emessi da autorità certificate, ma questa strategia potrebbe risultare eccessivamente

selettiva, eliminando di fatto tutte le informazioni che indipendentemente dalla loro qualità sono state pubblicate da privati o da autorità non riconosciute. La strategia che invece si sta percorrendo è quella di estrarre il più ampio insieme di messaggi possibile, purché sia verificata la loro coerenza rispetto allo scenario atteso. In quest'ultimo modo verrebbero considerati anche avvisi pubblicati da enti non ritenuti affidabili nel caso siano rafforzativi della significatività del sottoinsieme di messaggi emessi da autorità certificate.

BIBLIOGRAFIA

- Brigandì e Aronica, (2015). *A flash flood early warning system based on rainfall thresholds and daily soil moisture indexes*. EGU General Assembly 2015, Volume n. 17, EGU2015-11878, 2015
- Basile e Panebianco, (2013). *Experimental Alert Model for Hydrogeological Risk: A Case Study in Sicily*. *Landslide Science and Practice*, Springer, Volume 2, Early Warning, Instrumentation and Monitoring, 603-610.

Soluzioni *cloud open* per gli enti territoriali

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

1. Introduzione

Finalità di CLARA è realizzare sistemi di allerta al fine di attivare azioni di protezione civile (evacuazioni, chiusura di strade, ecc.) a fronte di situazioni critiche, nonché sistemi di controllo e prevenzione al fine di verificare, nel tempo: l'evoluzione del fenomeno franoso; la eventuale correlazione tra livelli piezometrici, piovosità e spostamenti; verificare lo stato del movimento franoso a seguito di un evento meteorologico intenso o prolungato; fornire indicazioni delle aree con potenziale avvenimento di frana.

Per il raggiungimento di tali finalità si è realizzato un sistema informativo territoriale basato su piattaforma *Cloud Open*, in grado di ospitare l'implementazione di modelli sia fisicamente basati che socio-cognitivi aderendo pienamente ai paradigmi open-government e *open-data*.

2. I servizi della piattaforma *Cloud Open*

Il Sistema Informativo progettato nell'ambito di CLARA espone diversi servizi che, implementati in logica *Software as a Service (SaaS)*, potranno essere riutilizzati come blocchi costituenti per la prototipizzazione rapida di diverse applicazioni verticali e non solo per quelle originariamente concepite per il progetto stesso. I servizi espongono dati e procedure per la previsione e la valutazione dei rischi idrogeologici e per la partecipazione attiva dei cittadini nel monitoraggio e nella prevenzione dei rischi legati ad eventi naturali:

- servizi per la previsione del rischio di frana e la valutazione della pericolosità delle frane basati su modellistica fisicamente basata:
 - classificazione;
 - valutazione: intensità, tempi di ritorno;
 - previsione: intensità, spaziale, tipologica, evoluzione, temporale;
 - pericolosità;
 - vulnerabilità;
 - rischio;
- servizi per la partecipazione attiva di sensori umani nel monitoraggio e nella prevenzione del rischio sismico e idrogeologico:
 - servizi a supporto della modellazione e simulazione delle dinamiche sociali nella prevenzione e la gestione delle emergenze;
 - servizi a supporto della partecipazione nella fase di prevenzione e monitoraggio;
 - servizi a supporto della partecipazione nella fase di gestione delle emergenze.

3. Integrazioni di dati spazio-temporali per la gestione delle emergenze

La progettazione di una piattaforma *Cloud Open* per la gestione dei rischi naturali richiede che misure variabili nel tempo vengano correlate a posizioni spaziali. L'integrazione tra informazioni di processo, variabili nel tempo, ed informazioni spaziali è tutt'oggi un problema aperto, benché sia stato nel recente passato variamente affrontato da molti ricercatori. Le soluzioni presenti in letteratura sono le più disparate e generalmente possono essere riassunte in tre principali categorie:

- soluzioni in cui il componente master è rappresentato da *Geographical Information Systems (GIS)*, queste soluzioni sono particolarmente adatte a risolvere problemi puramente lagrangiani, come ad esempio quelli in cui è considerata primaria la rappresentazione nello spazio di entità in movimento (es: strumenti di gestione flotte, navigatori), ma non l'analisi dell'evoluzione temporale del processo; soluzioni in cui il componente master è il *Supervisory Control And Acquisition System (SCADA)*, che è preferibile nel caso di fenomeni euleriani in cui si ritiene preponderante l'analisi dell'evoluzione del processo piuttosto che il tracciamento dello spostamento di entità;

- soluzioni intermedie in cui il *master* è un componente terzo (*middleware*), queste sono architetture adatte a risolvere problemi complessi per approcciare i quali ci si trova spesso a dover integrare sistemi dinamici sia lagrangiani che euleriani.

In CLARA è stato perseguito questo terzo approccio. Le soluzioni basate su di un *middleware* sono le soluzioni di frontiera che, benché siano maggiormente flessibili e adattabili allo specifico problema, presentano le maggiori difficoltà risolutive, tanto è vero che ad oggi sono confinate in un ambito di ricerca e non sono state proposte soluzioni commerciali. Elemento di particolare innovatività rispetto ad altri approcci attualmente proposti è la forte caratterizzazione semantica delle logiche di rappresentazione ed integrazione che sono state implementate nel *middleware*. La progettazione di un *middleware* saldamente fondato su di una robusta knowledge base si ritiene possa essere non solo elemento di grande innovatività, ma è la via che si intende percorrere per dimostrare la realizzabilità di strumenti complessi per l'interoperabilità tra applicazioni *GIS*, *SCADA* e modelli di simulazione.

4. L'interoperabilità tra i dispositivi emettitori e riceventi messaggi di allerta

Come è stato sottolineato nel paragrafo precedente, la gestione delle emergenze può coinvolgere diverse organizzazioni quali sono ad esempio: i comuni coinvolti, i vigili del fuoco, le diverse autorità stradali e ferroviarie, le organizzazioni nazionali e regionali di protezione civile. Durante un'emergenza, ciascuna di queste organizzazioni ricopre un ruolo specifico fornendo le proprie conoscenze e risorse al fine di far fronte a tale situazione emergenziale. Inoltre, come è stato sottolineato in precedenza per il caso della chiusura dell'autostrada A18, informazioni, siano esse vere che false e addirittura fuorvianti, riguardo allo stato e all'evoluzione dello scenario critico si diffondono comunque ed in maniera incontrollata attraverso le piattaforme social. In tale contesto è vitale che sin dalle prime fasi del verificarsi dell'evento critico la diffusione di informazioni incontrollate venga contrastata diffondendo informazioni affidabili. In altre parole, la strategia seguita molto spesso dalle autorità pubbliche di non diffondere alcuna informazione finché non sia stata accuratamente controllata e verificata non paga, perché nell'attesa della pubblicazione dell'avviso certificato si darà spazio alla diffusione di *fake news* che rapidamente raggiungeranno

tutti i soggetti interessati attraverso le piattaforme social. È quindi importante che si velocizzi lo scambio di messaggi sintatticamente e semanticamente ben formati tra le diverse sale di controllo coinvolte, i media e le persone interessate.

La ricezione di un messaggio facilmente comprensibile è il requisito fondamentale perché risulti attendibile per chiunque lo riceva. Inoltre, dovrebbe essere comprensibile anche da una macchina, ovvero è indispensabile sia *machine readable*, al fine di essere automaticamente leggibile dalle applicazioni *software* e non esclusivamente comprensibile dall'uomo, come potrebbero essere ad esempio i messaggi inoltrati in un formato pdf nativo. I messaggi consegnati in un formato aperto e comprensibile dalla macchina, possono essere facilmente elaborati da applicazioni informatiche e poi, facilmente e automaticamente, tradotti in qualsiasi formato preferito, incluso il formato video e audio, per essere resi comprensibili all'uomo. Uno dei protocolli di allerta più promettenti per la diffusione di messaggistica di allerta è il *Common Alerting Protocol (CAP)*, protocollo che è stato utilizzato in CLARA.

Si tratta di un formato XML semplice e generale per la trasmissione di tutti i tipi di avvisi di emergenza attraverso tutti i tipi di media. Il protocollo *CAP* consente di diffondere gli avvisi pubblici in modo semplice e simultaneo su diverse reti di allertamento e media. Il formato del messaggio *CAP* può essere convertito nei e dai formati nativi di tutti i tipi di tecnologie di allerta, formando una base per la realizzazione di un sistema di messaggistica di allertamento nazionale e internazionale indipendente dalla tecnologia. *CAP* è un formato di messaggio digitale aperto e non proprietario adatto per supportare la creazione di tutti i tipi di avvisi e notifiche. Il protocollo *CAP* è agnostico rispetto a qualunque applicazione o metodo trasmissivo. Offre inoltre funzionalità avanzate, come ad esempio il targeting geografico che può utilizzare coppie di numeri rappresentanti la longitudine e la latitudine oltre ad altre rappresentazioni geospaziali in tre dimensioni, oppure la messaggistica multilingue e multi-audience, funzioni avanzate di aggiornamento e cancellazione dei messaggi, supporto dei modelli, funzionalità per immagini e audio digitali.

Il protocollo *CAP* è stato progettato nell'ambito delle attività sostenute dall'Organizzazione per l'avanzamento degli standard per l'informazione strutturata (OASIS, 2010). È adottato e supportato in tutto il mondo da diverse organizzazioni sia pubbliche che private, come ad esempio: l'Organizzazione meteorologica mondiale (*WMO*), il Dipartimento della sicurezza nazionale degli Stati Uniti, l'Unione internazionale delle telecomunicazioni e *Google*. In Italia il protocollo *CAP* è stato adottato dai Vigili del Fuoco per l'interoperabilità tra le loro centrali provinciali (Marsella e Marzoli, 2014).

Una caratteristica chiave di *CAP* è che la sua struttura dati è facilmente estendibile, preservando in ogni caso sia la compatibilità con le versioni precedenti che quella con le versioni successive. Ciò significa che ogni dispositivo, progettato per leggere i messaggi *CAP*, è in grado di ricevere e leggere anche i messaggi prodotti in base alla versione precedente del formato *CAP* e ogni dispositivo sarà inoltre in grado di leggere i messaggi generati in base ai futuri formati *CAP*, continuando a comprendere la parte di messaggio che era stato predisposto potesse leggere e tralasciando eventualmente solo le nuove caratteristiche del messaggio. Questa capacità ha spinto diverse organizzazioni a sviluppare i propri dialetti *CAP*, che rimangono totalmente conformi tra loro per la parte comune del messaggio. Il Canada ha adottato per il proprio sistema nazionale di allarme pubblico una versione specifica del protocollo *CAP* per tenere conto di requisiti specifici come il bilinguismo e il sistema di geocodifica locale. Lo stesso è stato fatto in Australia, Sri

Lanka e anche dai vigili del fuoco italiani. Altre estensioni del protocollo *CAP* più impegnative sono state proposte per migliorare l'efficacia dei sistemi di allertamento, aggiungendo ad esempio la capacità di inviare messaggi personalizzati e sensibili dal punto di vista culturale come è stato approfondito in OPTIALERT, che era un progetto di ricerca del 7° FP sostenuto dalla Commissione Europea (Klafft *et al.*, 2014).

L'adozione diffusa del protocollo *CAP* consentirebbe di diffondere allarmi standardizzati da molte fonti e di riceverli da molti dispositivi. Ogni lettore compatibile con il protocollo *CAP* potrebbe essere configurato per leggere l'avviso di interesse, ad esempio in base alla geolocalizzazione del dispositivo stesso. Ma per quanto innovativo questo servizio di allerta, così come gli altri servizi già esistenti, consente il recupero e il filtraggio degli avvisi, ma presenta il limite di considerare gli avvisi uno ad uno e, soprattutto, ognuno di essi non è considerato logicamente collegato o collegabile con altri.

5. L'integrazione spazio-temporale dei messaggi di allerta

I messaggi *CAP* sono testi *XML* semanticamente ben formati, che contengono informazioni sul mittente, data e ora di pubblicazione, la categoria dell'evento, la sua posizione, l'urgenza, la gravità e la certezza (evento in corso o previsto) e la durata della validità dell'avviso. I messaggi *CAP* possono contenere anche alcune altre informazioni opzionali, come le istruzioni per i destinatari e la traduzione in lingue diverse da quella principale.

Invece di considerare i messaggi *CAP* singolarmente, la sfida colta in CLARA è quella di sviluppare un framework software per la lettura di diversi messaggi di avviso, che sono stati recapitati anche da mittenti diversi in momenti diversi, e cercare di organizzarli e armonizzarli per restituire una visione olistica dello scenario in evoluzione. Per svolgere questo compito è stato seguito un metodo di ragionamento qualitativo. Sono state definite relazioni qualitative binarie, sia spaziali che temporali tra due eventi. Eventi estremi segnalati tramite messaggi *CAP*, si suppone che si trovino in uno spazio bidimensionale e abbiano una certa posizione ed estensione. Queste proprietà spaziali descrivono la situazione dell'evento in un determinato punto della sequenza temporale. Queste proprietà possono cambiare nel tempo mediante traslazione e ridimensionamento. Rispetto a ciascuna proprietà spaziale, è possibile definire alcune relazioni binarie statiche spaziali. Più in dettaglio rispetto alla posizione due eventi possono essere qualificati come vicini o lontani, per qualificare in questo modo una coppia di eventi viene solitamente aggiunto un qualificatore di media distanza (Holzmann, 2007). Questi qualificatori di distanza (vicino, medio-lontano e lontano) dovrebbero quindi essere definiti metrologicamente, in base alla scala caratteristica del tipo di evento di interesse (ad esempio: 1 km, 10 km, 100 km). Inoltre, è possibile definire alcune altre relazioni spaziali dinamiche, che permettono di rappresentare il cambiamento della relazione statica nel tempo, ovvero permettono di rappresentare come la distanza tra due eventi possa aumentare o diminuire nel tempo.

Oltre a relazioni binarie di tipo spaziale si possono anche definire alcune relazioni temporali tra eventi (Allen, 1983). La durata della validità del messaggio è utilizzata per rappresentare la durata prevista dell'evento, in questo modo ogni evento può essere caratterizzato da un intervallo di tempo di inizio-fine [i, f]. In questo caso è semplice stabilire alcune relazioni temporali tra eventi, come ad esempio prima e dopo, contemporaneo e durante. Sfruttando l'insieme

summenzionato di relazioni spazio-temporali binarie, si sono studiati strumenti di filtro dei messaggi più efficaci. L'architettura del sistema che consente di elaborare gli avvisi elementari è così costituita: il repository dei messaggi CAP emessi dalle diverse organizzazioni (ad esempio: comuni, organizzazioni di protezione civile, autorità stradali e ferroviarie), questo repository deve essere aggiornato in tempo reale, un secondo repository contenente l'insieme di regole che sono state definite e un motore di ragionamento automatico.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, (1983). *Maintaining knowledge about temporal intervals*. Communications of the ACM, 26(11): 832-843, 1983.
- Holzmann, (2007). *Rule-based Reasoning about Qualitative Spatiotemporal Relations*. Proceedings of the 5th International Workshop on Middleware for Pervasive and Ad-Hoc Computing (MPAC 2007), ACM Press, Newport Beach, CA, USA, pp. 49-54, ISBN: 978-1-59593-930-2/07/11, November 2007.
- Klafft et al., (2014). *Current issues in crisis communication and alerting*. Edited by Michael Klafft, Fraunhofer Verlag 2014.
- Marsella e Marzoli, (2014). *CAP & European Emergency Response Capacity*. CAP Implementation Workshop, Negombo, 16 June 2014.
- OASIS, (2010). *Common Alerting Protocol Version 1.2, OASIS Standard*. Copyright © OASIS® 2010.

Modello semantico per l'integrazione di processi ed entità spaziali

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

1. Introduzione

Obiettivo di questa attività di ricerca nell'ambito del Progetto CLARA è la definizione di un *middleware* per l'integrazione di informazioni di processo con informazioni spaziali. In particolare, si prevede la progettazione di una piattaforma di integrazione *Open Cloud* (indipendente dai motori *CAD*, *GIS* e *SCADA* sottostanti) che consenta la gestione contemporanea di tutti i dati provenienti sia da basi di dati spaziali consolidate, sia dalle informazioni provenienti dal monitoraggio in campo. È sempre più pressante e sentita l'esigenza di avere una visione unitaria di informazioni variabili nel tempo (serie temporali di parametri di processo) ed informazioni spaziali. In genere queste due categorie di informazioni vengono storicizzate in *repository* distinti aventi caratteristiche implementative distinte. Si utilizzano *database (DB)* relazionali con estensioni spaziali per storicizzare informazioni a carattere territoriale mentre si utilizzano *Hystorian* per storicizzare andamenti temporali di parametri di processo. L'integrazione di queste due categorie di informazione pone non pochi problemi, ma è oggi un punto chiave per consentire l'implementazione di servizi di *reasoning* spazio-temporale che sono alla base dei sistemi di supporto alle decisioni in ambito di protezione civile.

2. Limiti delle attuali basi dati per la simulazione delle piene in ambiente urbano

Realizzare sistemi di allertamento automatico per le piene che interessano bacini di piccole dimensioni o che interessano bacini urbani, è particolarmente complesso a causa del brevissimo lasso di tempo in cui si manifestano ed evolvono i fenomeni di questo tipo. La celerità della disseminazione dello stato di preallarme è infatti la prima criticità nella realizzazione di un sistema di allertamento precoce in cui i tempi associati alla previsione di un possibile evento critico sono giocoforza abbastanza contenuti. La seconda criticità è invece rappresentata dalla capacità del sistema di anticipare quanto possibile la previsione di un evento potenzialmente critico. CLARA si differenzia da altri progetti analoghi proprio perché è uno studio specificamente pensato per realizzare un sistema automatico di *early warning* per i piccoli bacini urbani ed extraurbani.

Il sistema deve quindi essere in grado di rappresentare l'evoluzione temporale di una piena. A tal fine è giocoforza dover elaborare informazioni spazialmente e temporalmente riferite. Gli strumenti per rappresentare e trattare entità spazialmente riferite sono realizzati in un *Geographical Information System (GIS)*. Ma in questi sistemi non vi sono in genere strumenti adeguati a trattare processi che evolvono temporalmente. La rappresentazione di processi dinamici è in genere assolta da modelli di simulazione la cui base dati è strutturata per rappresentare meglio una successione temporale di stati.

Obiettivo della ricerca è estendere le funzionalità del sistema che verrà utilizzato nel progetto, al fine di realizzare una base dati che consenta la simulazione dell'evoluzione di un processo utilizzando un modello ad agenti che opera su di una rappresentazione dell'ambiente con un grado di dettaglio sufficiente a cogliere la complessità del mondo reale. In particolare, si investigheranno le possibili rappresentazioni di dati e processi georiferiti, e come le relazioni tra queste entità possano essere strutturate per semplificare la costruzione di modelli e software di simulazione.

Per modelli di processi spaziali si deve intendere “il complesso di teorie che consentono di predire la natura di scambi, nel tempo, di energia e massa all'interno di un sistema”, come nel caso della trasformazione di afflussi meteorici in deflussi superficiali; per modelli di dati georiferiti si deve invece intendere il complesso di teorie che consentono di descrivere la struttura del mondo reale in termini di entità e dei loro attributi organizzati in insiemi tra loro correlati.

Uno dei problemi principali, ad oggi non completamente risolti, nell'integrazione di modelli di ecosistemi e *GIS* è che i primi sono specifici per la simulazione dell'evoluzione di processi mentre i secondi sono particolarmente adatti per rappresentare modelli di dati spaziali (Raper e Livingstone, 1995). Sempre in questo lavoro si pone l'accento sull'opportunità rappresentata dai progressi nella rappresentazione di dati con metodologie *object oriented* per consentire una più semplice integrazione con modelli di processi purché anch'essi vengano rappresentati utilizzando il medesimo approccio *object oriented*.

Sia lo spazio che il tempo possono essere riferiti sia in termini assoluti che relativi. Mentre il tempo e lo spazio assoluti offrono una rigida struttura geometrica nella quale riferire dati e processi, una vista relativa fa ampio uso di relazioni, sia topologiche che temporali, tra le diverse entità rappresentate (Brown *et al.*, 2004). L'approccio metodologico che è stato seguito per risolvere il problema è l'integrazione tra modelli di dati georiferiti basati su di una rappresentazione *GIS* e modelli di processo basati su agenti. In particolare, si è investigata l'integrazione mediata da un “*middleware*” in cui sono state codificate le relazioni tra agenti ed entità spaziali come ad esempio:

- relazioni di identità, tra un agente ed entità spaziali;
- relazioni di causalità, gli agenti hanno la capacità di eseguire azioni che hanno effetti su entità spaziali o sui loro attributi, anche se non vi è alcuna associazione di identità tra l'agente e l'entità spaziale;
- relazioni temporali, due tipi distinti di azioni, in un sistema integrato di modelli di dati e di processo, sono fondamentalmente dipendenti dal tempo, gestite usando approcci sia sincroni che asincroni;
- relazioni topologiche, i movimenti delle entità spaziali, possono richiedere informazioni di base sul mondo fisico e sulle relazioni spaziali tra le entità stesse (Brown *et al.*, 2004).

In questa ricerca l'attività di metamodellazione del processo di formazione di piene in ambiente urbano e del suo impatto sulla popolazione così come delle procedure di allertamento precoce è stata realizzata facendo uso della definizione di ontologie e della loro integrazione.

Problemi aperti nella progettazione di una base dati spazio-temporale

Partendo dalle premesse effettuate si è cercato di ottenere un'unica soluzione per svariati problemi. L'intenzione era quella di:

- creare una ontologia generale per tutti i tipi di dati presenti nelle diverse forme (*SCADA*, *GIS*, *DSS*), cercando di mettere in relazione le diverse entità;

- tener conto dei diversi modelli e degli elementi in essi contenuti, oltre al fatto che uno stesso elemento possa essere rappresentato in maniera differente su due modelli distinti;
- riuscire a gestire i dati sia nella dimensione temporale, modificando il loro stato nel tempo, sia nella dimensione spaziale, tenendo conto dei dati georiferiti.

Fino ad ora, nel caso dell'integrazione di dati spaziali e processi temporali, si sono studiate diverse alternative, dalla creazione di *GIS* temporali (Yuan, 1996), alla realizzazione di sistemi ad agenti con connotazioni geografiche (Torrens e Benenson, 2004), al compromesso tra le due filosofie, cercando di realizzare un *middleware*, ovvero un sistema che riuscisse a coordinare le due tipologie di sistemi (*GIS* e agenti). Confrontando nel presente studio i diversi approcci seguiti si è determinato che, nel primo caso, è un problema gestire i processi temporali all'interno di un *GIS*. Per quanto riguarda il secondo caso, anche lì non era affatto semplice dover gestire l'enorme mole dei dati georeferenziati all'interno di sistemi ad agenti. Bisognava in qualche modo riuscire ad ottenere un sistema separato dai vincoli presentati, che riuscisse a filtrare i dati georeferenziati secondo i propri criteri, riuscendo poi a metterli in relazione con i processi temporali e con le caratteristiche di un sistema ad agenti. L'approccio seguito è andato proprio verso tale compromesso, studiando in che maniera tali elementi possano essere messi in relazione all'interno di un *meta-database*, utilizzato da tale *middleware*.

3. Il meta-DB

Si è pensato quindi alla progettazione di un *meta-database*, attraverso il quale mettere in relazione tutti gli elementi precedentemente discussi, in modo da poter essere gestiti attraverso un sistema che sia poi in collegamento con le diverse sorgenti dati, siano esse *SCADA*, *GIS* o modelli di vario tipo.

Per meglio comprendere le varie entità del *meta-db* si presenterà un'evoluzione graduale della struttura dati che è stata pensata. Inizialmente si sono definite le quattro entità presenti nella struttura:

- *Models*: l'insieme dei modelli del sistema. Per modello è intesa una rappresentazione della realtà considerata, con gli elementi in esso contenuti e le relazioni che li legano.
- *Elements*: contiene tutti gli elementi contenuti nelle varie sorgenti dati, ed archiviate dal sistema nel *meta-db*. Si noti che esiste una relazione tra modelli ed elementi, in quanto ogni elemento appartiene ad un modello.
- *Vars*: è l'insieme delle variabili (*software*) presenti nel sistema, le quali forniscono un valore, una misura periodicamente acquisita (*SCADA*). Si noti che una variabile è associata sempre ad un elemento, mentre possono esistere elementi senza variabili ad essi associate.
- *Events*: deve contenere ogni possibile evento presente nel sistema; rappresenta la componente temporale della struttura dati. Si noti che la relazione che intercorre tra elementi ed eventi è biunivoca: un evento agisce su un elemento, e un elemento (agente) può scatenare un evento.

Successivamente si definiscono le relazioni tra gli elementi e le variabili associate, tenendo conto del tipo di modello, poiché un elemento, rappresentato in un certo modello rispetto ad un altro, potrebbe possedere un diverso insieme di variabili associate, creando quindi una sorta di relazione a 3.

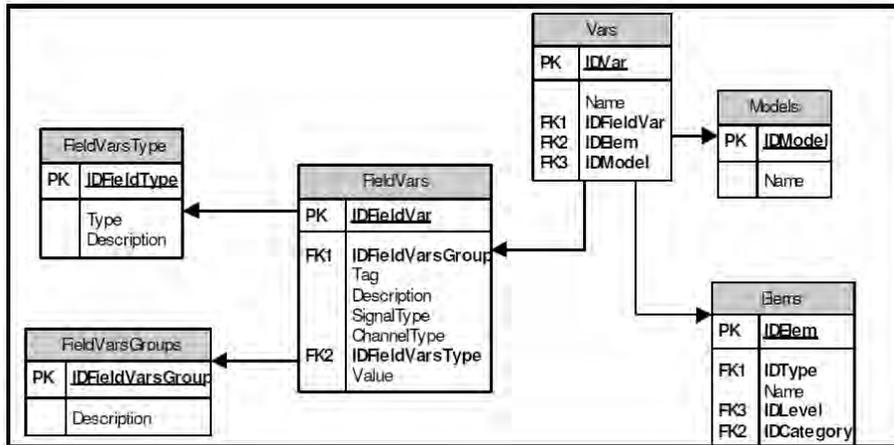


Fig. 1 - Relazione Modelli, Elementi, Variabili.

Dalla Fig. 1 si nota che la tabella *Vars* gestisce l'associazione tra il modello, l'elemento e la variabile (*SCADA*) ad essa associata, denominata *fieldVar*. Tale entità viene poi estesa con le tabelle *FieldVarsGroups* e *FieldVarsType*, in quanto ogni variabile è di un certo tipo e appartiene ad un gruppo. La tabella *Elements* sarà esposta in seguito. Ogni volta che si inserisce una nuova variabile nell'archivio, si specifica a quale elemento, relativo ad un modello, appartiene tale variabile, oltre al gruppo e al tipo di variabili di campo a cui essa appartiene.

È importante specificare la relazione che intercorre tra elementi e modelli, ricordandosi che un oggetto può essere rappresentato, all'interno di modelli differenti, da elementi totalmente distinti, i quali però possono anche avere attributi in comune. Sarà quindi importante riuscire a memorizzare sia le associazioni tra questi elementi, sia le eventuali corrispondenze tra gli attributi.

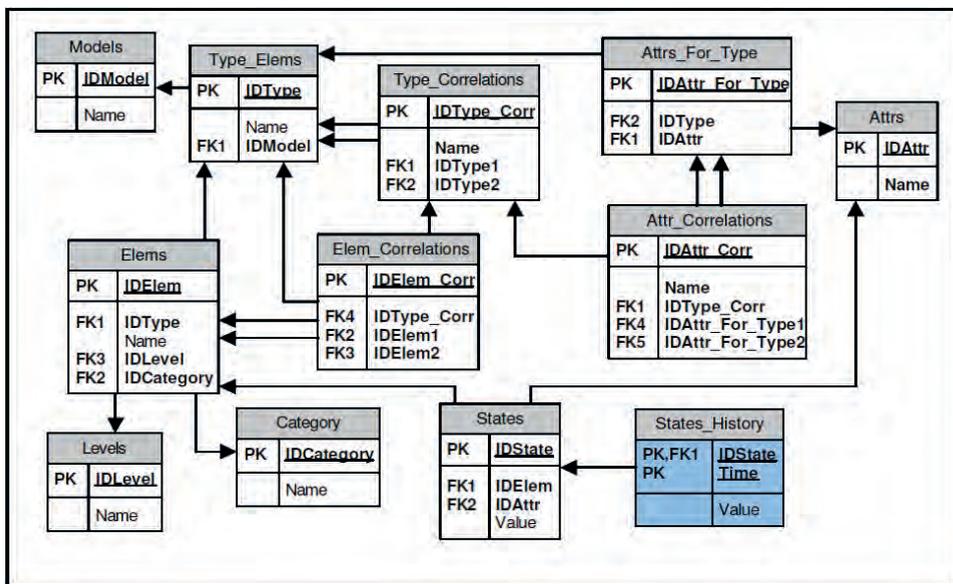


Fig. 2 - Classificazione Elementi e Modelli.

Inizialmente (Fig. 2) si mostra la classificazione degli elementi di un modello per tipo (*Type_Elems*). Ogni elemento di un certo tipo possiede un insieme di attributi, presenti nella tabella *Attrs*, attraverso le associazioni presenti nella tabella *Attrs_For_Type*. Inoltre, ogni elemento avrà, attraverso la tabella *States*, un valore per ogni attributo che possiede, a cui si aggiunge uno storico contenente i valori in base agli istanti registrati. Per spiegare le tabelle di correlazione si consideri un oggetto rappresentato in due modi diversi su due modelli diversi. Si avranno in *Elems* due istanze A e B, di tipi diversi, tA e tB, relativi ai due modelli diversi. Vi sarà allora nella tabella *Type_Correlations* un record contenente la coppia (IDtA, IDtB), e il suo identificativo, ID_TC sarà presente nel record di *Elem_Correlations* insieme alla coppia (IDA, IDB), identificato da ID_EC. Inoltre, per ogni corrispondenza x y tra un attributo x dell'elemento A e un attributo y di B si ha nella tabella *Attr_Correlations* un record contenente la coppia (x, y) insieme all'identificativo ID_TC per il tipo di correlazione. Infine, si estendono altre caratteristiche dell'elemento, il quale appartiene ad un livello (idrologico, geologico, urbano, ecc.), ad una categoria (reparto, impianto, regione, ecc.).

Resta a questo punto da definire il modo in cui interagiscono gli elementi e gli eventi (Fig. 3), così da introdurre la dimensione temporale nel sistema studiato. Si è già specificato che la relazione che intercorre tra le due entità è biunivoca:

- *Event* → *Elem*: un evento agisce su un elemento (o più), provocando un cambiamento nel suo stato, modificando quindi il valore di uno o più attributi;
- *Elem* → *Event*: un elemento "attivo", ossia un agente, può causare un evento (o più eventi), sotto specifiche condizioni.

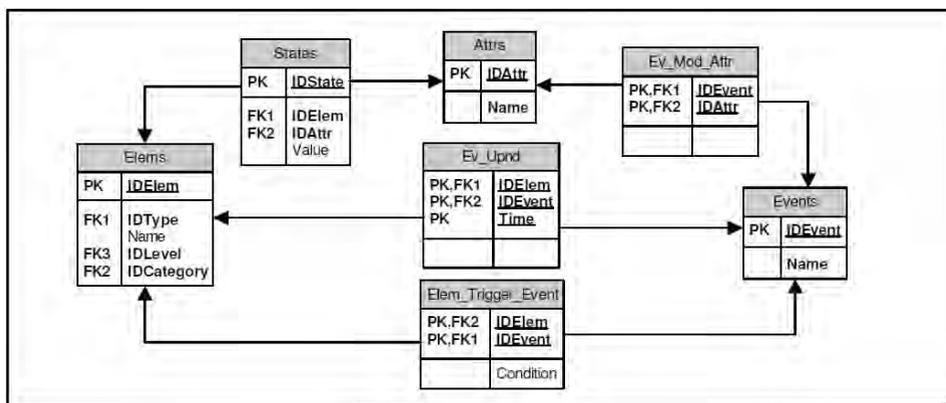


Fig. 3 - Eventi ed Elementi.

Dalla Fig. 3 si nota come elementi ed eventi entrano in relazione attraverso la presenza di varie tabelle per gestire le varie associazioni. La relazione *Event* → *Elem* è rappresentata dalla tabella *Ev_Mod_Atrr* (*Event modifies attribute*) in cui è presente un'associazione evento → attributo in quanto un evento che agisce su un elemento causa la modifica dello stato di uno o più attributi. Con la doppia chiave primaria un attributo può essere modificato anche da eventi diversi. Nello schema è presente anche la tabella *Ev_Upnd* (*Events Happened*) in cui vengono archiviati tutti i momenti in cui un qualsiasi evento agisce su un elemento.

La relazione inversa, $Elem \rightarrow Event$ si ottiene con la tabella *Elem_Trigger_Event* in cui si inserisce un record ogni volta che un elemento causa un evento sotto una certa condizione.

Il quadro di unione dell'intera struttura dati è rappresentato in Fig. 4.

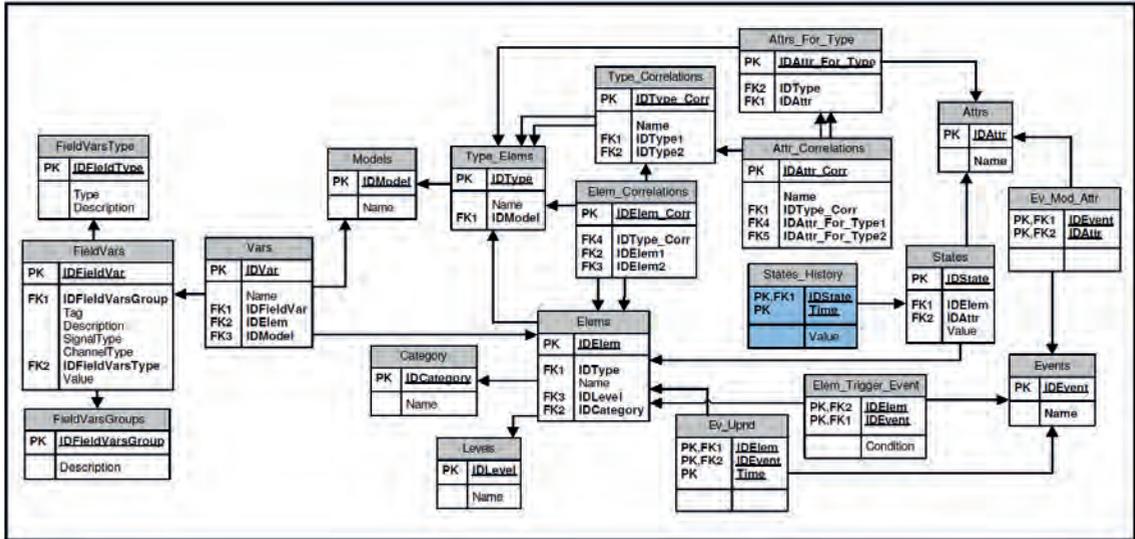


Fig. 4 - L'intero schema del meta-database.

Questa non è chiaramente la rigida struttura di un *database* già implementato, ma è un'analisi il più possibile specifica del modo in cui i vari dati potrebbero essere trattati, a cui si aggiunge, ovviamente, il modo in cui inserire tali informazioni e in che maniera archivarli, così come le eventuali procedure da seguire per le *query* su tale sistema, il quale potrà anche essere più complesso di un semplice *database*.

4. Conclusioni

La struttura pensata cerca quindi di far coesistere insieme le dimensioni spaziali e temporali di un complesso sistema ad agenti che tratti dati georeferenziati. Sarà inoltre facilmente compatibile per un middleware che voglia eseguire un'integrazione tra le varie ontologie. In generale quest'ultime forniscono un "saper comune" di uno specifico dominio di conoscenza, attraverso un'esplicita concettualizzazione che descrive la semantica dei dati (Gruber, 1993). Esse devono essere definite attraverso una specifica formale, spesso basata su di una logica del primo ordine (Franconi *et al.*, 2004), che dovrà essere automaticamente comprensibile da un applicativo software (Studer *et al.*, 1998).

BIBLIOGRAFIA

- Brown D.G., Riolo R., Robinson D.T., North M. and Rand W., 2004. *Spatial Process and Data Models: Toward Integration of Agent-Based Model and GIS*, Journal of Geographical Systems, University of Michigan.
- Gruber, R.M. 1993. *A translation approach to portable ontologies specifications*. Knowledge Acquisition, 5(2), 199–220.
- Franconi, E, et al. 2004. *Temporal Representation and Reasoning*. Special issue of the Journal of Logic and Computation (JLC), 14 (1), Oxford University Press.
- Raper J. and Livingstone D., 1995. *Development of a Geomorphological Spatial Model Using Object-Oriented Design*, International Journal of Geographical Information Systems 9(4): 359-383.
- Studer, R.M., V. R. Benjamins, and D. Fensel 1998. *Knowledge engineering: principles and methods*. Data and Knowledge Engineering, 25(1-2), 161–197.
- Torrens P.M. and Benenson I., 2004. *Geographic Automata Systems*, International Journal of Geographical Systems, University of Tel Aviv.
- Yuan M., 1996. *Temporal Gis and Spatio-Temporal Modeling*, University of Oklahoma.

Analisi di *software* numerico e individuazione di elementi cui applicare le tecniche di parallelizzazione automatica e relativa validazione, nel quadro dei modelli di previsione del rischio frana

G. BILOTTA¹, S.D. CALANNA², C. DEL NEGRO¹, A. FORNAIA², G. PAPPALARDO²,
S. SCAFITI², R. TORRISI² e E. TRAMONTANA²

¹ *Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Catania*

² *Dipartimento di Matematica e Informatica, Università degli Studi di Catania*

1. Introduzione

Fra le attività previste all'interno di CLARA vi sono lo sviluppo di servizi per il calcolo distribuito di modelli numerici e la validazione di sistemi *safety-critical* quali i predetti modelli. Il lavoro iniziale del gruppo di ricerca è stato focalizzato sullo sviluppo di un approccio per l'analisi del codice sequenziale al fine di valutarne le possibilità di parallelizzazione. Successivamente si è mirato alla trasformazione automatica di codice sequenziale selezionato in una versione parallela. Infine, è stato sviluppato un tool per la generazione di test, in modo da convalidare l'esecuzione del codice parallelo generato.

2. Considerazioni su possibili interferenze nell'esecuzione parallela

Tramite opportuni strumenti di analisi statica del codice, si è mirato a costruire uno strumento che determini, per ciascuna istruzione, la dipendenza dai dati, ovvero di quali dati ha bisogno un'istruzione, poiché accede ad essi in lettura, e quali dati in *output* fornisce l'istruzione. In presenza di dati condivisi da più parti di codice si potrebbero verificare "interferenze" tali da considerare il comportamento non corretto quando le parti di codice sono eseguite in parallelo.

È possibile affermare che non vi siano interferenze su parti di codice eseguite in parallelo, e quindi si può affermare che l'esecuzione avviene correttamente, quando le condizioni di Bernstein siano soddisfatte. Le condizioni di Bernstein possono essere riassunte come qui di seguito indicato. Se si vogliono eseguire in parallelo due istruzioni successive l'una all'altra, bisogna controllare che tutte le seguenti condizioni siano verificate: a) non vi è intersezione fra le variabili lette dalla prima istruzione e le variabili scritte dalla seconda istruzione; b) non vi è intersezione fra le variabili scritte dalla prima istruzione e le variabili lette dalla seconda istruzione; c) non vi è intersezione fra le variabili scritte dalla prima istruzione e le variabili scritte dalla seconda istruzione.

Per le chiamate a metodi che possono essere eseguite in parallelo (da *thread* distinti), si dovrà verificare che il metodo non modifichi lo stato durante l'esecuzione, oppure che prima della modifica di uno stato l'esecuzione sia vincolata ad un solo *thread* per volta. Nel caso dell'assenza di modifica dello stato non si ha nessuna interferenza fra più esecuzioni lanciate sullo stesso metodo in *thread* diversi, e l'esecuzione da parte di vari *thread* sarà veramente parallela, e quindi più veloce, in presenza di opportune risorse *hardware*.

Per l'esecuzione parallela di due metodi diversi, le cui chiamate contigue siano presenti all'interno di un frammento di codice, la verifica di non interferenza sulla correttezza dell'esecuzione consiste nel controllare, nel caso che lo stato sia modificato durante l'esecuzione, che per le variabili lette o scritte dal codice all'interno del corpo di ciascuno dei due metodi, la lista delle variabili condivise soddisfi le suddette condizioni di Bernstein.

È stato quindi studiato un approccio che analizza un programma al fine di riconoscere un frammento di codice all'interno di un metodo che si occupa di un compito che è possibile estrarre per inserirlo in un metodo a sé, da eseguire in parallelo. Una volta estratto il codice individuato, la chiamata al nuovo metodo si può facilmente eseguire in un *thread* separato. La suddetta estrazione migliora leggibilità e modularità del codice, separando la decisione di parallelizzazione dal codice che si vuol eseguire.

Tale estrazione comporta la risoluzione di due problemi principali. Il primo è determinare quali istruzioni costituiscono un frammento a sé, rispetto ad istruzioni vicine. Il secondo è determinare le dipendenze del frammento da estrarre rispetto alle variabili presenti nel contesto del codice di partenza. Quindi il successivo passo è la gestione del passaggio in ingresso ed in uscita delle variabili su cui opera il frammento una volta che è stato estratto ed inserito in un metodo a sé. Per individuare i punti di separazione di un frammento, una indicazione può essere data dalla struttura del codice. Per esempio, una istruzione condizionale è una struttura le cui parti potrebbero essere separate. Si è quindi avviato lo studio di una caratterizzazione utile per ciascuna istruzione, in modo da determinare la coesione con altre istruzioni vicine. La valutazione della coesione è utile per arrivare ad una separazione che si basi sulla modularità.

Inoltre, sono state individuate e classificate varie tipologie di implementazione di cicli iterativi. Per esempio, sono stati distinti i cicli in cui per ciascuna iterazione le istruzioni del ciclo agiscono su elementi diversi e forniscono un risultato non usato nella successiva iterazione, dai cicli in cui ogni iterazione usa il risultato dell'iterazione precedente. Il primo tipo di ciclo si può considerare per una trasformazione in versione parallela, piuttosto facile, ovvero ogni iterazione è eseguita da uno dei *thread* disponibili. Il secondo tipo di ciclo è più difficile da parallelizzare o potrebbe non essere parallelizzabile. Tuttavia, nel caso in cui il risultato di una iterazione sia usato per calcolare un valore da inserire in una variabile accumulatore, è possibile studiare soluzioni *ad-hoc* dipendenti dalle proprietà matematiche della funzione di accumulo. La proprietà associativa consente per esempio di avviare separatamente iterazioni distinte in parallelo e quindi di metterne insieme i risultati. In questi casi il programmatore potrebbe indicare allo strumento di trasformazione quali sono le proprietà matematiche della porzione di codice implementata, in modo da consentire ad uno strumento automatico di fornire una versione parallela di quella porzione di codice.

3. Analisi applicazioni per il riconoscimento istruzioni

Per l'analisi statica, lo strumento informatico che è stato sviluppato è in grado di determinare i flussi di dati fra una parte di programma detta sorgente ed un'altra parte di programma detta pozzo. Tale strumento costruisce il *Data Dependency Graph (DDG)*, in cui i nodi rappresentano istruzioni di un programma e un arco orientato fra due nodi indica che il nodo di arrivo legge l'*input* necessario all'istruzione che il nodo rappresenta, da una o più locazioni di memoria che

sono scritte dal nodo di partenza. Quindi l'arco indica il flusso dei dati fra le due istruzioni. Se non ci sono percorsi fra due nodi allora non ci sono scambi di dati fra i due nodi.

Lo strumento sviluppato determina quindi per ciascuna istruzione se essa legge dati prodotti da altre istruzioni, e quali sono tali istruzioni, e se scrive dati. Questo è importante poiché, una volta determinate le istruzioni che accedono a dati condivisi con altre, si potranno inserire appositi costrutti di sincronizzazione per la valutazione delle condizioni di Bernstein per far sì che l'esecuzione parallela sia corretta, ovvero che la dipendenza da dati sia analoga a quella dell'esecuzione sequenziale.

In questa fase di lavoro all'interno del progetto CLARA, vari esperimenti sono stati anzitutto basati su codice Java, per poi proseguire inoltre con l'analisi di codici C++. I vantaggi di iniziare con l'analisi del codice Java sono molteplici: tale ambiente permette di avere un vasto numero di strumenti di supporto di ottima qualità che fanno da base per poter avviare gli esperimenti: le conoscenze acquisite e gli strumenti prodotti possono essere impiegati (e riusati) per l'analisi di programmi basati su linguaggi diversi.

E' stato usato inizialmente il *tool JavaPDG* per ottenere, a partire da un'applicazione, il *Program Dependence Graph (PDG)*, che combina sia il *DDG* che il *Control Flow Graph (CFG)*. La costruzione di un *PDG* per una porzione di codice è un'operazione che può richiedere molto tempo, quindi per le librerie comunemente usate da varie applicazioni è bene conservare la loro rappresentazione in termini di grafi *PDG* anziché ritrovarla per ciascuna applicazione che la usa. Il lavoro svolto ha quindi previsto un componente che trova il *PDG* per una libreria e lo conserva su disco opportunamente.

Gli esperimenti per la scansione del codice sono quindi proseguiti con l'analisi del codice C/C++. Il componente che è stato usato come supporto è stato *LLVM Compiler Infrastructure* che comprende un set di tool e librerie riusabili. Fra queste è stato usato Clang, un front-end per la compilazione di codice C/C++ basato su *LLVM* che permette l'esportazione della rappresentazione intermedia, detta *LLVM IR*, del codice analizzato. Le librerie *LLVM* consentono di inserire un analizzatore specializzato che ispeziona il codice, per esempio specializzando la classe *FunctionPass*, che analizza ciascuna funzione. L'analizzatore realizzato consente di ispezionare ciascuna istruzione presente in una funzione, riconoscerla e tracciarne le dipendenze.

4. Trasformazione del codice

Per potere scansionare il codice di un'applicazione al fine di modificarla in alcuni punti dove serve inserire istruzioni di controllo (relative a parallelizzazione, sincronizzazione, *log*, *alert*, *debug*, ecc.) è necessaria una libreria di supporto che manipola il *bytecode* Java, ed a tal fine è stata usata la libreria *BCEL*. La modifica apportata negli esperimenti ha riguardato l'inserimento di istruzioni che danno il controllo ad un componente di monitoraggio, quando si raggiungono punti di programma che necessitano di controllo di flusso. Quindi questo è utile, per esempio, quando si vuol bloccare un *thread* in attesa che un altro *thread* rilasci una variabile che sta usando.

Durante gli esperimenti sono stati considerati vari punti di un'applicazione di esempio che necessitano di essere monitorati a *runtime* per via di un accesso a variabili condivise. Questi punti sono individuati dal nostro strumento informatico a partire dal *PDG* completo dell'applicazione.

Una volta noti tali punti, un componente dello strumento costruito sulla base di *BCEL* identifica i punti sul codice ed il loro contesto e li modifica.

L'approccio ed un prototipo dello strumento sono stati convalidati tramite un caso di studio su un'applicazione che usa librerie Java standard e librerie esterne.

Ai fini della parallelizzazione, varie modifiche del *bytecode* Java sono state effettuate usando la libreria Java ASM. Quest'ultima richiede di implementare un *design pattern Visitor* per effettuare modifiche al *bytecode*.

5. Generazione test

Per generare i test sono stati usati il formalismo *ASM* e lo strumento *Coffee4J*. Quest'ultimo è un *framework* per la generazione e l'esecuzione automatica di test combinatoriali in *Java*. *Coffee4J* genera la test suite usando *IPOG*, uno tra gli algoritmi più diffusi, ed infine li esegue automaticamente tramite *JUnit 5*. L'intento è quindi di generare ed eseguire automaticamente una *test suite*, che sceglie opportunamente valori per i parametri, in modo da avere un'ampia copertura del codice con un numero contenuto di *test case*. Per gli esperimenti il *bytecode* Java è stato modificato automaticamente per permettere di tracciare l'*output* e lo stato di opportune variabili. L'esecuzione dei test permetterà dunque di verificare che il risultato ottenuto dallo strumento di parallelizzazione sia corretto. La verifica consiste nel controllare che lo stato delle variabili specificate e l'*output* finale del programma in versione sequenziale e parallela siano identici.

Ulteriori esperimenti sono stati fatti per la generazione di test consistenti di sequenze di chiamate di metodi generate in modo casuale. Lo strumento su cui ci si è basati per questi esperimenti è stato *Randoop*. Questi esperimenti permettono di esercitare il codice eseguendolo in modo casuale, e possibilmente permettono di trovare situazioni di esecuzioni che provocano interferenze fra frammenti di codice che sono stati associati a *thread* indipendenti.

OR7

**Sviluppo di *Smart Application*
a supporto dell'implementazione
di modelli sociali di *Risk Governance***

Sviluppo di *Smart Application* a supporto dell'implementazione di modelli sociali di *Risk Governance*

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

Obiettivi dell'OR7 del progetto CLARA

L'integrazione tra sistemi, la connettività e l'interoperabilità tra sorgenti dati e servizi svolge un ruolo cruciale nel corso delle prime fasi di ricognizione e risposta ad un disastro, a causa del breve tempo disponibile per l'acquisizione di informazioni frammentarie e puntuali e la loro verifica, armonizzazione e contestualizzazione in uno scenario olistico di disastro. L'obiettivo principale di questo obiettivo realizzativo è di investigare il processo cognitivo individuale e collettivo nel corso di emergenze e nella gestione dei disastri utilizzando mappe cognitive e semantiche. Tipicamente la specificità dei contesti di emergenza e gestione dei disastri riguarda una molteplicità di attori e siti. In questi casi l'analisi del processo cognitivo e la caratterizzazione semantica verrà utilizzata per codificare le interazioni tra le squadre di emergenza nella gestione del disastro, e più specificatamente quelle relative alla gestione dei disastri collegati alle infrastrutture critiche urbane. A tal fine verranno utilizzati i risultati di ricerca conseguiti nel corso dell'OR2 e dell'OR6 per mettere in evidenza i concetti e le relazioni che verranno utilizzate in questo OR per realizzare dei sistemi informativi dedicati alla gestione del rischio idrogeologico in ambito urbano, alla mappatura delle infrastrutture critiche ed al coinvolgimento attivo della popolazione alle fasi di risposta di eventi naturali estremi.

Alle attività dell'OR7 del progetto CLARA hanno contribuito, oltre ad Etna Hitech, il Consorzio ITER, il Consorzio TeRN, Meridionale Impianti, e l'Istituto di Scienze e Tecnologie della Cognizione del CNR.

Piattaforma *webgis* per la catalogazione e *data curation* di infrastrutture critiche urbane

D. TERRITO

Consorzio ITER, Siracusa

1. Introduzione

Il consorzio ITER rappresenta la volontà di imprese IT consolidate di aggregare le competenze e i prodotti con l'obiettivo di produrre valore dall'interconnessione di sistemi e dati, ponendo al centro della propria offerta di soluzioni e servizi IT una visione integrata e sistemica dei processi di *business*.

Questa porzione del progetto CLARA ha l'obiettivo di facilitare il processo di interazione tra le squadre di emergenza nel corso della gestione del disastro mentre sono intente a verificare la validità delle informazioni raccolte in campo e costruire uno scenario olistico del disastro partendo dalle informazioni puntuali via via raccolte.

ITER, insieme al partner di progetto EHT, ha condotto uno studio per la costruzione di sistemi informativi dedicati alla gestione delle emergenze, alla mappatura delle infrastrutture critiche ed al coinvolgimento attivo della popolazione alle fasi di risposta di eventi naturali estremi.

L'obiettivo principale di questa attività del progetto ha previsto lo sviluppo di un sistema *software* per gli Enti Territoriali, mediante il quale gli operatori istituzionali potranno:

- gestire i processi di catalogazione, valutazione, previsione, stima di pericolosità, vulnerabilità e rischio;
- gestire gli strumenti di modellazione, simulazione e partecipazione della *Smart Community*;
- accedere ai dati di monitoraggio e di previsione, alle mappe GIS e istanziare scenari simulativi incentrati su fattori naturali, sociali e socio-naturali;
- accedere a specifiche funzionalità di supporto alle decisioni orientate ad una efficace ed efficiente gestione delle comunicazioni nelle fasi di allerta ed emergenza.

2. Rappresentazione logica delle infrastrutture

Il *software* sviluppato è stato denominato *eFM* (*enhanced facility management*). L'applicativo *eFM* è un sistema dedicato alla gestione delle *Facility* di qualsiasi natura, rappresentandole attraverso un insieme di elementi collocati all'interno di un sito e correlandole attraverso collegamenti di diversa natura. È possibile generare, in modo totalmente libero da parte dell'utente, un modello di rappresentazione del sito (*site model*) all'interno del quale collocare gli elementi che si desidera gestire.

Il concetto di elemento è da considerarsi in senso molto generico, infatti *eFM* riconduce all'etichetta di oggetto un elemento di natura qualsiasi (un componente elettronico, un membro del personale, un componente meccanico, una struttura edile, ecc.); tali elementi, sono raggruppati all'interno di un modello dati (*data model*), che è possibile navigare in modo molto semplice e intuitivo.

Ad ogni elemento è associato un insieme di proprietà che lo identificano e inoltre, attraverso schede specialistiche, è possibile descriverlo anche da un punto di vista tecnico.

Gli elementi possono essere correlati tra di loro, contenere altri elementi, essere contenuti in altri elementi, essere localizzati all'interno del sito e avere della documentazione associata.

La trasversalità e la non invasività della piattaforma *eFM*, consente di effettuare, mediante l'uso di procedure specifiche, l'importazione e l'integrazione di dati provenienti da applicazioni esterne mantenendo invariato il funzionamento di quest'ultime: l'obiettivo era infatti permettere nativamente l'apertura e la possibilità di integrazione del sistema per consentire l'acquisizione senza sforzo di dati territoriali. L'architettura tecnica della soluzione è illustrata in Fig. 1.

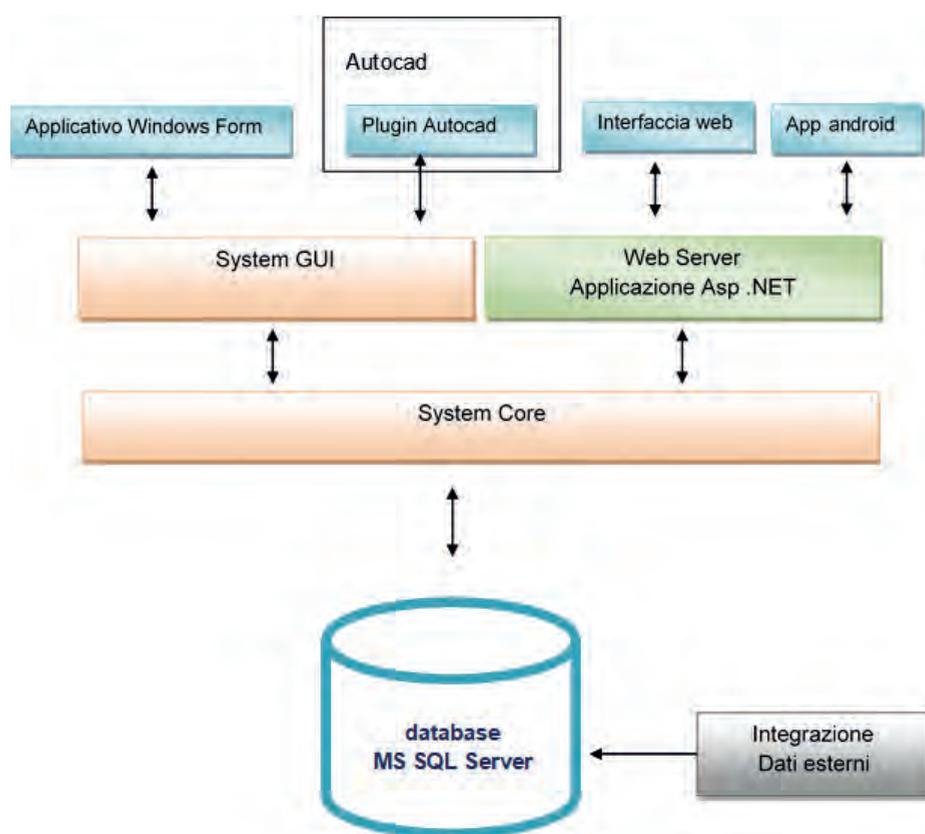


Fig. 1 - Architettura logica della soluzione.

3. Struttura informativa del sistema

La struttura del sistema *eFM* risulta incentrata sul concetto di *asset*. Una infrastruttura può ad esempio essere composta da più *asset* (fondazioni, impianti meccanici, impianti elettrici, reti informatiche, opere civili, ecc.). Le informazioni sugli *asset* vengono utilizzate dai vari moduli per integrare informazioni di diversa natura (es. dati strutturali, documenti, dati di manutenzione, dati sensoristici). In Fig. 2 è riportato uno schema di massima sulla struttura logica del sistema.

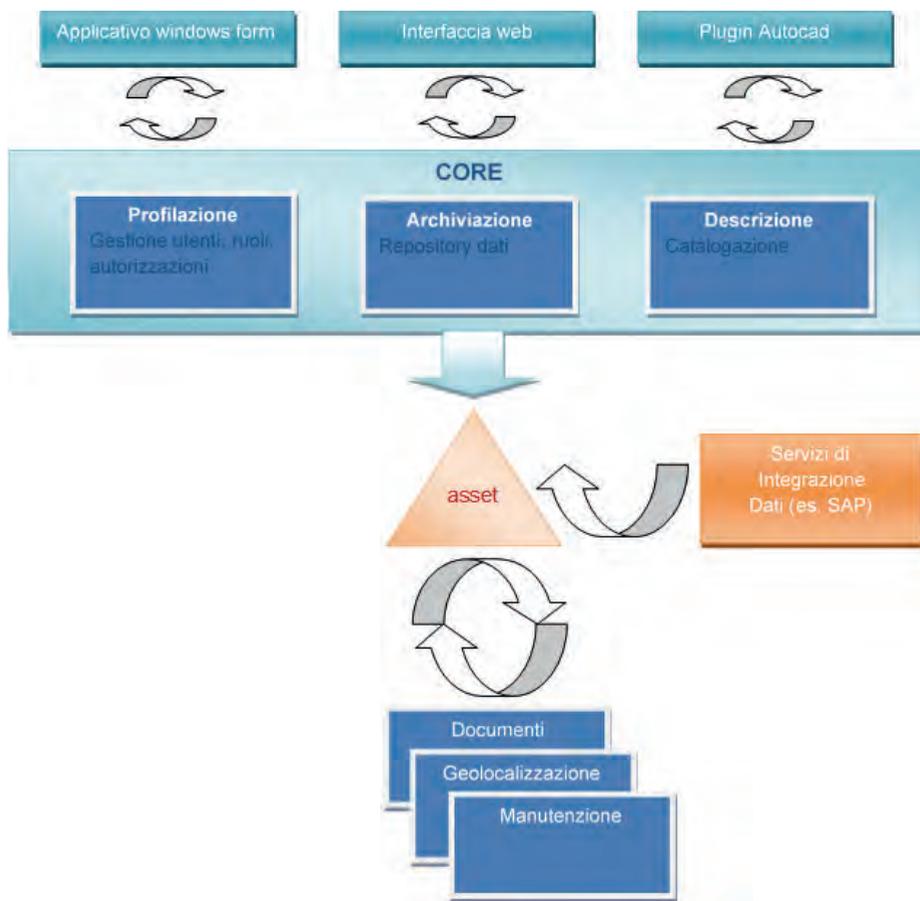


Fig. 2 - Struttura informativa del sistema.

Attraverso *eFM* la conoscenza sul ciclo di vita dell’infrastruttura è interamente catalogata e condivisa, dalla progettazione alla dismissione. La documentazione tecnica è gestita da *workflow* strutturati per il prestito, la consultazione, modifica e *versioning*: ogni modifica è tracciata e storicizzata.

Il *software eFM*, inoltre, è predisposto per fungere da punto di accentramento, controllo e verifica delle informazioni, verificando attraverso processi appositi la correttezza e l’allineamento dei dati fra i vari sistemi. E’ infine dotato di una costellazione di *app Android* per l’assolvimento di alcune funzioni in mobilità: richieste manutentive, consultazione di documenti, acquisizione di dati ispettivi, ecc.

4. Catalogazione e *data curation*

I moduli “Documenti”, “Archivio Tecnico” ed “*Engineering*” consentono di gestire tutta la fase di progettazione degli *asset*, catalogando fin dall’inizio la documentazione tecnica e regolando i flussi di prestito, consultazione e modifica.

Per agevolare ulteriormente la gestione della conoscenza delle infrastrutture e l'integrazione di dati fra sistemi diversi, *eFM* dispone di componenti installabili (*plugin*) sui *software Autodesk AutoCAD* e *Revit*, che consentono l'importazione massiva dei dati a partire dai *database* dei *software* suddetti.

Il popolamento dati di *eFM* può avvenire acquisendo i dati dei singoli elementi direttamente dai *software* di progetto, facilitando in questo modo il processo di passaggio delle informazioni dalla progettazione alla messa in opera. Non sarà infatti necessario creare manualmente il modello dati di *eFM*, ma si disporrà da subito delle informazioni così come consegnate alla fine della progettazione. Questo mette l'utente immediatamente in condizione di operare sul sistema senza dispendiosi inserimenti manuali di dati, e apportando subito, ove necessario, le modifiche necessarie rispetto alla progettazione originaria, creando uno storico del ciclo di vita dell'impianto fin dall'inizio.

È inoltre possibile l'indicizzazione guidata dei disegni all'interno dell'archivio e la creazione di un legame biunivoco fra gli elementi caricati su *eFM* e i singoli elementi progettuali (*block reference*) dentro il disegno *CAD*: ovverosia è possibile dall'interno del disegno richiamare la scheda anagrafica dell'elemento su *eFM* (e quindi accedere a tutte le informazioni e documentazioni correlate) o, viceversa, dalla scheda dell'elemento, accedere al disegno che lo contiene.

5. Mantenimento delle infrastrutture

La vita degli impianti è monitorata attraverso il modulo "Manutenzione", che gestisce interventi di manutenzione periodica, programmata o su chiamata. La conduzione appropriata è gestita attraverso il Manuale Operativo (o Fascicolo dell'Edificio per applicazioni civili), che integra, oltre alle istruzioni, le liste di *asset*, le correlazioni, i documenti allegati.

La documentazione sull'*asset* in questo modo è sempre disponibile in linea e aggiornata all'ultima versione disponibile.

La potenza di *eFM* sta nelle relazioni: partendo dall'anagrafica, *eFM* la estende in portata e profondità, gestendo dinamicamente le relazioni fra *Asset*, Archivi, Manuali, storico manutentivo e dati geospaziali.

eFM è pensato quindi come un archivio elettronico di tutta la conoscenza sulle infrastrutture, una chiave di accesso a tutte le informazioni, che non sia più solo una "immagine congelata" rilasciata dalla società costruttrice al momento della consegna, ma una fonte viva di conoscenza continuamente aggiornata e consultata da tutti i processi aziendali.

Alla modifica o alla dismissione dell'infrastruttura, tutto il suo storico rimane patrimonio dell'azienda, e consente di avere una base solida su cui costruire.

L'Archivio consente di reperire tutti i disegni e la documentazione e di avere un *versioning* dettagliato di tutte le modifiche subite dall'impianto, dall'*as built*, alle evolutive, alla dismissione.

6. Dati spaziali

Il modulo "Geo" di *eFM* sfrutta le tecnologie *Open Street Map* e *Open Layers* per la gestione e visualizzazione dei dati spaziali correlati agli *asset*.

OpenStreetMap (OSM) è un progetto collaborativo (*open source*) finalizzato a creare mappe del tutto simili a quelle a cui siamo tutti abituati con *Google Maps*. Il progetto punta ad una raccolta mondiale di dati geografici, con scopo principale la creazione di mappe e cartografie.

La caratteristica fondamentale dei dati geografici presenti in *OSM* è che possiedono una licenza libera, è cioè possibile utilizzarli liberamente per qualsiasi scopo con il solo vincolo di citare la fonte e usare la stessa licenza per eventuali lavori derivati dai dati di *OSM*. Tutti possono contribuire arricchendo o correggendo i dati.

Gli utenti registrati possono caricare nei *database* del progetto tracce GPS e modificare i dati vettoriali (ossia i disegni che compongono la mappa) usando degli strumenti specifici.

I dati spaziali rappresentano informazioni sulla posizione fisica e sulla forma di oggetti geometrici. Questi oggetti possono essere le semplici posizioni dei punti oppure oggetti di geometria più complessa quali ad esempio paesi, strade o laghi.

Tramite queste tecnologie è stato possibile realizzare specifiche applicazioni *web* per la rappresentazione delle infrastrutture critiche, per la visualizzazione dei servizi di mappa e per l'esecuzione di analisi spaziali relative al funzionamento degli impianti. L'utente può eseguire anche semplici operazioni di modifica sui metadati dei dati territoriali visualizzati e dunque gli utenti qualificati avranno la possibilità di inserire direttamente le informazioni di propria competenza, che andranno ad alimentare il database centrale.

OpenLayers è un componente *software* per la visualizzazione di mappe interattive nei *browser web* più comuni. È un *software* libero, ossia non coperto da licenza (*open source*). *OpenLayers* offre servizi di connessione per poter accedere a diverse fonti d'informazioni cartografiche in Internet: mappe del progetto *OpenStreetMap*, mappe sotto licenze non-libere, protocolli *Web Feature Service*, ecc.

Tramite *OpenLayers* sono state implementate le funzionalità GIS (*geographic information service*) che consentono la gestione delle mappe, l'esecuzione di ricerche sui dati (selezione impianto, visualizzazione di determinate caratteristiche tecniche, documenti, etc.), la modifica e l'analisi spaziale. Per potere accedere a tali funzionalità, all'utente finale non vengono richiesti né l'installazione di alcun software di tipo *desktop*, né particolari competenze tecniche GIS. Accedendo al browser e all'applicativo *eFM*, è possibile individuare gli asset su una mappa, definirne coordinate e altri dati geospaziali, definire ad esempio aree e *layer* di informazioni con tag e metadati, collegarsi e visualizzare in tempo reale dati provenienti sensoristica remota applicata sulle infrastrutture.

Piattaforma per l'elaborazione di scenari di rischio legati ad eventi meteorici estremi in ambiente urbano

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

1. Introduzione

Il Centro Funzionale Decentrato Multirischio (CFDM) della Regione Sicilia emette giornalmente gli avvisi previsionali di allerta del rischio idrogeologico e idraulico. Tali avvisi definiscono il livello di allerta previsto per ciascuna delle 9 macro-aree in cui è suddivisa la Regione Sicilia. L'avviso riporta il livello di allerta associato a ciascuna delle 9 macro-aree per il giorno corrente e per il successivo. I livelli di allerta sono 4: Verde, Giallo, Arancione e Rosso ai quali corrispondono le fasi operative rispettivamente di generica vigilanza, attenzione, preallarme, allarme.

Per la definizione del livello di allerta, in ciascuna delle 9 macro-aree (Fig. 1), il CFDM utilizza un modello idrologico che opera sui 56 bacini idrici, di superficie superiore a 50 km², in cui è suddivisa la Sicilia. Il modello valuta la suscettibilità di ciascun bacino all'innescò di una piena in base al grado di saturazione del suo strato superficiale. Per ciascun bacino, in base al grado di suscettibilità e alle piogge attese il modello valuta il livello di allerta. È da sottolineare che le piogge attese sono stimate sulla base di modelli meteorologici per piogge diffuse di tipo orografico e ciclonico. Non sono quindi oggetto di previsione le piogge di tipo convettivo, ovvero le manifestazioni locali di tipo temporalesco. Quest'ultimo tipo di fenomeni meteorologici sono di particolare interesse perché benché si manifestino solo localmente possono essere particolarmente intensi (bombe d'acqua). Per tale motivo nell'avviso di allerta, qualora siano ravvisate le condizioni per la formazione di celle temporalesche, queste vengono comunque segnalate. Questa segnalazione è però di difficile interpretazione perché, come riportato nell'esempio di avviso, è

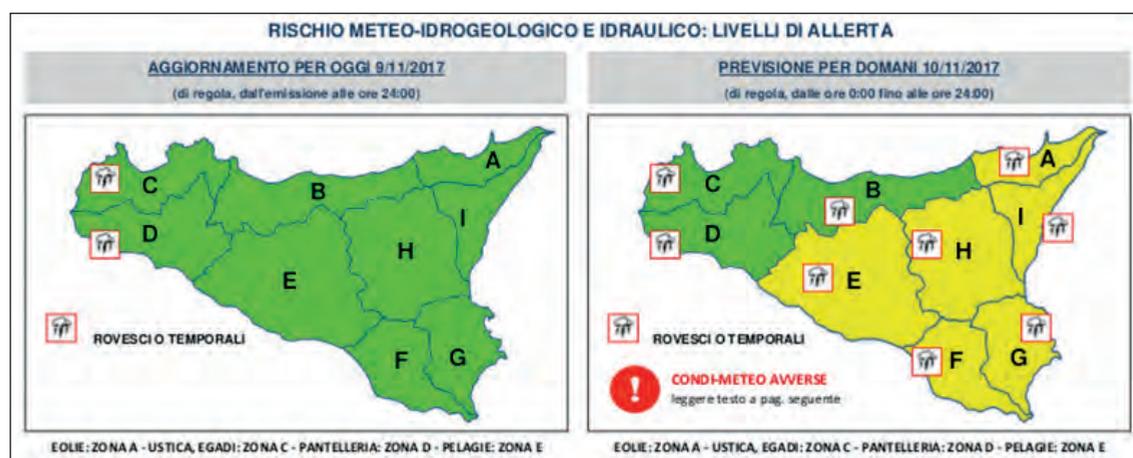


Fig. 1 - Avviso del livello di allerta per le 9 macro-aree.

indicativa di un potenziale stato di rischio da elevato a molto elevato, che però interesserà per brevi durate porzioni di territorio ristrette, e che è associata a macro-aree in cui lo stato generale di allerta può essere anche verde, ovvero di generica vigilanza.

In conclusione:

- l'avviso di rischio idrogeologico è valutato a scala di bacino imbrifero;
- non sono considerati i piccoli bacini costieri a risposta impulsiva;
- non sono considerate le aree ad alto grado di impermeabilizzazione dei suoli;
- non sono considerati i fenomeni meteorici intensi di tipo temporalesco.

In estrema sintesi il sistema di decisione degli stati di allerta per le 9 macro-aree non è funzionale all'emanazione di avvisi che riguardano (Fig. 2):

- aree urbane e periurbane;
- piene indotte da eventi meteorici localizzati e intensi.

Obiettivo dello studio che è stato condotto nell'ambito di questa attività di ricerca prevista nel Progetto CLARA è quindi la definizione di uno strumento di supporto alla decisione per la previsione e gestione di rischi idraulici che:

- operi come estensione del sistema in uso presso il CFDM della Regione Sicilia e quindi in piena sinergia con esso;
- si interfacci in real-time con la rete urbana di sensori pluviometrici ed idrometrici per acquisire in tempo reale intensità e distribuzione delle piogge e il grado di saturazione della rete di drenaggio;
- sia funzionale alla previsione, monitoraggio e gestione di rischi idraulici in ambito urbano;
- possa essere utilizzato quale ambiente di simulazione per l'analisi ex-post di eventi meteorici intensi registrati dal sistema, e per la simulazione di eventi storici o elaborati sinteticamente ai per l'addestramento del personale di protezione civile.

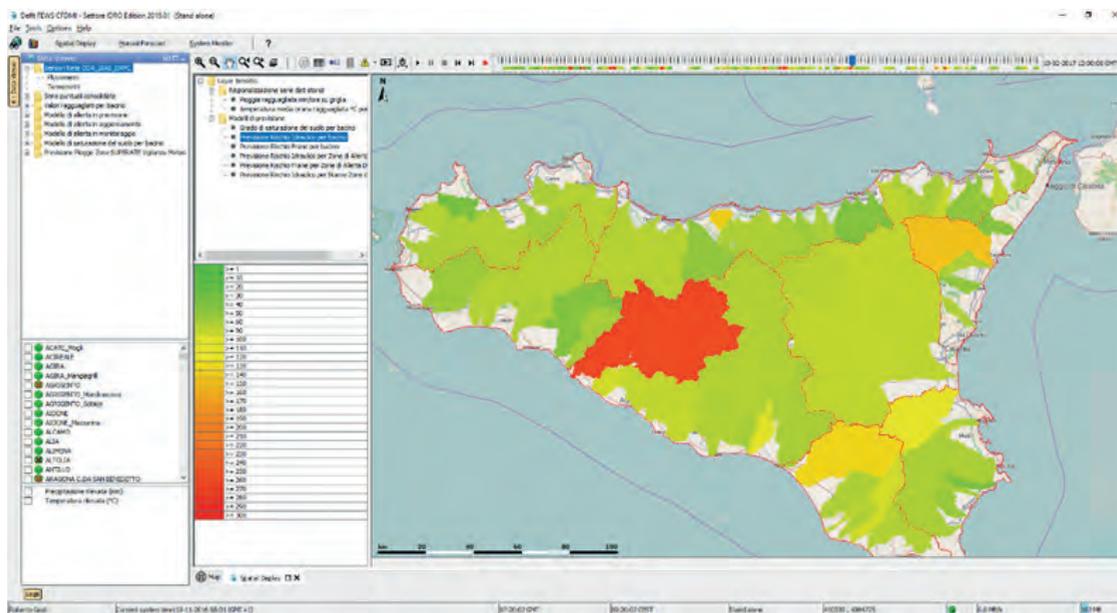


Fig. 2 - Livello di allerta per i 56 bacini, esclusi quelli costieri e urbani.

2. Architettura piattaforma open cloud

Il sistema di allertamento automatico per la mitigazione del rischio idraulico in area urbana è composto da due piattaforme software integrate (Fig. 3):

- Piattaforma SCADA (*Supervisory Control and Acquisition System*);
- Piattaforma ETL (*Extract Transform Load*);

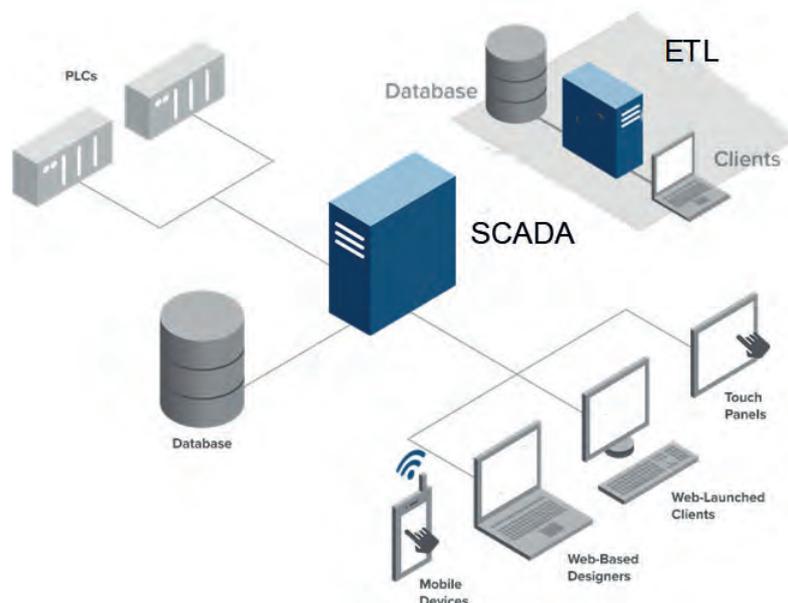


Fig. 3 - Schema architetturale del sistema automatico di allertamento per il rischio idraulico.

3. Piattaforma SCADA

La funzione della piattaforma SCADA è l'acquisizione in tempo reale dei dati di pioggia rilevati dalla rete di pluviometri ricadenti nell'area urbana, dei livelli registrati dagli idrometri posti nei canali di drenaggio ed il controllo della piena funzionalità della rete di telemetria (sensori di pioggia e livelli idrici, dispositivi remoti di acquisizione, rete di comunicazione).

4. Piattaforma ETL

La funzione della piattaforma ETL è l'acquisizione dei dati di pioggia e livelli registrati dalla piattaforma SCADA, l'acquisizione dei dati di pioggia rilevati dalle reti di terze parti, ovvero nel caso della Regione Sicilia da DRPC, SIAS, Osservatorio delle Acque e municipalizzate, la validazione e consolidamento dei dati acquisiti, l'avvio delle procedure per la simulazione dell'effetto al suolo degli eventi meteorici che interessano l'area urbana comunale, l'avvio delle procedure per la stima dei livelli di allerte attesi per i diversi bacini urbani in cui è suddivisa.

5. La rete pluviometrica ed idrometrica

In ambito urbano l’effetto al suolo di un evento meteorico è determinato dall’interazione del costruito (edifici, rete stradale e rete fognaria) con i deflussi superficiali. Quindi a parità di intensità di pioggia, diverse distribuzioni spaziali e temporali delle precipitazioni possono causare effetti estremamente diversi in termini di incremento della pericolosità idraulica locale. Si consideri altresì che in un contesto urbano lo stato del costruito e conseguentemente le modalità di interazione tra le sue componenti e i deflussi superficiali sono caratterizzati da notevole dinamicità. Si pensi ad esempio all’influenza sui deflussi superficiali del grado di pulizia delle caditoie stradali così come all’influenza dei cantieri stradali temporanei o del numero di veicoli presenti sulle strade cittadine. Il medesimo evento meteorico può inoltre sortire effetti differenti al variare della sua distribuzione temporale, oltretutto spaziale. Ad esempio, il grado di esposizione ad eventi la cui portata al colmo si manifesta in prossimità degli orari di punta del traffico cittadino (es: ingresso/uscita degli studenti) è estremamente differente da quelli la cui manifestazione avviene nelle ore notturne o festive.

Tutto ciò premesso per indicare come sia indispensabile, per un sistema di allertamento e mitigazione del rischio idraulico in ambiente urbano, acquisire in tempo reale quale sia l’effettiva distribuzione spaziale delle piogge sull’area urbana. È quindi imprescindibile che ciascuna area metropolitana si doti di una rete pluviometrica ed idrometrica per il monitoraggio di dettaglio sia della distribuzione delle piogge che della loro trasformazione in deflussi superficiali. Naturalmente la rete pluviometrica e idrometrica locale dovrà essere integrata con le reti gestite da altri Enti i cui pluviometri ricadono all’interno dell’area urbana di interesse. Quale esempio si riporta di seguito la distribuzione nell’area della città metropolitana di Catania dei pluviometri gestiti dal SIAS e dall’Osservatorio delle Acque (Fig. 4).

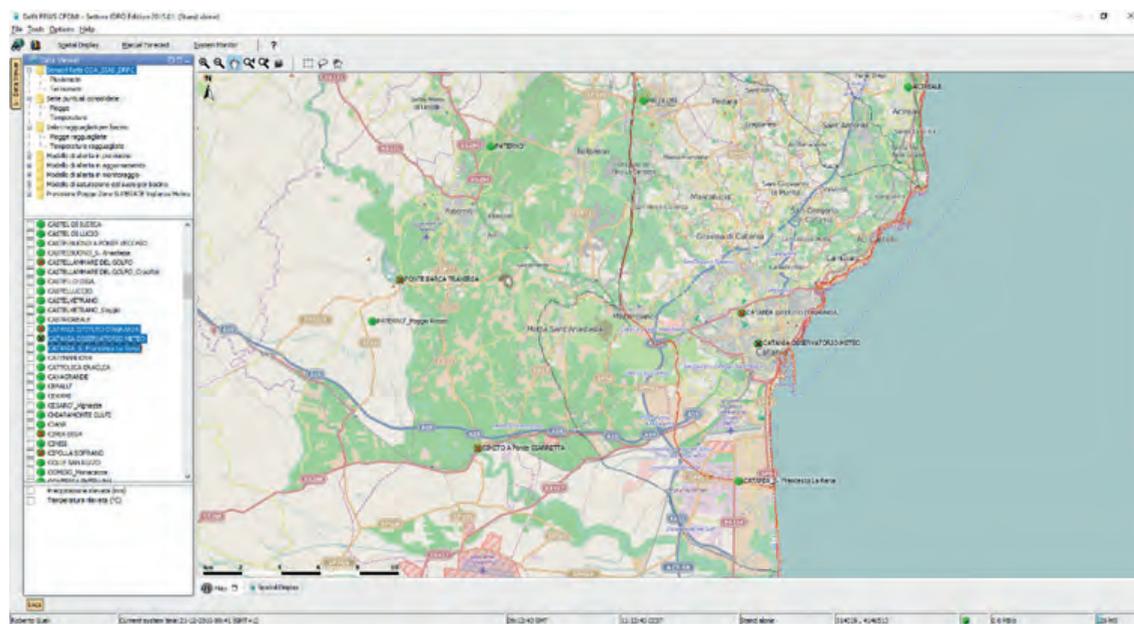


Fig. 4 - Localizzazione dei pluviometri di altri Enti ricadenti nel territorio comunale.

6. Specifiche della piattaforma SCADA

La piattaforma SCADA ha la funzione di provvedere all'acquisizione in tempo reale delle misure registrate dai sensori costituenti la rete di stazioni pluviometriche. Il software storicizza su un data base real-time le serie temporali dei valori acquisiti, consente la visualizzazione a schermo, sia in forma tabellare che sotto forma di trend grafico, oltre alla generazione di report. Consente di impostare la generazione di allarmi nel caso del superamento di soglie. Inoltre, il medesimo software consente la gestione della funzionalità del sistema di telemetria monitorandone i parametri operativi e generando allarmi nel caso di malfunzionamenti (es: livello batteria e stato comunicazione).

La piattaforma SCADA, per la supervisione della rete idrometrica e pluviometrica, dovrà essere implementata utilizzando un software commerciale standard avente le seguenti caratteristiche minime: software SCADA client-server integrato e scalabile, ottimizzato per l'implementazione di applicazioni critiche di telemetria di infrastrutture geograficamente distribuite. Architettura software standard e aperta, tale da rimuovere ogni meccanismo di dipendenza dal fornitore (*vendor lock-in*). Ambiente di sviluppo orientato agli oggetti con le modifiche di configurazione on-line. Offerta di protocolli sicuri senza perdita di dati (DNP3/IEC60870) e di comunicazione affidabili su reti WAN. Gestione della sicurezza multi-livello integrata. Ridondanza tripla di Server e LAN. Facile integrazione nei sistemi di business intelligence. Diagnostica e manutenzione predittiva integrata. Accessibilità alle informazioni acquisite sia attraverso client dedicati sia attraverso browser WEB e applicazioni mobile.

Con la piattaforma SCADA dovrà inoltre essere fornito il software delle periferiche remote delle stazioni pluviometriche. In particolare, il software dovrà supportare i protocolli di comunicazione DNP3 e OPC, la connettività multicanale, l'integrazione con un componente GPS, al fine di migliorare la precisione del time-stamp di acquisizione delle misure, oltre a servizi di *cyber security* adeguati agli standard correnti.

7. Specifiche della piattaforma ETL

La piattaforma ETL rappresenta il cuore del sistema di previsione, monitoraggio e gestione di rischi idraulici in ambito urbano. Il *software* che è stato utilizzato per l'implementazione del sistema ETL è Delft-FEWS (*Flood Early Warning System*) prodotto da Deltares (NL) e rilasciato su licenza gratuita. Il *software* Delft-FEWS è in uso presso l'ARPA Emilia-Romagna per la previsione e gestione delle piene del bacino del Po e presso il CFDM della Regione Sicilia per la generazione degli avvisi previsionali di allerta del rischio idrogeologico e idraulico.

Punto di forza di Delft-FEWS è proprio l'essere in uso presso il CFDM per la previsione a scala regionale. L'adozione da parte di amministrazioni, locali ricadenti nel territorio della regione Sicilia o di quella Emilia Romagna, della medesima piattaforma tecnologica consente quindi di accedere alle medesime informazioni ed elaborazioni effettuate rispettivamente presso il CFDM Sicilia o quello Emilia Romagna, previa stipula di una apposita convenzione, fornendo così agli operatori di protezione civile la visione corografica su area vasta dei fenomeni in previsione e monitoraggio. Nel corso di questo studio la piattaforma ETL è stata estesa per effettuare la previsione e il monitoraggio di maggior dettaglio dei fenomeni meteorici a scala di bacino urbano.

Le funzionalità della piattaforma Delft-FEWS in uso presso il CFDM sono state estese con l'integrazione nell'ambiente di un simulatore idraulico di propagazione delle piene, che in fase di previsione, sulla base della distribuzione di piogge attese, possa consentire l'individuazione delle aree urbane che maggiormente verranno interessate dall'evento meteorico previsto. In fase di monitoraggio il simulatore verrà alimentato con le letture dei pluviometri aggiornando così in real-time i livelli idrometrici attesi in ciascuna area urbana.

Le funzionalità di Delft-FEWS sono state quindi estese per restituire agli operatori di protezione civile la visione aggiornata dell'evoluzione del fenomeno meteorico, sia in fase di previsione che in fase di osservazione, e del suo impatto sull'area urbana, in aggiunta a quella di area vasta. In maggior dettaglio di seguito si riporta uno screen-shot dell'applicazione utilizzata dal CFDM dove si evidenziano i bacini prossimi all'area urbana del Comune di Catania per i quali si effettua la valutazione del livello di allerta (Fig. 5).

Si noti come l'area del Comune di Catania, ovvero l'area urbana compresa tra il bacino del Lavinaio Platani a nord e del Simeto a sud, non è compresa tra quelle che concorrono alla valutazione del rischio idraulico e idrogeologico. Ai modelli idrologici in uso presso il CFDM per la valutazione dei bacini naturali (Simeto e Lavinaio Platani) si sono aggiunti quindi modelli idraulici per la simulazione della propagazione della piena tra gli elementi del costruito che caratterizzano il tessuto urbano cittadino.

8. Il processo di decisione

Delft-FEWS è un ambiente per la rapida prototipizzazione di sistemi di supporto alle decisioni specificamente progettato per applicazioni in ambito di protezione civile. Nel corso di questo studio la piattaforma è stata infatti configurata per supportare gli operatori in tutto il processo di

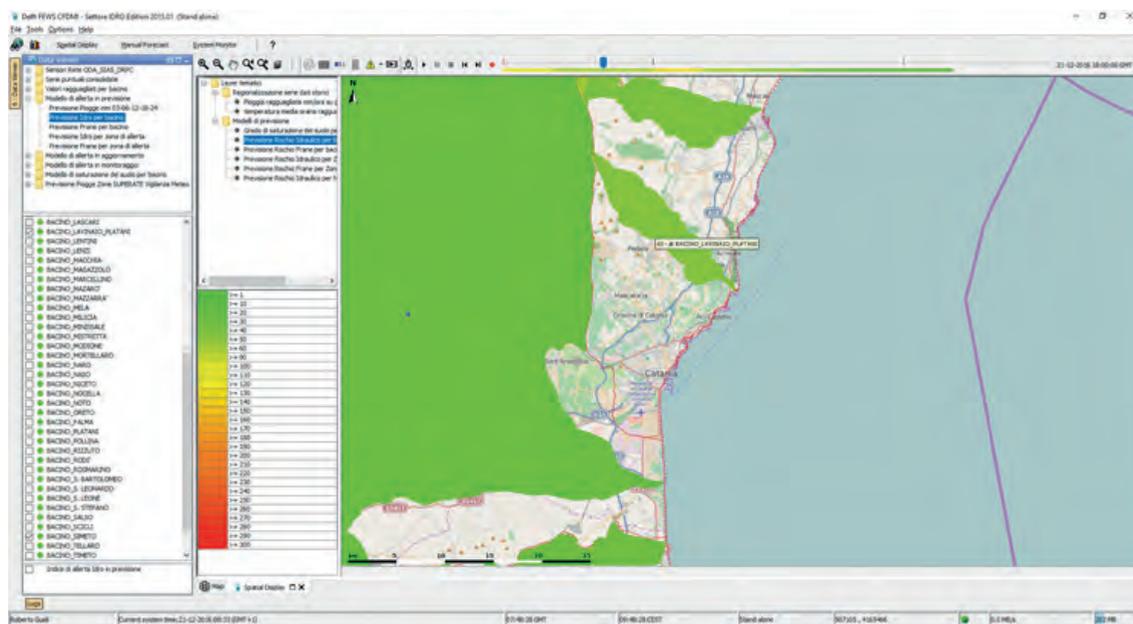


Fig. 5 - Bacini prossimi al Comune di Catania oggetto di valutazione per il rischio idraulico.

decisione sia in fase di previsione che di monitoraggio.

Il processo di decisione è così articolato:

fase di previsione:

1. avvio su base giornaliera della procedura di valutazione del livello di allerta;
2. acquisizione a scala di area vasta e al giorno precedente dello stato di suscettibilità alle piene dei bacini ricadenti nelle aree di allerta I e H;
3. acquisizione a scala di area vasta delle precipitazioni attese per il giorno corrente e per il successivo;
4. valutazione a scala di area vasta del livello di allerta idraulico e idrogeologico per il giorno corrente e per il successivo. La valutazione è effettuata utilizzando i medesimi modelli idrologici in uso presso il CFDM Sicilia;
5. sulla base delle precipitazioni attese per il giorno corrente e per il successivo, valutazione a scala urbana del livello di allerta idraulico. La valutazione è effettuata utilizzando il simulatore idraulico bidimensionale per ciascuno dei bacini che ricadono all'interno del perimetro cittadino;
6. la valutazione viene ripetuta nel caso vengano acquisiti aggiornamenti rispetto alle precipitazioni attese.

Fase di monitoraggio, ovvero durante la manifestazione di un evento meteorico:

1. avvio della procedura non appena il sistema di telemetria comunale (SCADA) rilevi un evento meteorico;
2. acquisizione in real-time dei dati rilevati dalla rete pluviometrica e idrometrica comunale e da quelle di Enti terzi (SIAS, Osservatorio delle Acque, gestore comunale della rete di drenaggio urbana);
3. elaborazione in tempo reale delle serie temporali acquisite dal sistema di telemetria (SCADA) comunale e da quelle di Enti terzi;
4. esecuzione ciclica del simulatore di propagazione delle piene per ciascuno dei bacini ricadenti nell'area urbana;
5. aggiornamento in continuo dello stato di allerta per ciascuno dei bacini ricadenti nell'area urbana;
6. arresto della procedura non appena il sistema di telemetria rilevi l'esaurimento dell'evento meteorico.

Le procedure di previsione e monitoraggio qui sinteticamente descritte richiedono l'esecuzione di una sequenza di procedure di calcolo di un alto livello di complessità (es.: i modelli idraulici) e che devono elaborare in real-time grandi moli di dati (le misure pluviometriche e idrometriche rilevate dalla rete di telemetria).

La piattaforma si è configurata perché si possano svolgere automaticamente e in modalità controllata tutta la sequenza di operazioni appena descritte, senza che sia richiesto alcun intervento da parte dell'operatore.

9. Funzionalità di orchestrazione automatica delle procedure di calcolo

Particolare punto di forza dell'attività svolta è stata la codifica delle procedure la configurazione di un motore di *workflow* per la completa automazione della sequenza di procedure che devono

essere applicate alle informazioni pluviometriche e se presenti idrometriche. In particolare, il motore di workflow consente di rendere completamente automatico lo svolgimento delle sequenze di calcolo di tutta la catena metrologica e modellistica che a partire dalle prime fasi di acquisizione dei dati di pioggia, permettono passo dopo passo di valutare il grado di allerta atteso per ciascun bacino urbano.

La diponibilità di un motore di *workflow* robusto ed affidabile è fondamentale perché il sistema possa operare in modalità automatica senza la necessità della supervisione da parte di operatori di sala controllo.

Delft FEWS è stato utilizzato quale ambiente di sviluppo di una soluzione verticale avente il compito di orchestrare e automatizzare tutte le procedure di acquisizione, elaborazione, organizzazione e produzione di report per rendere disponibili e fruibili in mobilità tutti gli elementi informativi.

L'applicazione è stata quindi studiata per gestire:

- tutte le tipologie di dati e di informazioni che intervengono nell'attività di prognosi e monitoraggio;
- la congruità e la coerenza delle informazioni acquisite dalle reti di telemetria, inserite e/o modificate.

A tal riguardo l'intero processo di importazione dalle reti di telemetria è stato automatizzato, per essere successivamente applicati i controlli sia formali che di coerenza. Si consideri che, grazie all'architettura nativamente aperta della soluzione, a questi possono essere aggiunti ulteriori controlli di secondo livello estendendo le funzionalità della soluzione con integrazione di funzioni di elaborazione geostatistica.

È previsto che il processo si svolga iterativamente. La soluzione prevede infatti che si possa anche registrare per ogni valore acquisito uno stato indicante quale test di controllo sia stato superato in modo da consentire all'operatore di verificare la qualità di ciascuna serie importata e di prendere delle decisioni di conseguenza. Nel caso sia richiesto è previsto pure che alcune condizioni di non superamento di specifici controlli attivino automaticamente specifici *workflow* che operino delle trasformazioni sulla serie:

- ricostruzione della serie
 - *gap filling*;
 - *smoothing*;
- eliminazione dei valori anomali (es.: *spike*);
- eliminazione della serie.

Ciascuna funzione potrà essere svolta in modalità automatica oppure dagli utenti aventi un profilo coerente con le autorizzazioni richieste. Inoltre, Delft-FEWS registrerà nel data base centrale le azioni svolte da ciascun utente.

Più in generale il processo tipico di lavorazione del dato offerto dalla piattaforma è descritto dalla Fig. 6.

Superate la fase di validazione le serie acquisite verranno archiviate nel data base centrale (GEO DB) e rese disponibili agli enti/utenti preposti oltre ad essere disseminate al pubblico. Inoltre, le stesse serie potranno essere sottoposte a successive elaborazioni di trasformazione, utilizzando ad esempio le diverse funzioni statistiche e di interpolazione spaziale disponibili. Nel caso si volessero sottoporre ad elaborazioni più complesse è possibile configurare dei workflow per rendere automatica l'esportazione di informazioni di configurazione e di specifiche serie



Fig. 6 - Processo tipico di lavorazione del dato.

di valori perché possano essere date in input a modelli di elaborazione esterni a Delft-FEWS, come nel caso del simulatore idraulico o nel caso del modello idrologico utilizzato dal CFDM. Delft-FEWS si occuperà anche di avviare l'applicativo del modulo di simulazione esterno e di importarne successivamente i risultati, perché possano essere trattati dalle funzioni di validazione, trasformazione, archiviazione e reportistica di Delft-FEWS come se fossero stati elaborati dall'ambiente stesso.

Delft-FEWS è un sistema aperto che consente di sviluppare specifici adapter per l'interoperabilità con applicazioni terze. Ma in particolare è già disponibile un ricco portafoglio di *adapter* per una grande varietà di modelli di simulazione idraulica, idrologica e geomorfologica. La lista completa dei modelli per i quali sono già disponibili degli adapter si può visionare al seguente link:

<https://publicwiki.deltares.nl/display/FEWSDOC/Models+linked+to+Delft-Fews>.

10. Architettura modulare

Delft-FEWS è un ambiente di sviluppo aperto, totalmente configurabile ed espandibile, che fornisce un ricchissimo portafoglio di strumenti e routine per la realizzazione di piattaforme finalizzate all'acquisizione di serie spazio-temporali, la loro validazione, consolidamento, interpolazione spaziale, analisi, data assimilation, integrazione con modelli meteorologici, idraulici, idrologici, geomorfologici e di qualità delle acque maggiormente diffusi nella comunità scientifica oltre a strumenti di mapping e presentazione in forma grafica o tabellare dei dati sia grezzi che elaborati.

Delft FEWS è stato utilizzato come backend del Cruscotto Operativo attraverso cui gli operatori di protezione civile in mobilità potranno accedere alle informazioni riguardo lo stato e l'evoluzione attesa dei fenomeni in osservazione. In questa configurazione le caratteristiche prestazionali sono adeguate all'esecuzione di compiti di *Early Warning* di sistemi complessi e che richiedono l'analisi di grandi moli di dati acquisite da sistemi di telemetria. L'architettura modulare della soluzione Delft FEWS è rappresentata in Fig. 7.

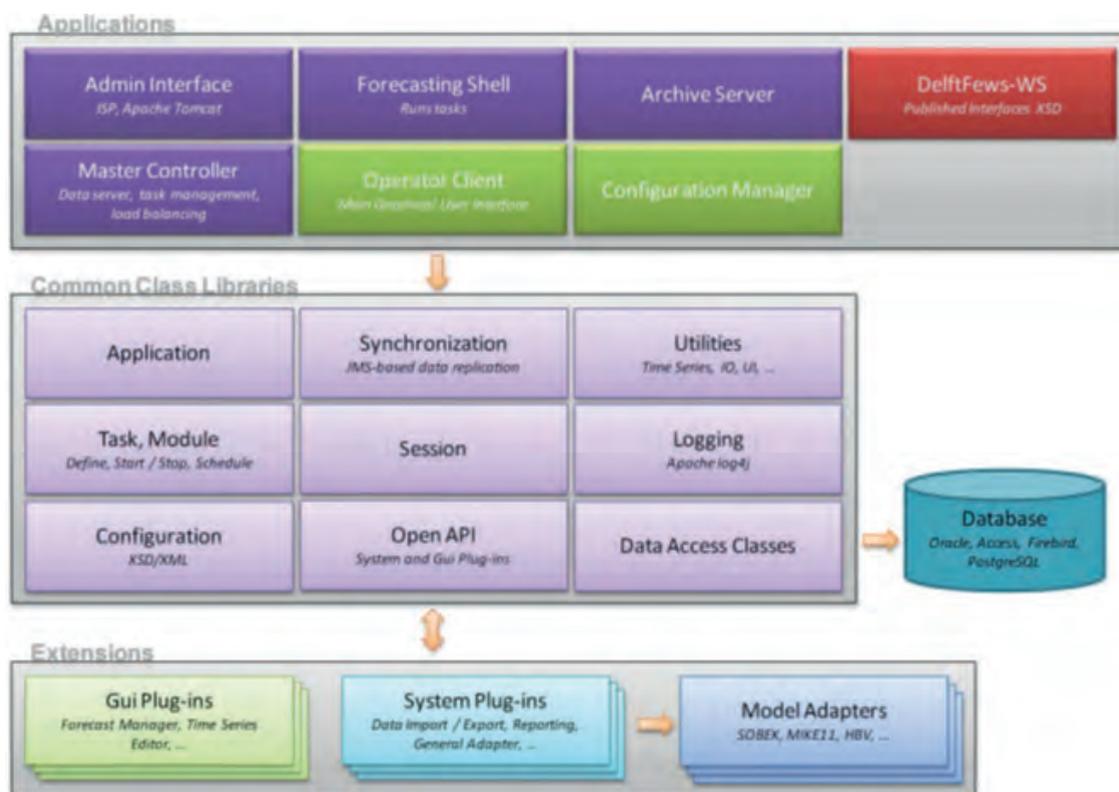


Fig. 7 - Architettura modulare della soluzione Delft FEWS.

Tra i componenti applicativi particolare rilevanza ha il *Master Controller* che è responsabile dell’orchestrazione dell’esecuzione delle catene modellistiche e il componente *Configuration Manager* che gestisce il comportamento dell’ambiente fino al più piccolo dettaglio, e che può essere controllato dall’utente attraverso la manipolazione/editazione di file di configurazione in formato XSD/XML.

Delft FEWS dispone di una interfaccia generalizzata (FEWS-PI) che consente di integrare qualsiasi tipo di modello commerciale o sviluppato dall’utenza, solo adeguando i formati di interscambio. Inoltre, aderisce allo standard OpenMI (*Open Modeling Interface*) per la cooperazione applicativa con modelli di simulazione a tempo di esecuzione.

La piattaforma è dotata di moduli che consentono di importare dati in tempo reale da sorgenti esterne, come dati meteo web, o dati idrologici da DB esterni. Questi dati includono ad esempio serie temporali ottenute da telemetria, livelli idrici, precipitazioni e dati meteo osservati, dati previsionali meteorologici, dati radar e previsioni meteo numeriche.

Delft-FEWS rende disponibili, oltre ai formati standard XML, xls, csv e shp, una ricchissima libreria di funzioni predefinite per l’importazione di dati in resi in diversi formati sia scalari che grid. Tale disponibilità rende più semplice l’eventuale evoluzione del sistema nel caso vi sia successivamente la necessità di integrare sorgenti dati diverse dalle attuali. Solo alcuni tra quelli nativamente disponibili sono elencati in Fig. 8.

Tipo	Descrizione	Tipo di dato
CSV	csv standard	scalare
Delft-FEWS-PI	XML	scalare
EA XML	Environment Agency format	scalare
SWE	Sensor Web Enabled service	scalare
WaterML	WaterML 2.0 Timeseries import	scalare
WQCSV	Water Quality csv file	campionamento
WRFGrads	WRF file import	grid
NetCfd	NetCFD data file	grid
Landsat HDF5	Landsat data file	grid
ArcInfoAscii	ArcInfo/Arcview Ascii grid format	grid
BUFR	Dati meteo	grid
Database import	Generic database import	scalar

Fig. 8 - Delft-FEWS formati di import pre-configurati.

11. Modulo per l'importazione delle precipitazioni attese

Per consentire la completa automazione dell'esecuzione delle procedure per la valutazione dell'allerta per il rischio idraulico e idrogeologico è necessario che sia possibile acquisire le informazioni relative alle piogge attese in un formato numerico.

Delft-FEWS rende disponibile un apposito modulo per l'importazione di file dati contenenti le informazioni di previsione meteorologica (Fig. 9).

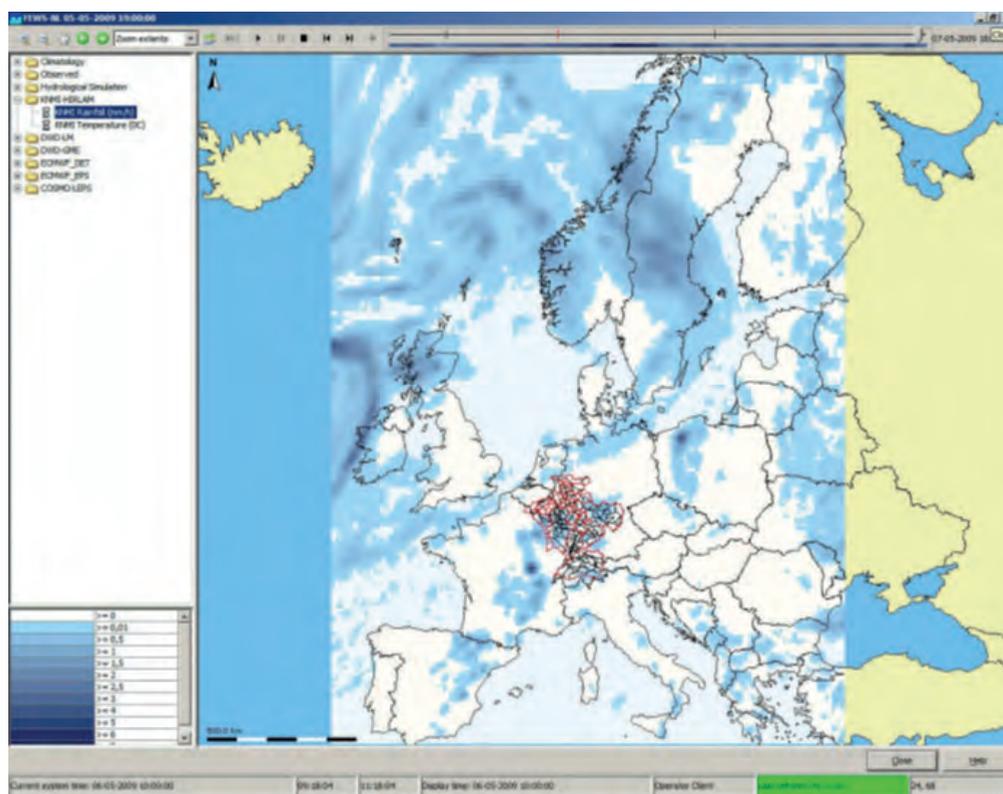


Fig. 9 - Esempio di visualizzazione delle precipitazioni in mm attese.

Più in generale la piattaforma è dotata di moduli che consentono di importare dati in tempo reale da sorgenti esterne, come dati meteo *web*, o dati idrologici da DB esterni. Questi dati includono ad esempio serie temporali ottenute da telemetria, livelli idrici, precipitazioni e dati meteo osservati, dati previsionali meteorologici, dati radar e previsioni meteo numeriche. I dati vengono importati utilizzando formati di interscambio standard, come CSV, XML, e GRIBASCII. L'importazione di dati esterni supporta anche le previsioni meteo comunemente prodotte dalle agenzie di previsione meteorologica (NOAA, ECMWF).

12. Modulo per il coaching degli operatori di protezione civile

Riguardo alla riproducibilità delle simulazioni eseguite in fase di analisi, Delft FEWS offre dei servizi specifici per sviluppare applicazioni finalizzate a consentire attività di analisi *ex-post* di eventi registrati. In particolare per l'analisi di eventi già registrati Delft FEWS offre una funzionalità in modalità *coaching*. Questa modalità è pensata per l'addestramento del personale di sala controllo, non tanto per addestrarsi all'uso dell'applicazione informatica, ma per addestrarsi alla gestione di eventi critici. La modalità *coaching* consente di selezionare un evento tra quelli registrati, e di osservare la sua evoluzione, il trainer potrà simulare alcuni scenari, come ad esempio la mancanza di alcune informazioni o errori di misura e valutare la reazione del discente/i (Fig. 10).

13. Modulo per l'interoperabilità con applicazioni di terze parti

Delft-FEWS espone una interfaccia di programmazione basata su SOAP e chiamata "FEWS PI" attraverso la quale è possibile estendere le funzionalità di Delft-FEWS.

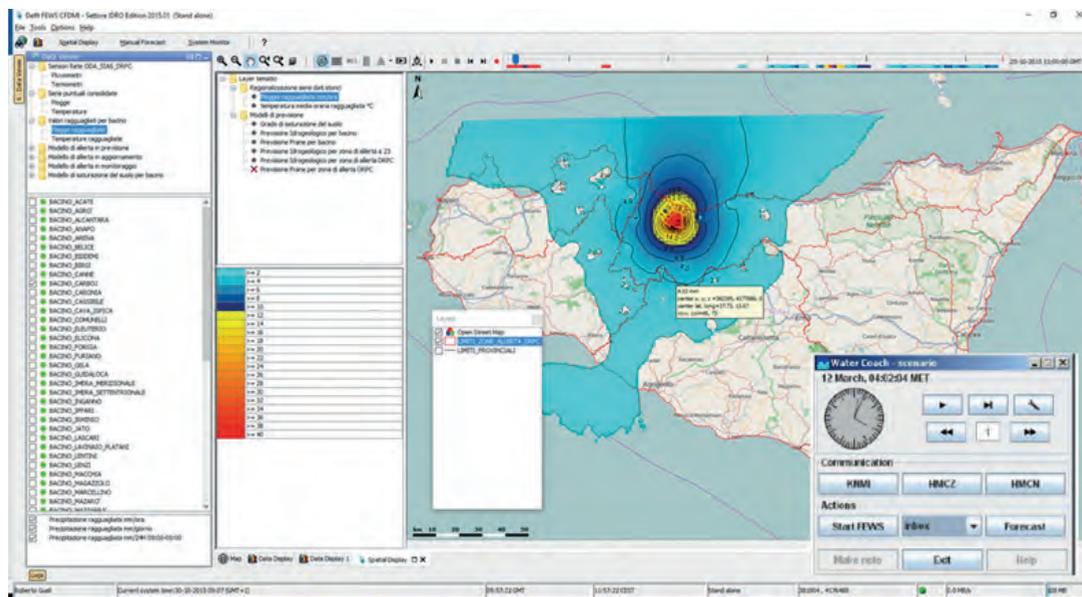


Fig. 10 - Interfaccia per l'addestramento del personale alla gestione di eventi.

Nel caso non si debbano realizzare nuove funzionalità complesse per le quali è necessario ricorrere a FEWS PI ma si richiede più semplicemente di scambiare dati con applicativi esterni si può ricorrere molto più semplicemente alle ricchissime funzionalità di esportazione/importazione di dati usando ad esempio il formato di scambio nativo di Delft-FEWS che è XML.

In maggior dettaglio utilizzando questa tecnologia si forniranno le procedure per la piena integrazione della soluzione nel sistema di allertamento del Dipartimento di Protezione Civile della Regione Sicilia. In particolare, la soluzione si integrerà in modo nativo con:

Piattaforma per l'implementazione di DSS per l'*Early Warning* Delft-FEWS, già nella disponibilità del CFDM-Idro

Piattaforma GECOS di *Early Warning* già in uso al SORIS del Dipartimento di Protezione Civile della Regione Sicilia e che è basata sul protocollo CAP per l'interoperabilità tra sistemi e dispositivi di allerta.

14. Modulo per la mitigazione in real time delle piene urbane

Il meccanismo di formazione delle piene nelle aree urbane è del tutto differente da quanto avviene nelle aree caratterizzate da una minore antropizzazione. Contrariamente infatti da quanto avviene nei bacini naturali, il suolo dei bacini urbani è caratterizzato da un alto grado di impermeabilizzazione, e ciò rende la risposta di questi bacini ad un evento meteorico indifferente rispetto alla cumulata delle precipitazioni pregresse, quindi in questi casi la quantità di deflusso superficiale dipende esclusivamente dalla pioggia corrente. Inoltre, nei bacini urbani è presente una rete di drenaggio che raccoglie le acque di scorrimento superficiale. Solo nel caso le precipitazioni siano tali da saturare la rete di drenaggio, oppure nel caso abbastanza frequente le vie d'accesso alla rete di drenaggio siano localmente ostruite l'onda di piena non potrà far altro che propagarsi in superficie attraverso il tessuto stradale cittadino.

Nel caso le vie d'accesso alla rete di drenaggio risultino parzialmente o del tutto ostruite, la soluzione risiede nel pianificare le necessarie attività di manutenzione ordinaria per la rimozione dei detriti il cui accumulo al di sopra delle caditoie stradali o all'interno dei rispettivi pozzetti riduce sensibilmente l'efficacia di questi dispositivi. Nel caso invece ci si voglia proteggere da eventi meteorici di tale intensità da saturare la rete di drenaggio, la prima soluzione proposta sovente dagli amministratori è rappresentata da interventi di potenziamento della rete di drenaggio con la realizzazione, ad esempio di collettori e canali di gronda posti a protezione dell'area urbana. Quest'ultimo approccio non è certamente il migliore perché ottiene quale risultato quello di spostare semplicemente il limite più in alto, inoltre nel momento in cui una di queste infrastrutture poste a protezione della città dovesse andare in crisi le portate coinvolte che verrebbero dirottate in superficie sarebbero sia dal punto di vista dei volumi che dell'energia molto importanti per cui i danni attesi non potrebbero che essere rilevanti.

Una via alternativa certamente più sostenibile è quella di studiare la realizzazione di dispositivi di laminazione della piena. Tali dispositivi non sono altro che aree predisposte per essere allagate in caso di emergenza contribuendo in questo modo a ridurre l'altezza al colmo dell'onda di piena. In altre parole, con questi dispositivi si opera la trasformazione del profilo dell'onda di piena, da un andamento che interessa un breve intervallo di tempo ma di ragguardevoli altezze al colmo, in uno i cui i volumi trasportati sono sempre gli stessi ma sono distribuiti su di un intervallo

temporale molto più ampio e conseguentemente con una altezza al colmo considerevolmente ridimensionata. Questa seconda soluzione richiede l'impegno di minori risorse ed offre un contributo positivo qualunque sia l'intensità della pioggia, incrementando considerevolmente in questo modo la resilienza dell'ambito urbano alle piogge. Quest'ultima strategia è largamente impiegata ad esempio in Olanda, con la realizzazione di aree deputate ad accogliere le acque in eccesso e che sono denominate "polder". In ambito urbano tali aree potrebbero essere realizzate nelle piazze, nei parchi o in aree spartitraffico stradale. Per gestire il riempimento e il successivo svuotamento di queste aree inondabili sovente si ricorre all'utilizzo di pompe idrovore. Lo stato dell'arte prevede che tali pompe idrovore siano provviste di sistemi automatici di controllo ad evento, attraverso cui comandare l'avviamento o l'arresto. L'evento che scatena l'accensione o lo spegnimento della pompa idrovora è il superamento di una soglia da parte del livello idrico nella vasca di monte oppure nella vasca di valle. Il tipo di controllo ad evento è essenzialmente reattivo e non ha capacità predittive tali da operare strategie di gestione intelligenti delle sequenze di riempimento e svuotamento della vasca di laminazione, strategie che consentano ad esempio di minimizzare i risparmi energetici o di massimizzare l'utilizzazione dei volumi disponibili per laminare la piena.

In questo AR si è studiato un sistema innovativo di gestione ottimizzata delle pompe idrovore operante in real time che consentisse una gestione efficace dei dispositivi di laminazione delle piene.

Il caso studiato è rappresentato in Fig. 11 ed è composto da un impianto di sollevamento e da due vasche, una di monte ed una di valle. Il livello nella vasca di monte è influenzato dagli afflussi meteorici in ingresso e dal deflusso controllato dalla pompa idrovora. Il livello della vasca di valle è influenzato solo da fattori esterni al processo e quindi è indifferente ai volumi sollevati dall'idrovora.

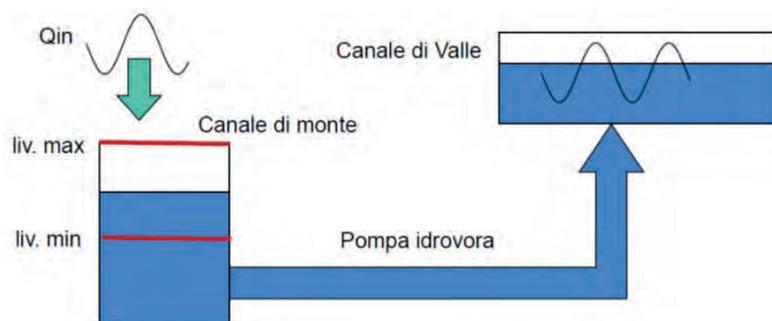


Fig. 11 - Schema funzionale di un sistema di drenaggio governato da una pompa idrovora.

L'architettura del componente di ottimizzazione real time è mostrata in Fig. 12. Il componente deve essere posto in cooperazione applicativa con il sistema di supervisione e controllo, da questo sistema preleva le informazioni sullo stato del sistema da controllare, ed a questo sistema rende disponibile la tabella della sequenza ottima degli avvii/arresti. Il controllo si basa sulla disponibilità di un modello fisicamente basato delle prestazioni dell'impianto che, nel caso specifico è stato realizzato con open modelica.

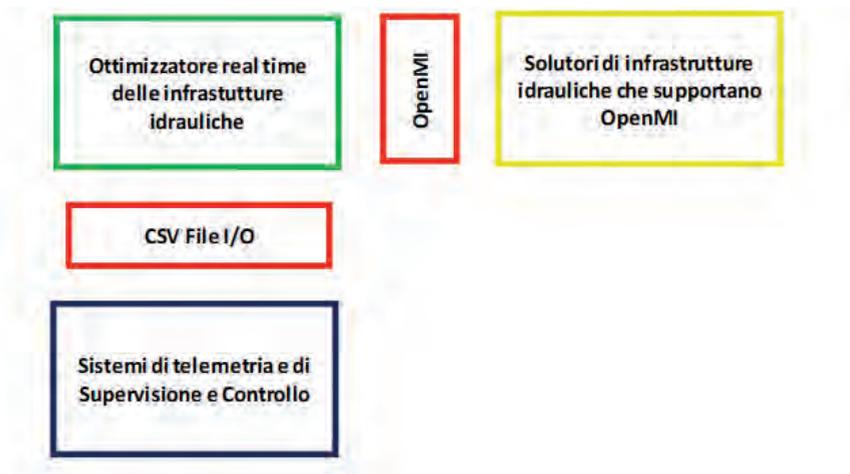


Fig. 12 - Architettura controllo smart real time.

Caratteristiche del controllo smart real time che si è studiato sono le seguenti:

- ottimizzatore basato sull'algoritmo di programmazione lineare;
- modellazione convessa della regione di ammissibilità delle soluzioni potenziali;
- gestione di variabili di controllo sia analogiche che intere (ottimizzazione misto intera);
- ottimizzazione multicriteriale;
- target passo passo;
- target all'orizzonte temporale;
- prioritizzazione delle funzioni obiettivo (*goal programming*).

La scelta di utilizzare la programmazione lineare in uno con la modellazione in forma convessa è finalizzata a garantire l'esistenza di una soluzione, tale caratteristica è fondamentale per una utilizzazione automatica e in real time, senza che vi sia la mediazione di un operatore. Ulteriore punto di forza dell'algoritmo che è stato studiato per affrontare problemi misto interi, in cui sono presenti variabili di controllo sia analogiche che digitali, ciò consente ad esempio di gestire la modulazione delle pompe asservite a variatore elettronico di velocità e sia pompe on/off. Ultima caratteristica degna di nota è la possibilità di configurare una molteplicità di funzioni obiettivo, alcune delle quali devono essere soddisfatte per ciascun passo temporale ed altre che invece si richiede siano soddisfatte solo all'orizzonte temporale. Inoltre, nel caso di una molteplicità di funzioni obiettivo è possibile definire una lista di priorità che ordina le funzioni per rilevanza.

L'algoritmo è stato verificato nel caso in esempio dove la configurazione del controllore smart è la seguente:

Funzione obiettivo è la minimizzazione:

- dell'energia assorbita dalla pompa per il lavoro meccanico eseguito;
- del costo dell'energia utilizzata funzione di fasce orarie di prezzo;

nel rispetto di alcuni vincoli:

- il mantenimento del livello nella vasca di monte all'interno della fascia di ammissibilità;
- la sequenza di attivazione/arresto della pompa deve essere tale da mantenere la pompa accesa per almeno tre ore consecutive prima di poter procedere al suo arresto;

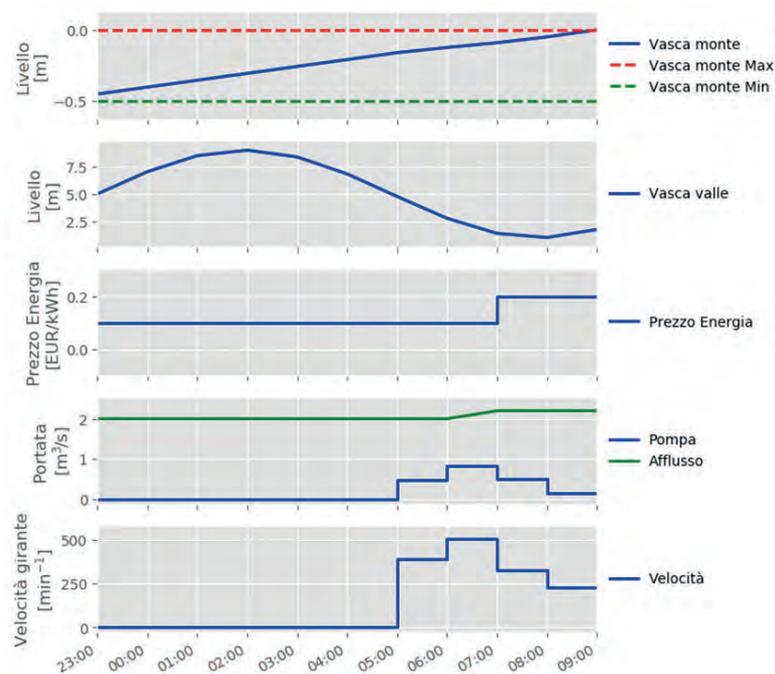


Fig. 13 - Trend dei parametri caratteristici del controllo smart dell'idrovora.

I risultati dell'ottimizzazione sono esposti in Fig. 13, dove si riportano i trend dei principali parametri del problema.

15. Conclusioni

In questo AR è stata studiata una applicazione per la gestione del rischio idrogeologico in ambiente urbano. Nello studio si è premiata l'interoperabilità con le analoghe applicazioni utilizzate in ambito regionale (CFDM) per la produzione giornaliera degli avvisi di allerta. L'applicazione è stata verticalizzata per consentire la gestione del rischio idrogeologico in ambiente fortemente antropizzato. Inoltre, è stato studiato un algoritmo di gestione ottimizzata dei sollevamenti meccanici utilizzati nella gestione dei bacini di laminazione delle piene.

Progetti *citizen-centred* per l'esplorazione territoriale

R. GUELI

Etna Hitech S.c.p.a, Catania

1. Introduzione

La diffusione di piattaforme “*social*” è stato indubbiamente lo spunto per investigare nuove possibilità di coinvolgimento dei cittadini nei più diversi ambiti della vita pubblica. Una nuova frontiera è stata aperta e nuove questioni, sia tecnologiche che organizzative e legali sono state poste. In particolare, recentemente vi è stato un fiorire di iniziative per lo studio di soluzioni partecipative per la gestione ambientale. Una delle questioni maggiormente dibattute nella comunità scientifica è il rapporto tra queste nuove piattaforme partecipative, in cui l'uomo-cittadino non è solo un semplice fruitore di informazioni ma è lui stesso un produttore, e le infrastrutture pubbliche di riferimento per la gestione di dati ambientali. In particolare, infrastruttura di riferimento per l'interoperabilità dei dati ambientali è la direttiva INSPIRE, che in Italia è stata recepita con il D.Lgs 32/2010. Diverse iniziative di ricerca hanno tra gli obiettivi quello di contribuire all'interoperabilità tra le osservazioni effettuate da “*sensori umani*” con gli attuali sistemi di riferimento per l'interoperabilità di dati spaziali come GEOSS, GMES e INSPIRE (Barre, 2014). In CLARA questo problema ancora oggi aperto è stato ulteriormente esteso includendo l'interoperabilità tra INSPIRE e i risultati di operazioni di *crowdsourcing* cooperativo, in cui squadre di droni autonomi e sensori umani si coordinano per compiere missioni di esplorazione territoriale. Altra questione riguarda l'interoperabilità e riusabilità tra progetti *citizen-centred* non solo dal punto di vista tecnologico ma anche organizzativo ed in relazione alle tematiche di tutela di dati sensibili personali. Quest'ultimo tema è particolarmente rilevante per quei progetti che esplorano meccanismi di interoperabilità tra sistemi di allertamento (Alfonso, 2014). La tendenza attuale è infatti quella di inviare messaggi di allerta il cui contenuto semantico è specifico per caratteristiche culturali, linguistiche e di abilità dei soggetti *target* (Klafft *et al.*, 2014). In CLARA la sfida della specificità del soggetto umano è stata colta includendo nell'ambiente tecnologico modelli socio-cognitivi per la valutazione della pericolosità degli scenari esplorati. Ultimo ma certamente non meno importante tra i temi maggiormente discussi è il rapporto tra *Smart Cities* e iniziative *citizen-centred*. Questo tema è anzi inclusivo di quelli sopra esposti. La differenza sostanziale tra questi due ambiti è il contenuto “*social*” di ciascuno di questi. Le *Smart Cities* sono progetti top-down in cui l'amministrazione locale gestisce servizi finalizzati ad incrementare la partecipazione attiva della cittadinanza alla vita pubblica, in questo caso le sfide relative alla interoperabilità con le piattaforme di gestione di dati territoriali e quelle relative alle problematiche organizzative e legali possono essere risolte naturalmente. Le iniziative *citizen-centred* sono invece caratterizzate generalmente da un approccio *bottom-up* in cui la comunità si forma, partecipa e si sviluppa su base volontaria, e ciò rende molto più problematica la risoluzione dei problemi posti. Inoltre, una questione del tutto aperta è quella relativa alla cooperazione funzionale tra diverse piattaforme *citizen-centred* in un ambito di *Smart City* (Craglia e Granell, 2014). In CLARA la questione è stata esplorata implementando diverse applicazioni *citizen-centred* che verranno presentate nei *living labs* ospitati dal Comune di Ferrara, dal Comune di Matera e dalla Libera Associazione di Comuni di Enna.

2. Il *crowdsourcing* nella gestione delle emergenze

L'integrazione tra sistemi, la connettività e l'interoperabilità tra sorgenti dati e servizi svolge un ruolo cruciale nel corso delle prime fasi di ricognizione e risposta ad un disastro, a causa del breve tempo disponibile per l'acquisizione di informazioni frammentarie e puntuali e la loro verifica, armonizzazione e contestualizzazione in uno scenario olistico di disastro.

Un altro obiettivo di CLARA è di investigare il processo cognitivo sia individuale che soprattutto collettivo nel corso di emergenze e nella gestione dei disastri. Tipicamente la specificità dei contesti di emergenza e gestione dei disastri riguarda una molteplicità di attori e siti. In questi casi l'analisi del processo cognitivo e la caratterizzazione semantica è stata utilizzata per codificare le interazioni tra le squadre di emergenza nella gestione del disastro, e più specificatamente quelle relative alla gestione dei disastri collegati alle infrastrutture critiche urbane. L'obiettivo di ricerca è di rappresentare mediante mappe concettuali e reti semantiche il processo di interazione tra le squadre di emergenza nel corso della gestione del disastro mentre sono intente a:

- verificare la validità delle informazioni raccolte in campo;
- costruire uno scenario olistico del disastro partendo dalle informazioni puntuali via via raccolte.

A tal fine sono stati utilizzati modelli semantici per mettere in evidenza i concetti e le relazioni che sono state utilizzate per modellare il comportamento collettivo delle squadre di emergenza nel corso delle prime fasi di ricognizione del disastro e di risposta. Il modello è stato quindi posto a base per la costruzione di sistemi informativi dedicati alla gestione delle emergenze, alla mappatura delle infrastrutture critiche ed al coinvolgimento attivo della popolazione alle fasi di risposta di eventi naturali estremi. Le applicazioni sono accessibili tramite web e smartphone, e sono state sviluppate utilizzando i servizi *SaaS* messi a disposizione dalla piattaforma *Cloud*.

3. Applicazioni partecipative per il *crowdsourcing* degli scenari di disastro

CLARA vuole contribuire allo sviluppo di applicazioni finalizzate alla comunicazione bidirezionale tra tecnici, decisori, volontari e popolazione e basate sul paradigma delle applicazioni di social networking e di produzione di informazione secondo il modello del *crowdsourcing*. Tali applicazioni consentono la gestione più efficace delle attività di monitoraggio, prevenzione, allerta ed emergenza. Per raggiungere l'obiettivo preposto è stata posta particolare attenzione sul soggetto umano come *human sensor*. La sempre maggiore disponibilità di connettività wireless, sempre più diffusa ed affidabile, ha favorito la diffusione di dispositivi mobili ad alta complessità e tecnologia, in grado di svolgere una molteplicità di funzioni. Ciò rende estremamente naturale la raccolta di osservazioni e rilevazioni sia qualitative che strumentali da parte di un osservatore anche accidentalmente coinvolto in eventi naturali estremi. In particolare, si sono analizzate le osservazioni riconducibili ad un *human sensor* e si è effettuato il loro inquadramento in un modello conforme allo standard dell'*Open Geospatial Consortium Sensor Web Enablement (SWE)*. Ciò consente di trattare le osservazioni catturate da un qualunque sensore umano come quelle di un generico sensore ed integrarle in tutte le applicazioni compatibili con questo standard, applicazioni che tipicamente sono tutte quelle compatibili con la direttiva INSPIRE.

Altro elemento qualificante è la realizzazione di una piattaforma di *geosocial-messaging*. La piattaforma è stata specializzata per sostenere funzioni di esplorazione collaborativa in scenari di rischio in cui è preponderante il ruolo della messaggistica di prossimità per orientare il comportamento dei singoli in funzione delle informazioni rilevate e localizzate dagli altri componenti del gruppo.

4. Applicazioni partecipative per la gestione delle infrastrutture critiche nelle fasi di emergenza

Le infrastrutture a rete (tlc, idrica, fognaria, gas, trasporti, ecc.) sono critiche per la funzionalità del tessuto urbano e sono altresì estremamente fragili nei confronti di eventi calamitosi. Il ripristino della loro continuità è sempre prioritario, già dalle prime fasi della gestione dell'emergenza. Per consentire il ripristino della continuità del servizio è necessario propedeuticamente effettuare una campagna di rilievo e mappatura delle discontinuità, oltre ad un'analisi delle conseguenze, per stabilire quali interventi di ripristino debbano considerarsi prioritari. In CLARA si è realizzata una applicazione partecipativa per la gestione delle infrastrutture a rete nel corso di emergenze. In particolare, si è realizzata una applicazione in grado di coinvolgere la popolazione stessa nelle fasi di analisi e mappatura delle discontinuità dei servizi a rete. Le segnalazioni dei cittadini che partecipano all'attività di mappatura vengono catalogate e confrontate con un modello cognitivo delle infrastrutture in grado di elaborarle automaticamente, assegnando loro un grado di significatività. In maggior dettaglio si è progettato un meta-modello delle principali infrastrutture critiche urbane utilizzando un linguaggio formale *machine understandable* e rendendo in questo modo più affidabile tutto il processo cognitivo legato all'integrazione, connettività ed interoperabilità tra sorgenti di dati dalle quali sono estratte informazioni relative a tali infrastrutture critiche. Sono state quindi perfezionate soluzioni basate su mappe cognitive e semantiche per migliorare ed automatizzare i servizi di catalogazione e *data curation* di informazioni spaziali siano esse rilevate attraverso strumenti di remote sensing siano esse osservazioni qualitative. Ciò include l'introduzione di servizi innovativi di individuazione degli errori e della correzione automatica dei rilievi effettuati dalle squadre di campo ed in particolare di quelle impegnate in compiti di gestione dei disastri naturali. Utilizzando il meta-modello delle tipiche infrastrutture a rete che caratterizzano il tessuto urbano, sono stati inoltre sviluppati servizi software specificamente progettati per garantire la coerenza globale delle informazioni puntuali e frammentarie, discontinue nello spazio e nel tempo, che usualmente sono prelevate da un sistema eterogeneo di sorgenti dati, anche mediante rilievi qualitativi e strumentali operati direttamente dalle squadre in campo (*human sensors*) mentre svolgono compiti operativi di manutenzione e rilievo delle infrastrutture. Elemento particolarmente innovativo dello studio che è stato portato avanti in CLARA è la generazione on demand delle verifiche sulla coerenza delle informazioni via via rilevate e la loro restituzione su device mobili in modo che siano immediatamente fruibili dalle squadre di campo. Tale grado di interattività tra operazioni di rilievo, armonizzazione e verifica con le diverse sorgenti informative e restituzione in campo dello scenario ricostruito è raggiungibile grazie al sostegno di architetture *cloud* e di calcolo ad alte prestazioni.

5. City Reporter per la mitigazione delle piene urbane

In CLARA si è utilizzata una piattaforma di segnalazione dei guasti negli asset urbani, per essere sottoposta ad un adattamento al fine di contribuire alla mitigazione delle piene in ambito urbano. La piattaforma di segnalazione denominata *City Reporter* era stata sviluppata nell'ambito del progetto PRISMA, la cui finalità era lo sviluppo di una piattaforma cloud aperta per il supporto alle *Smart Cities*. PRISMA è stato sviluppato da un pool di università italiane, centri di ricerca e società di IT, nell'ambito del programma operativo nazionale per la ricerca e la competitività 2007-2013. La piattaforma PRISMA è stata utilizzata per sviluppare diverse applicazioni verticali per dimostrare la sua capacità di migliorare i servizi municipali. *City Reporter* è una di queste applicazioni (Consoli *et al.*, 2015). Ha lo scopo di supportare la pubblica amministrazione locale nella gestione della riparazione di guasti urbani, come buche, micro discariche abusive, lampione fuori servizio, graffiti e altro. *City Reporter* è una piattaforma (sociale) partecipativa che coinvolge sia cittadini che funzionari della pubblica amministrazione, che sono i principali attori della gestione dei beni urbani (Fig. 1).

Fig. 1 - *City reporter*: pagina iniziale.

Sia le piene urbane che le colate di fango rappresentano un problema importante nella maggior parte dei bacini del Mediterraneo a causa del verificarsi di temporali localmente intensi tipici di queste regioni. Eventi di pioggia di breve durata ad alta intensità possono infatti fungere da innesco di frane di scorrimento e piene urbane con conseguente perdita di vite umane, danni alle proprietà e costose attività di ripristino delle condizioni di sicurezza. Si prevede inoltre che le

inondazioni urbane si verificheranno con sempre maggiore frequenza in Europa e in particolare nell'area del Mediterraneo, e i principali fattori di pressione sono:

- cambiamenti climatici;
- crescente urbanizzazione;
- obsolescenza delle infrastrutture di drenaggio urbano.

La crescente frequenza con cui sono attesi eventi meteorici estremi ha per conseguenza che le persone dovrebbero imparare a convivere con questi fenomeni naturali. Ciò significa che nel corso di piogge particolarmente intense il deflusso in eccesso dovrebbe essere diretto da tetti, strade e pavimentazioni verso aree di accumulo temporaneo di basso valore, utilizzando il paradigma progettuale della neutralità idraulica, e salvaguardando così case e infrastrutture critiche (Fig. 2). Ma anche in questo caso frequenti piene avranno ovviamente un impatto rilevante sulla struttura economica e sociale della vita urbana, e non è ben studiato il grado di resilienza (in termini sia economici che sociali) della struttura urbana rispetto a questo tipo di eventi. Nelle immagini seguenti sono mostrati due diversi effetti di alluvione.



Fig. 2 - Confronto tra l'effetto al suolo di piogge moderate e piogge particolarmente intense.

La prima immagine sulla sinistra potrebbe essere classificata come una situazione semplicemente irritante per un pedone e con un impatto moderato sulla mobilità urbana, la passerella è resa disponibile da un commerciante ed è un segno di abitudine ad eventi di questa tipologia ed intensità. La seconda immagine potrebbe invece essere classificata come una situazione di reale pericolo in cui sia la velocità dell'acqua che la sua altezza potrebbero essere rischiose per la vita. In particolare, la velocità dell'acqua è un fattore di rischio troppo spesso trascurato, a causa dell'elevato costo che si deve sostenere per condurre campagne di misure di velocità della corrente in ambiente urbano, rispetto alle più semplici misure di livello. Ma sebbene sia noto quali siano le migliori pratiche da seguire per aumentare la resilienza delle nostre città alle inondazioni urbane, quali sono ad esempio l'installazione di tetti verdi, le pavimentazioni permeabili e i giardini della pioggia, non possono essere facilmente implementate in regioni altamente urbanizzate a causa del costo di attività di *retrofitting*. In queste regioni già fortemente urbanizzate, la prima possibilità di mitigare l'impatto del deflusso delle acque piovane è migliorare la gestione delle infrastrutture di drenaggio già esistenti. Le cunette e le caditoie stradali (ingressi) sono i componenti principali



Fig. 3 - La manutenzione delle caditoie stradali condiziona la loro efficacia.

per il controllo del deflusso delle strade, sono ampiamente distribuiti nelle aree urbane ma la loro efficacia nell'intercettazione del deflusso dell'acqua dipende dalle condizioni idrauliche locali e dal grado di manutenzione di ciascuna di esse (Fig. 3).

Ma l'efficienza delle caditoie nell'intercettare il deflusso dell'acqua non degrada nel tempo con la stessa velocità per tutte le caditoie di un'area. Molti fattori locali contribuiscono ad accelerare il processo di ostruzione delle grondaie, uno è la velocità locale del flusso di acque poco profonde e un altro è la quantità di trasporto solido del deflusso superficiale. A volte altri tipi di fattori possono influire sulla capacità di trasporto della rete di drenaggio urbana, e questo è il caso ad esempio della precipitazione di cenere vulcanica in seguito ad una eruzione (Fig. 4).



Fig. 4 - Impatto della cenere vulcanica sulla capacità di drenare piene urbane (eruzione dell'Etna).

Poiché in generale è troppo costoso eseguire con cadenza annuale la pulizia di tutte le caditoie, il problema principale da superare è quello di trovare il modo più semplice ed economico per eseguire prima di ogni stagione delle piogge la verifica puntuale dello stato di efficienza delle caditoie, per riconoscere quali di queste richiedano effettivamente di essere pulite. Per far fronte a questo problema, nell'ambito di CLARA si è studiato come far leva sul coinvolgimento dei cittadini per svolgere questo compito. Più in dettaglio, si è studiato come utilizzare le osservazioni quotidiane dei cittadini per scoprire quali siano le caditoie da pulire prioritariamente. L'idea che si è percorsa è quella di utilizzare una piattaforma di crowdsourcing, ma poiché questa attività di verifica dovrebbe essere svolta dai cittadini con continuità, è stato predisposto uno strumento

software che sia anche in grado di stimolare la partecipazione delle persone. Ricaduta attesa dell'utilizzo della piattaforma è il miglioramento delle conoscenze dei cittadini sulla meccanica del deflusso urbano e sull'importanza delle attività di manutenzione per mantenere in efficienza la rete drenante. Il *City Reporter* descritto in precedenza è la piattaforma social che è stata utilizzata per il *crowdmapping* delle caditoie e per la verifica periodica del loro grado di efficienza.

6. Il contributo delle piattaforme social nella gestione delle emergenze

Le piattaforme *social* possono svolgere un ruolo importante nel processo di diffusione dei messaggi di allerta prima, durante e dopo un'emergenza. L'uso dei social media durante un'emergenza è già stato sperimentato in Italia durante diversi eventi (terremoto dell'Aquila 2009 e Ferrara 2012), e in particolare è stato sperimentato durante eventi locali, anche di elevata intensità, come lo sono i rischi idrogeologici o industriali. Il motivo principale del loro utilizzo nel caso di eventi locali risiede nell'affidabilità della rete di trasporto. Le reti di Internet mobile (3G, 4G) sono in genere resilienti rispetto ad eventi locali, mentre durante un evento su larga scala quasi tutti i tipi di sistemi di comunicazione collassano, Internet mobile incluso. I principali vantaggi nell'uso dei social media sono i seguenti:

- sono strumenti efficaci nel diffondere rapidamente informazioni;
- consentono di veicolare informazioni complesse che possono riguardare l'evento in sé ma possono anche includere istruzioni e norme di comportamento;
- benché si prestino alla propagazione di informazioni false e fuorvianti, posseggono gli strumenti utili per il contrasto alla diffusione delle *fake news*;
- le piattaforme social sono ampiamente utilizzate ed accessibili da una grande varietà di dispositivi;
- sono sistemi di comunicazione a due vie, sono infatti compatibili con pratiche di *crowdsourcing*;

La prima volta che la Protezione Civile della Regione Siciliana ha sperimentato l'utilità dei *social media* è stata subito dopo l'inondazione del 2009 della città di Trapani. Durante questo evento sono caduti 150 mm di pioggia in sole 3h e 20', causando l'inondazione delle aree urbane e periurbane della città di Trapani. L'analisi post-evento dei danni da alluvione è stata eseguita utilizzando i video catturati dalle persone colpite durante e dopo l'evento con i loro telefoni cellulari e che sono stati pubblicati su *YouTube* (Basile, 2009).

Di recente anche l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) ha approfondito l'uso dei *social media* sia per ottenere informazioni dalle persone sia per avvisarle ed informarle. L'INGV nell'ambito del sistema di protezione civile italiano ha la responsabilità di allertare le persone sia per i rischi sismici che vulcanici. Nella sezione seguente è stata riportata la loro esperienza nell'utilizzo dei social media per l'informazione in caso di sisma (Amato, 2014).

7. I *social media* per l'informazione nel caso di rischio sismico

L'11 maggio del 2011 l'INGV ha sentito per la prima volta la necessità di disporre di un *account* istituzionale sui social media. Quel giorno una falsa informazione su un terribile terremoto che

avrebbe da lì a breve colpito la città di Roma si era diffusa attraverso internet, i *social media*, la radio e la TV. L'effetto della *fake news* fu che molte persone si fecero prendere dal panico. A partire da quell'evento l'INGV ritenne opportuno cominciare a contrastare la diffusione di false informazioni utilizzando lo stesso strumento per diffondere la voce dell'autorità sismica italiana. In particolare, l'INGV a partire da quel giorno ha pubblicato diversi video informativi su *YouTube* e oggi questi video sono stati visitati più di 400.000 volte. Oggi l'account Twitter dell'INGV ha oltre 100.000 *follower* e questo canale viene utilizzato sia per mantenere le persone informate e sia per ottenere informazioni dalle persone. In maggior dettaglio il canale viene utilizzato dalle persone per comunicare nel corso di un evento sismico come stanno vivendo l'esperienza del terremoto e quei *tweet* sono anche geo riferiti. L'insieme dei *tweet* può essere visualizzato in una mappa che mostra in che misura le persone hanno percepito il terremoto. In altre parole, tramite *Twitter*, le persone possono essere utilizzate come sensori umani. L'esperienza indica che in concomitanza di un sisma le segnalazioni tramite *tweet* si diffondono molto rapidamente nei primi 5 minuti dopo il terremoto e, sfortunatamente, INGV è in grado di rilasciare la sua prima comunicazione ufficiale al riguardo dopo 20-30 minuti dall'evento. Quindi al fine di evitare la diffusione di informazioni false, è necessario aumentare la capacità di informare correttamente le persone sull'evento sismico dal primo momento successivo all'evento. L'INGV sta cercando di ottimizzare il processo di analisi automatica delle onde sismiche rilevate al fine di essere in grado di diffondere i primi *tweet* ufficiali proprio entro i primi 5 minuti, in questo modo intende contrastare la diffusione di informazioni false. In conclusione, si ritiene preziosa l'esperienza condotta dall'INGV nell'utilizzo dei social media. L'INGV ha sperimentato il fatto che sin da subito, dopo un terremoto significativo, voci e informazioni false si diffondono attraverso le piattaforme social e che la diffusione di queste informazioni deve essere immediatamente contrastata diffondendo contestualmente, attraverso le medesime piattaforme social, informazioni validate ed a valore scientifico. Inoltre, non è trascurabile che queste piattaforme di comunicazione partecipativa possano essere utilizzate in entrambe le direzioni, sia per informare le persone che per ottenere informazioni dalle persone. Ciò che dovrebbe essere approfondito nel prossimo futuro è l'analisi dei contenuti in tempo reale dei *tweet*. Ad esempio, tecniche di *sentiment analysis* possono essere utilizzate per stimare, fin dai primi minuti dopo l'evento, l'impatto presunto dell'evento. L'analisi del *sentiment* può anche essere utilizzata per misurare l'efficacia della messaggistica e per migliorarla, lavorando sul contenuto dei messaggi al fine di indurre comportamenti corretti nella popolazione sia durante che dopo il verificarsi di una emergenza.

BIBLIOGRAFIA

- Barre A.J., (2014), '*Citi.Sense*', 8th Geo European Project Workshop (GEPW-8), Athens
- Alfonso L. (2014), '*WeSenseIt*', 8th Geo European Project Workshop (GEPW-8), Athens
- Klaft M., *et al.* (2014) '*Current issues in crisis communication and alerting*', Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2014, 101 pp.
- Craglia M., Granell C. (2014) '*Citizen Science and Smart Cities*', JRC Technical Report, ISPRA, 5-7th February 2014.
- Consoli *et al.*, (2015). *An Urban Fault Reporting and Management Platform for Smart Cities*. International World Wide Web Conference, Companion Volume 2015: 535-540
- Basile, (2009). *Rapporto sugli eventi meteo che hanno colpito la Sicilia il giorno 16 settembre 2009*. Dipartimento di Protezione Civile Regione Sicilia – Allegato alla nota prot. 45013 del 21/09/2009
- Amato, (2014). *INGV Terremoti: The Communication is a risk, the silence is a fault*. Protezione Civile Anno 4, Volume n.14, Gennaio Marzo 2014.