

APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE PER LO STUDIO DEL FENOMENO DELLA SUBSIDENZA NELL'AREA DI TUZLA (BIH)

Francesco STECCHI (*), Marco ANTONELLINI (*),
Giovanni GABBIANELLI (*), Francesco MANCINI (**)

(*) CIRSA, Università di Bologna, P.zza Kennedy, 12 – 48100 Ravenna
(francesco.stecchi2, gabbianelli.giovanni, m.antonellini)@unibo.it

(**) Dipartimento di Architettura ed Urbanistica, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4 – 70125 Bari
fmancini@racine.ra.it

Riassunto

Il lavoro descrive le indagini di carattere multidisciplinare effettuate nella città Tuzla (Bosnia & Herzegovina) per il monitoraggio del fenomeno della subsidenza, a seguito dell'intenso sfruttamento dei depositi di sale sottostanti, e la descrizione di effetti ad esso correlati. L'analisi della serie storica dei dati di livellazione a permesso sia la quantificazione dei movimenti in atto, che nell'arco dell'ultimo cinquantennio superano i 20 cm/anno, sia di progettare nuove indagini di carattere geologico, geofisico e geodetico ai fini di una maggiore comprensione del fenomeno. Tali informazioni, organizzate in ambiente di lavoro G.I.S. sono finalizzate alla valutazione del rischio indotto dall'estrazione di sale in ambiente urbanizzato.

Abstract

The paper addresses a multidisciplinary approach to the monitoring of sinking phenomena in the city of Tuzla (Bosnia & Herzegovina) as a consequence of the exploitation of a salt deposit located beneath the urban area and related effects. The historical series of data produce by spirit the topographical surveys highlighted a superficial sinking rates greater than 20 cm/year within the last fifty years and allowed the planning of new surveys (i.e. geological, geophysical and geodetic) in order to better understand the ongoing processes. By the managing in a G.I.S. environment of the data collected, the assessment of risk due to the salt withdrawal will be found out.

Introduzione

La città di Tuzla, situata nel nordest della Bosnia Erzegovina (vedi inquadramento in Figura 1), è conosciuta fin dall'antichità per la presenza di fonti di acqua salata e di depositi di salgemma d'epoca Miocenica formatisi nel sottosuolo in seguito allo sviluppo del bacino Pannonico e successivamente da nuovi regimi deposizionali. L'intensa attività di estrazione, iniziata negli anni '50, viene tuttora praticata tramite pozzi profondi per il prelievo di acqua di falda salata. Questa metodologia ha indotto un intenso fenomeno di subsidenza, associato alla formazione di faglie e fratture più o meno profonde, su un'area dell'estensione di circa 1,5 Km² che ha raggiunto valori complessivi nel periodo citato di 12 metri nell'area maggiormente coinvolta.

L'inevitabile impatto che il fenomeno ha avuto sulla cittadinanza e sulle infrastrutture, ha suscitato nell'amministrazione locale la necessità di effettuare un monitoraggio sistematico della subsidenza tramite rilievi topografici, geologici, geofisici, ecc. In questo contesto è nata la collaborazione tra la Municipalità di Tuzla e l'Università di Bologna per l'analisi della serie storica dei dati disponibili e l'esecuzione di nuove indagini con tecniche affidabili e produttive.

Infatti, l'analisi contestuale dei risultati ottenuti grazie alle tecnologie impiegate per lo studio ed il monitoraggio del fenomeno della subsidenza (GPS, GIS, resistività elettrica, analisi di curvatura), hanno portato ad una migliore e più dettagliata comprensione del fenomeno, fornendo anche una elementi utili alla definizione di un modello generale di comportamento a livello di suolo e sottosuolo. In particolare, dal 2004 ad oggi è in corso il monitoraggio delle deformazioni tramite una rete GPS composta di punti di inquadramento e altri di raffittimento che hanno evidenziato tassi di subsidenza che ancora oggi si aggirano sui 10-20 cm/anno. L'analisi di curvatura effettuata sulla superficie di abbassamento relativa all'intero periodo, ha condotto ad una possibile interpretazione del sistema di faglie e fratture, che si è sviluppato in concomitanza degli stress e delle deformazioni. Alcuni rilievi di resistività elettrica (tomografie) hanno chiarito il comportamento dell'acqua di falda, coinvolta dall'attività di estrazione, in particolare lungo le fratture. Tali dati sono stati inserita in un sistema GIS per una gestione integrata delle informazioni che ha consentito di ricostruire la dinamica dei processi in atto nel sottosuolo e la definizione di mappe di rischio necessarie all'amministrazione locale nelle varie fasi della pianificazione urbanistica (Mancini et al., 2005).

La serie storica dei dati topografici e del prelievo di sale

Il monitoraggio delle deformazioni superficiali nella città di Tuzla, legate all'attività di estrazione di sale dal sottosuolo, è stato effettuato in modo sistematico a partire dal 1956 su una rete di livellazione ad elevata densità dei punti (circa 1500 considerando anche le sostituzioni di monumenti distrutti). I conflitti che hanno interessato la Ex-Yugoslavia nella storia recente hanno portato all'interruzione del monitoraggio topografico dal 1992 al 1996 ed alla sua ripresa, con rilievi però solo parziali, dal 1996 al 2003 (D.O.O. Mining Institute of Tuzla, 2000; Tatic, 1979). Dopo il 2003 le misure sono state abbandonate dall'amministrazione locale che non poteva più sostenere lo sforzo di continue campagne di rilievo. Tale quantità di dati non è mai stata elaborata ed analizzata in modo compiuto. Pertanto nella prima fase del progetto di cooperazione i dati sono stati ordinati, ripuliti dei numerosi outliers ed elaborati su base annuale per avere una prima stima dei trends in atto.

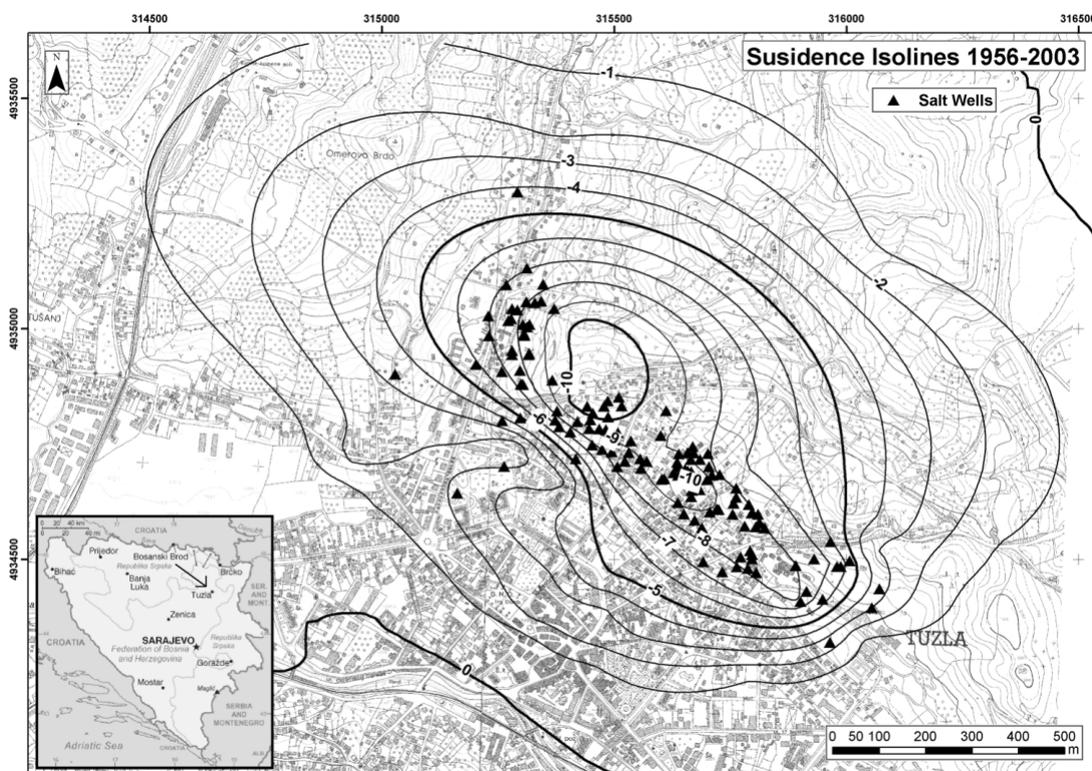


Figura 1 – Tassi di subsidenza cumulativi relativi al periodo 1956 – 2003 registrati nella città di Tuzla (BiH). I triangoli neri rappresentano localizzano i pozzi di utilizzati per l'estrazione del sale.

Come si vede in Figura 1 tale analisi a messo in luce valori cumulativi di subsidenza di circa 12 metri nelle aree coinvolte con tassi annuali che hanno raggiunto i 50 cm/anno.

Altre informazioni disponibili, archiviate nello stesso periodo a cura dei tecnici della città di Rotterdam (Paesi Bassi), riguardano le quantità di salamoia estratta, la litologia superficiale, le caratteristiche geotecniche dei sedimenti e i dati piezometrici. Per avere una stima delle correlazioni esistenti tra la quantità di salamoia estratta ed i tassi medi di subsidenza annuali si può osservare il grafico di Figura 2.

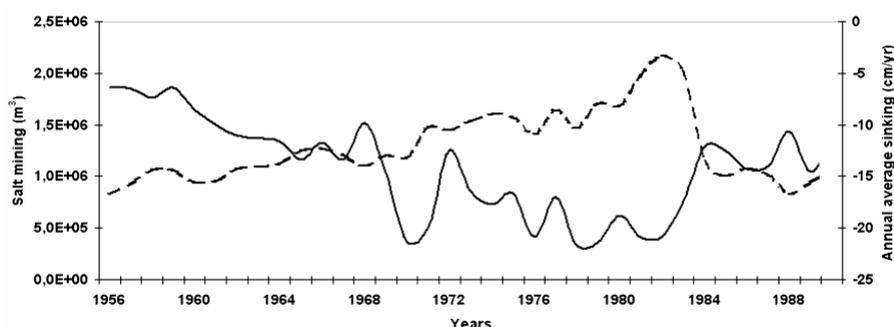


Figura 2 – Confronto tra il tasso medio annuale di subsidenza (cm/anno, linea continua) e la quantità di sale estratto (m³, linea tratteggiata).

La correlazione tra le due quantità appare subito evidente a testimonianza del fatto che il fenomeno della subsidenza, oltre ad essere legata esclusivamente all'attività di sfruttamento del sale nel sottosuolo, si verifica in risposta alla formazione di cavità nel sottosuolo precedentemente occupate dalla lente di sale. Si nota anche come una riduzione della quantità di sale estratto nei primi anni '80 pari a circa il 50% del totale provochi una riduzione dei tassi di subsidenza nella stessa percentuale. Una relazione di questo tipo consente di stimare gli effetti attesi in seguito ad una variazione nei prelievi di sale nel sottosuolo.

La nuova rete GPS

Per garantire la continuità con il passato delle osservazioni topografiche a partire dal 2004 la subsidenza è stata monitorata tramite con metodo GPS statico. La rete prevede 6 punti di inquadramento monumentati su siti stabili ed esterni all'area di studio e da 60 vertici di raffittimento collocati nell'area urbana coinvolta dai fenomeni di subsidenza.

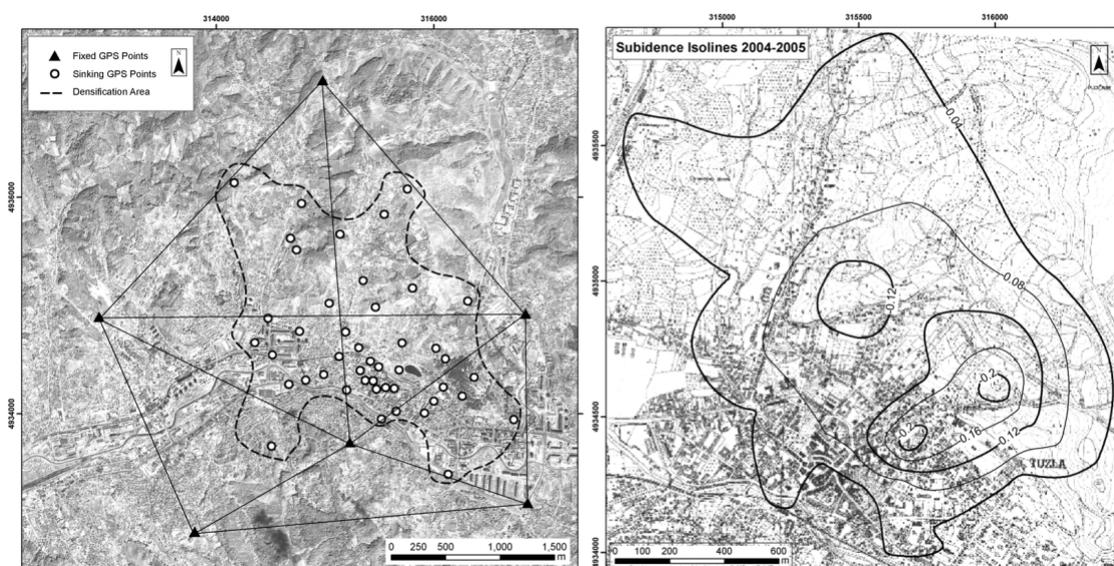


Figura 3 – Geometria delle reti di inquadramento e raffittimento e risultati relativi al periodo 04-05.

La rete di inquadramento è stata inserita nel sistema geodetico ITRF2000 (Altamimi et al., 2002) attraverso i dati delle stazioni permanenti PENC, SOFI, MATE, MEDI. La seconda campagna GPS, effettuata nel 2005 ha consentito innanzitutto di verificare la stabilità della rete di inquadramento e, successivamente, di calcolare i primi tassi di abbassamento da misure GPS. Durante tali operazioni alcuni tecnici dell'amministrazione locale sono stati formati al rilievo GPS ed all'elaborazione dei dati. Questo per garantire l'esecuzione anche futura delle misure GPS, quando la cooperazione sarà conclusa. In figura 3 compare la geometria dell'intera rete GPS con i valori di subsidenza relativi al periodo 2004-2005. Si nota che i tassi di subsidenza raggiungono ancora i 22 cm/anno, con valori medi di 14 cm/anno calcolati con la stessa procedura utilizzata per il confronto mostrato in figura 2. Il confronto di tale valore con quello relativo all'estrazione attuale di sale, pari a 730.000 m³/anno estratti dai 10-12 pozzi ancora in attività, conferma il trend evidenziato.

Indagini geofisiche e geomorfologiche

Una migliore conoscenza della struttura del sottosuolo è stata ottenuta grazie ad una serie di rilievi di geoelettrica eseguiti dall'Istituto di Metodologie per l'Analisi Ambientale (IMA) del CNR. Le tomografie elettriche di resistività (ERT) infatti forniscono informazioni sulla geometria geologica di strutture quali piani di faglia delle zone tettoniche attive, corpi franosi. La tecnica consente di rilevare direttamente la mole di resistenza elettrica del terreno misurando il variare nello spazio delle tensioni indotte dal passaggio di una corrente elettrica fra gli elettrodi impiantati sulla superficie del terreno. Il metodo è inoltre sensibile alla composizione dei fluidi interstiziali ed ad altri parametri come la litologia, il contenuto in minerali argillosi, la porosità, la temperatura, il contenuto idrico, la salinità dell'acqua freatica. L'immagine mostrata nella figura 4 rappresenta i risultati delle tomografie elettriche effettuate lungo i profili AA', BB' e CC'.

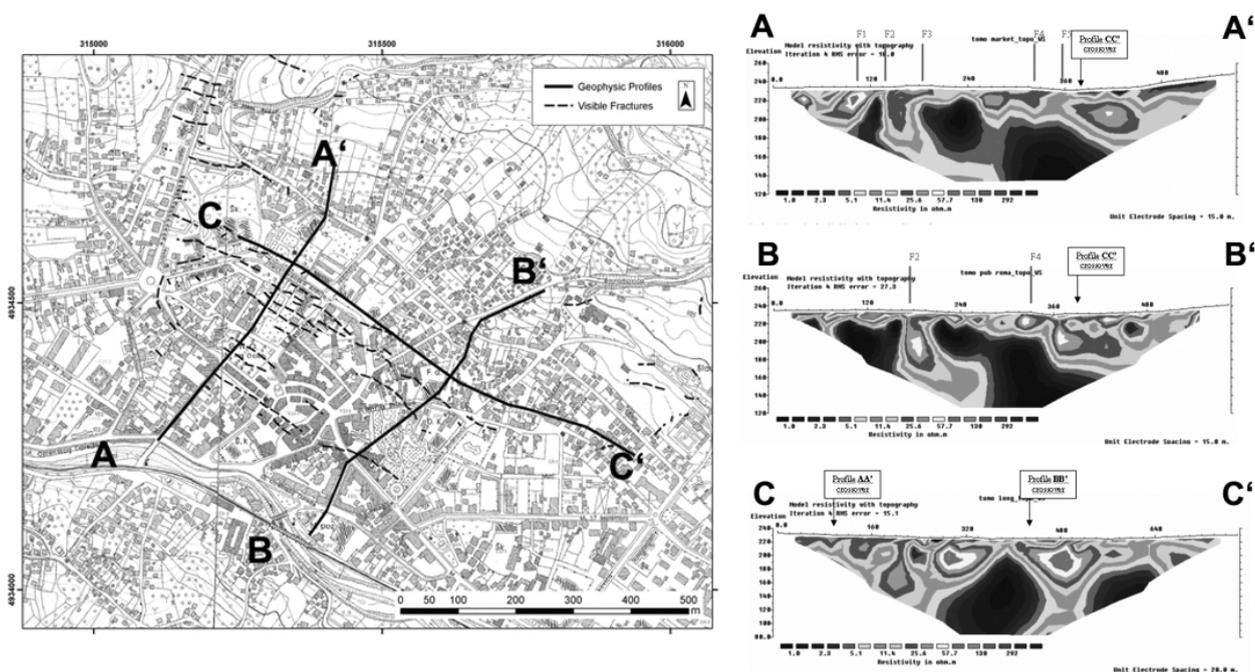


Figure 4 - Sezioni relative ai profili geoelettrici eseguiti.

Nelle sezioni di figure 4 le frecce verticali indicano i punti di incrocio con i profili trasversali, mentre le linee mostrano l'intersezione con le fratture superficiali. I dati geologici evidenziano una successione di marne con strati di sabbia fine fino ad una profondità di 100 m. Questi depositi giacciono sui marne massive dello spessore di 50 metri circa. Di conseguenza i cambiamenti di resistività fino a 100 m possono essere correlati alla presenza di acqua salata poiché non vi è un cambiamento significativo nella litologia.

Le forti differenze di resistività tra i sedimenti sovrastanti la lente di sale non hanno consentito di ottenere un'immagine chiara e nitida della situazione del sottosuolo. Tuttavia un aspetto che deve essere sottolineato è la risalita di acqua salata dalla falda, che in seguito alla riduzione delle attività di pompaggio sta ritornando ai livelli originari. Un ruolo determinante lo giocano le fratture, in quanto rappresentano condotti ideali lungo i quali l'acqua può risalire. Il risultato fornito da questa indagine individua un aspetto da valutare attentamente vista la possibilità di contaminazione della falda con acqua salata.

Altre informazioni utili alla definizione di un modello del sottosuolo sono state ricavate dall'analisi di curvatura. Come evidenziato da diverse prove di laboratorio (Hongxing et al., 1998) l'estrazione di salgemma dal sottosuolo induce la formazione di faglie e fratture strettamente correlate con la deformazione e l'evoluzione del fenomeno di subsidenza. L'analisi di curvatura permette di identificare su una superficie le zone in cui la deformazione è più o meno localizzata e, pertanto, aiuta nell'identificazione delle zone che potenzialmente sono interessate da fratture. Per il calcolo della curvatura sono stati utilizzati due metodi differenti:

- i) Curvatura direzionale e bidimensionale (Schwartz, 1974.);
- ii) Calcolo analitico della curvatura normale e gaussiana (Fischer e Wilkerson, 2000; Bergbauer e Pollard, 2003; Pearce et al., 2006).

La curvatura viene generalmente calcolata a partire da modelli altimetrici del terreno (GPS, stazione totale, LIDAR ..) o sismici; il dato originale però deve essere preliminarmente filtrato per eliminare dalla superficie le variazioni di micro-scala (alta frequenza) che non interessano l'analisi delle fratture ed introducono un rumore di fondo nel calcolo. Per il caso di Tuzla la curvatura è stata calcolata sulla superficie di abbassamento cumulativo, ottenuta dall'interpolazione dei dati relativi al periodo 1956-2003 e mostrata nella figura 1. In questo modo le variazioni di pendenza rappresentano soltanto i movimenti del suolo e non sono da mettere in relazione con la morfologia del terreno. Le aree a maggior curvatura possono essere in relazione con linee di frattura. Un esempio di fratture rilevate nell'area è riportato nella figura 5.

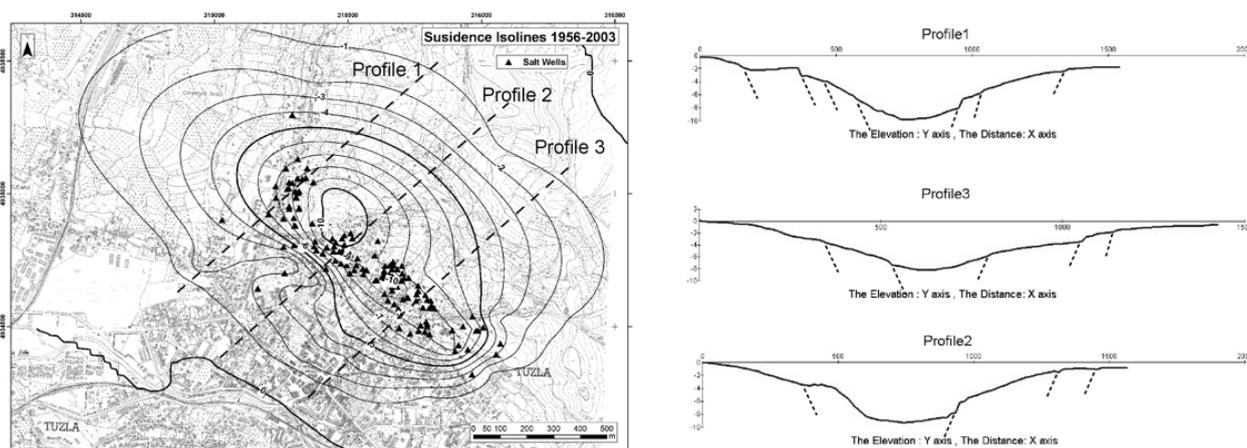


Figura 5 – Alcune sezioni trasversali che mostrano linee di frattura prodotte dai meccanismi deformativi e riconoscibile anche nell'analisi della curvatura.

La situazione evidenziata nella figura 5 è in stretta relazione con l'analisi della curvatura direzionale la quale mette in evidenza i cambiamenti netti di curvatura, indice di possibili zone di fratturazione.

Tale metodo di indagine non prende in considerazione la tridimensionalità di tali strutture e pertanto è un indicatore più efficace per le fratture superficiali piuttosto che per quelle profonde.

In base alla variazione di curvatura gaussiana possono essere tratte conclusioni riguardo lo stato di stress nelle superfici caratterizzate da pieghe e faglie. Le parti delle strutture con maggiore densità di fratture corrispondono infatti alle zone con i più alti valori assoluti di curvatura gaussiana. La curvatura gaussiana evidenzia maggiormente le strutture “horst and graben” connesse con la dislocazione di faglie normali sotterranee, ma risulta meno in correlazione con le fratture superficiali.

Conclusioni

Il lavoro descritto illustra un approccio interdisciplinare allo studio della subsidenza cercando di descrivere il processo in atto nella sua complessità, ovvero come interazione tra effetti superficiali e situazione del sottosuolo, fino a giungere alla quantificazione dei fenomeni ed alla descrizione di un possibile modello evolutivo per l'area interessata. Questo consente in prima analisi di delimitare la zona maggiormente soggetta ai rischi legati alle deformazioni del suolo e, successivamente, di proporre modelli di intervento e pianificazione (economica e urbanistica) compatibili con lo scenario evidenziato dalle indagini geodetiche e geofisiche.

Bibliografia

- Altamimi Z., Sillard P., and Boucher C. (2002), “ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth Science Applications”, *Journal of Geophysical Research*, 107, B10, 2214, 2-19.
- Bergbauer S., Pollard D.D. (2003), “How to calculate normal curvatures of sampled geological surfaces” *Journal of Structural Geology*, 25, 277-289.
- D.O.O. Mining Institute of Tuzla, (2000), "Controlling subsidence problem in city Tuzla", Technical Report, Tuzla, Bosnia & Herzegovina, January 2000.
- Fischer M.P., Wilkerson, M.S. (2000), “Predicting the orientation of joints from fold shape: results of pseudo-three-dimensional modelling and curvature analysis” *Geology* 28, 15-18.
- Hongxing G., Martin P., Jackson A. (1998), “Physical modeling of structures formed by salt withdrawal: implications for deformation caused by salt dissolution”; *AAPG Bulletin*, V. 82, No. 2 (February 1998), P. 228–250.
- Mancini F., Stecchi F., Gabbianelli G., Dzindo A. (2005), "Ground collapsing in the city of Tuzla (Bosnia & Herzegovina)", *Proceedings of 32th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Saint Petersburg, Russian Federation, 20-24 June 2005.
- Mancini F., Stecchi F., Zanni M. Gabbianelli G. (2007), “Monitoring ground subsidence induced by salt mining in the city of Tuzla (Bosnia & Herzegovina)”, *Environmental Geology*, sottomesso.
- Pearce M.A., Jones R.R., Smith S.A.F., McCaffrey K.J.W., Clegg P. (2006), “Numerical analysis of fold curvature using data acquired by high-precision GPS”, *Journal of Structural Geology*, 28, 1640-1646.
- Schwartz A. (1974), “Calculus and Analytic Geometry”, 3rd edition, Holt, Rinehart, and Winston, New York, 1140 pp.
- Tatic M. (1979), "Environment protection against the consequences of subsidence in town of Tuzla", Community Head-Office for Construction of Tuzla, Bosnia & Herzegovina, 1979.

Ringraziamenti

La realizzazione del progetto è possibile grazie al finanziamento delle attività e della strumentazione da parte della Regione Emilia Romagna e della Provincia di Ravenna. Il Comune di Tuzla ha fornito la serie storica dei dati e cooperato durante le campagne di rilievo GPS (si ringraziano Rusmir Salihovic e Toni Nikolic per la collaborazione). Il Corso di Laurea in Scienze Ambientali ed il CIRSA hanno fornito parte del supporto tecnico e logistico.