

**INVENTARIO DEI COMUNI INTERESSATI DA  
SUBSIDENZA E RETI DI MONITORAGGIO  
GEODETICO**

***Dr.ssa Alessandra Cafardi***

**Tutor: Dr.ssa Piera Gambino**  
***Cotutor Dr. Stefano Calcaterra***  
***Dr. Valerio Vitale***

## **INVENTARIO DEI COMUNI INTERESSATI DA SUBSIDENZA E RETI DI MONITORAGGIO GEODETICO**

- 1           INTRODUZIONE
- 2           METODOLOGIA
- 3           METODI DI MISURA DELLA SUBSIDENZA E LORO  
APPLICAZIONI
- 3.1        LIVELLAZIONE GEOMETRICA
- 3.2        IL GPS
- 3.2.1      IL CASO DEI CAMPI FLEGREI: CONFRONTO TRA  
L'UTILIZZO DEL GPS E LA LIVELLAZIONE  
GEOMETRICA
- 3.3        INTERFEROMETRIA RADAR
- 3.3.1      ANALISI DEI FENOMENI DI SUBSIDENZA DEL FIUME  
ARNO MEDIANTE INTERFEROMETRIA RADAR
- 3.3.2      IL CASO DI SARNO: CONFRONTO TRA L'UTILIZZO  
DELLA INTERFEROMETRIA E LA LIVELLAZIONE  
GEOMETRICA
- 4           LA SUBSIDENZA NELLA PIANURA PADANA
- 4.1        PROGETTI DI STUDIO E SPERIMENTAZIONE DI  
INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE
- 5           ANALISI DEI RISULTATI

BIBLIOGRAFIA

## PREFAZIONE

La presente tesi dal titolo “Inventario dei Comuni interessati da subsidenza e reti di monitoraggio geodetico” si prefigge l’obiettivo di fornire un quadro generale del fenomeno della subsidenza e del suo impatto sul territorio nazionale, le cui cause possono essere sia naturali, quali processi tettonici o diagenesi dei sedimenti, sia di natura antropica, quali estrazione di fluidi e gas dal sottosuolo.

Tale fenomeno rientra nei processi di dissesto lento che affliggono molte aree costiere e di pianura, nonché città d’arte come ad esempio Venezia e Ravenna. L’interazione di processi naturali ed antropici rende complesso il suo studio e pertanto anche la sua mitigazione. Appare, quindi, di importanza rilevante la quantificazione e l’analisi temporale attraverso indagini specifiche. A tale scopo diverse regioni\comuni hanno implementato reti di monitoraggio della subsidenza attraverso varie metodologie (livellazioni geometriche di alta precisione, reti GPS, tecniche interferometriche differenziali). Anche il Dipartimento Difesa del Suolo dell’APAT ha avviato progetti di monitoraggio in aree affette da questa fenomenologia, come ad esempio i rilievi topografici (livellazioni geometriche di alta precisione) eseguiti nella città di Como, supportate da studi geologici ed analisi storiche del fenomeno.

Il *database*, sviluppato in questo lavoro, basato su ricerche bibliografiche e studi svolti da vari enti di ricerca, copre l’intero territorio nazionale ma è lungi ancora dal potersi considerare concluso soprattutto in merito a tutti quei fenomeni le cui notizie sono meno documentate. Esso contiene dati sulla ubicazione geografica dell’evento, sulle cause e sull’entità di abbassamento nel tempo. Queste informazioni sono arricchite, quando possibile, da dati riguardanti le eventuali reti di monitoraggio realizzate per controllare gli abbassamenti e dalle relative variazioni nel tempo registrate, permettendo così di avere indicazioni su eventuali serie

storiche degli eventi, come nel caso del bacino del fiume Arno. Interessanti interventi di stabilizzazione o riduzione del processo di subsidenza, presentati nella tesi ad esempio per la Pianura Padana, hanno portato al rallentamento del fenomeno o, addirittura, ad una sua stasi determinando, quindi, un miglioramento dello stato dell'ambiente. Ulteriore aspetto interessante che viene affrontato nel lavoro, è il confronto dei risultati ottenuti dalle metodologie geodetiche più frequentemente utilizzate per la valutazione degli abbassamenti: livellazione geometrica, reti GPS e interferometria InSAR.

## 1. INTRODUZIONE

La subsidenza consiste in un lento processo di abbassamento del suolo, che può coinvolgere territori di estensione variabile. Tale fenomeno è generalmente causato da fattori geologici, ma negli ultimi decenni è stato localmente aggravato dall'azione dell'uomo ed ha raggiunto dimensioni superiori a quelle di origine naturale

Il fenomeno naturale è dovuto all'evoluzione dei processi al di fuori del controllo dell'uomo e della portata dei suoi interventi tecnologici. La subsidenza naturale è dell'ordine di grandezza di qualche millimetro all'anno e quindi le sue conseguenze sono relativamente ridotte, in quanto tale fenomeno si manifesta in tempi molto lunghi. Diverso è il caso della subsidenza indotta dall'uomo che raggiunge valori da dieci ad oltre cento volte maggiori, e pertanto i suoi effetti si manifestano in tempi brevi, determinando, in alcuni casi, la compromissione delle opere e delle attività umane interessate.

Le cause più comuni che danno luogo a tale fenomeno sono :

- movimenti verticali dovuti a processi tettonici profondi, su scala regionale; si tratta di subsidenza geologica vera e propria, per cedimento profondo della crosta terrestre e/o del mantello superiore;
- raffreddamento di magmi all'interno della crosta terrestre;
- costipamento naturale dei sedimenti sciolti recenti per carico geostatico, cioè per il loro stesso compattamento sotto il proprio peso e il peso di rocce soprastanti;
- processi di ossidazione e mineralizzazione della sostanza organica che rendono tali materiali molto compressibili e pertanto soggetti a cedimenti.

Le cause antropiche della subsidenza indotta sono:

- diminuzione della spinta idrostatica di sostentamento negli strati acquiferi a seguito di processi di emungimento delle acque dal sottosuolo con conseguente decremento delle forze resistenti;

- estrazione di solidi dal sottosuolo (in particolare attività minerarie) con conseguente formazione di cavità sotterranee: se le caratteristiche geotecniche dei materiali costituenti la volta della caverna non sono più sufficienti a sopportare il carico dei terreni sovrastanti, si verifica l'abbassamento dei terreni di copertura ossia la subsidenza, con possibili collassi;
- estrazioni di gas (o di petrolio), sia allo stato puro che disciolto in acqua, accumulato in "trappole" situate alla sommità di formazioni profonde, che determina l'abbattimento della pressione interstiziale e provoca un costipamento degli strati produttivi che può estendersi sino a manifestarsi in superficie;
- bonifiche idrauliche, che abbassando il livello freatico provocano il costipamento dei terreni superficiali e la demolizione per ossidazione degli strati torbosi;
- carico di grandi manufatti e di densi agglomerati urbani che può provocare il costipamento dei terreni al di sotto delle fondazioni, che si possono trasmettere anche su aree adiacenti.

In Italia i fenomeni di lenta subsidenza si verificano ad esempio lungo la fascia costiera adriatica da Rimini a Venezia, dove questo fenomeno è particolarmente noto e oggetto di attenzioni per la rilevanza economica e artistica di queste aree, ma anche nei dintorni di agglomerati urbani come Milano, Bologna, e Modena in questi casi soprattutto per l'estrazione di acqua dal sottosuolo.

Nel Delta del Po la subsidenza massima ha raggiunto i 3,5 metri ed è collegata all'estrazione del metano. Nel Milanese su un'area di oltre 400 Km<sup>2</sup>, l'abbattimento piezometrico è stato di circa 25-30 metri fra gli anni cinquanta e gli anni settanta, con un massimo di 38 m a Milano, cui è corrisposta una subsidenza di molti centimetri. A Bologna è soggetta a Subsidenza la parte di città fondata sulle alluvioni.<sup>1</sup>

Recentemente casi di subsidenza sono stati individuati lungo la fascia costiera del Tavoliere delle Puglie (Foggia), nella Piana di Sibari (Calabria Jonica) e nella Pianura Pontina. In quest'ultimo

---

<sup>1</sup> Gisotti *et al.*, 2000

caso si tratta di subsidenza naturale di depositi torbosi con elevati spessori, in quanto dovuta sia a un movimento negativo di natura tettonica che a processi di costipamento dei materiali organici sotto il proprio peso e da ossidazione/mineralizzazione degli stessi materiali organici, pur essendo il valore dell'abbassamento del suolo confrontabile con quello dovuto a modificazioni di origine antropica.

## 2 METODOLOGIA

Il lavoro svolto riguarda la catalogazione dei fenomeni di subsidenza in Italia, con particolare attenzione alle tipologie di monitoraggio utilizzata per il controllo di questo fenomeno.

Questo lavoro ha permesso di costruire un quadro conoscitivo del fenomeno quanto più rappresentativo della situazione a livello Nazionale.

Il lavoro è stato articolato in due differenti fasi:

- Ricerca dei dati;
- Implementazione di un database.

Nella prima fase sono stati presi in considerazione i casi segnalati in letteratura come fenomeni di subsidenza utilizzando diverse fonti quali monografie, pubblicazioni su riviste nazionali e internazionali, progetti svolti da istituti di ricerca, siti internet e dati precedentemente catalogati dal Servizio Geofisica di Apat. I fenomeni così raccolti sono stati selezionati attraverso successivi approfondimenti che hanno permesso di individuare le cause del fenomeno e, laddove questi erano monitorati, sono state segnalate la tipologia del metodo di misura utilizzato e la velocità di abbassamento. Per quanto attiene il fenomeno di bradisismo, sebbene inserito nel *data base*, viene trattato separatamente dai fenomeni di subsidenza *sensu strictu* trattandosi, come spiegato più avanti, di una fenomenologia tipica di aree vulcaniche caratterizzata dall'alternarsi di processi di subsidenza e

sollevamento. Sono stati invece esclusi nella presente ricerca i *sinkhole*, cioè quelle “voragini catastrofiche di forma sub-circolare, con diametro e profondità variabili che si aprono rapidamente nei terreni nell’arco di poche ore” la cui genesi è correlata ad un complesso insieme di cause quali la litologia, la tettonica, le condizioni idrologiche al contorno, alla sismicità...etc. Per tali fenomeni nell’Annuario dei dati Ambientali redatto da Apat vengono trattate le “Aree soggette ai *Sinkholes*” come indicatore del rischio naturale in Italia e censite sull’intero territorio nazionale.

La catalogazione dei dati ha previsto l’implementazione di un database costruito precedentemente per censire i comuni che presentano sul loro territorio fenomeni di subsidenza. Al fine di creare un archivio che fosse fruibile correttamente da chiunque, anche a distanza di tempo e di spazio oltre ai dati strettamente correlati al fenomeno, sono stati inseriti metadati che raccolgono le informazioni relative al *dove*, al *quando*, al *come* e da *chi* i dati sono stati forniti.

Nel database si hanno 4 tipi di informazioni: dati verificati (nel caso in cui il dato era già presente nel database ma per il quale non sono state trovate ulteriori informazioni, dati aggiornati (l’aggiornamento del dato si riferisce all’aggiornamento temporale), dati modificati (informazioni non presenti nel database, es. tipo di misura, causa..) e dati inseriti ex novo. Successivamente i dati sono stati incrementati in un Gis, nel sistema di riferimento ED50, fuso 32.

Il database è costituito dai seguenti campi:

#### **Ubicazione geografica**

Viene indicato il comune dove ha avuto luogo la subsidenza, inoltre quando possibile è stata indicata la località all’interno del comune.

#### **Causa del fenomeno**

Sono state indicate le cause che hanno portato al dissesto: prelievo acquifero, estrazione mineraria, produzione idroelettrica, rimozione



fluidi, estrazione gas, geotermia, vulcanesimo, cause naturali e antropiche. Quest’ultime due dizioni sono state utilizzate nei casi in cui non è stata descritto dettagliatamente il fenomeno che ha causato l’evento.

### Periodo temporale

Sono indicati gli intervalli temporali di misura o la data a cui si riferisce la segnalazione dell’evento. Nei casi in cui si hanno misure relative a diversi periodi temporali, sono riportati i dati più recenti, indicando i casi in cui le misure hanno subito sensibili variazioni.

### Metodo di misura

Sono indicate le principali metodologie di misura utilizzate, quali: Gps, livellazione, interferometria. Sono inoltre indicati quei casi in cui per la stessa località sono stati utilizzati più metodi di misura.

### Note

In questa parte sono riportate le informazioni ritenute necessarie per migliorare la comprensione dei dati inseriti nel database.

### Abbassamento annuo

E’ indicata la velocità di movimento in mm/anno.

### Riferimento bibliografico

E’ indicata la fonte dalla quale è stato possibile estrapolare le informazioni.

| Comune                   | Provincia | Regione               | Cause                | Metodo                  | Abbassamento annuo |
|--------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|-------------------------|--------------------|
| VICOFORTE                | CUNEO     | PIEMONTE              | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.88mm/anno       |
| CEVA                     | CUNEO     | PIEMONTE              | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.78mm/anno       |
| PRIERO                   | CUNEO     | PIEMONTE              | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.40mm/anno       |
| MONTCEMOLO               | CUNEO     | PIEMONTE              | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.52mm/anno       |
| MILLESIMO                | SAVONA    | LIGURIA               | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.50mm/anno       |
| CARCARE                  | SAVONA    | LIGURIA               | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.35mm/anno       |
| PONTEDERA                | PISA      | TOSCANA               | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v2.28mm/anno       |
| MONTETUPO                | FIRENZE   | TOSCANA               | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v2.10mm/anno       |
| LECCO                    | COMO      | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.53mm/anno       |
| LIERNA                   | COMO      | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.90mm/anno       |
| BELLANO                  | COMO      | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v1.53mm/anno       |
| COLICO                   | COMO      | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.62mm/anno       |
| NOVIATE MEZZOLA          | SONDRIO   | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.18mm/anno       |
| SAMOLICO                 | SONDRIO   | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v0.02mm/anno       |
| CHIAVENNA                | SONDRIO   | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v1.55mm/anno       |
| SONDRIO                  | SONDRIO   | LOMBARDIA             | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v1.52mm/anno       |
| RAVENNA                  | RAVENNA   | EMILIA ROMAGNA        | Naturali/antropiche  | GPS-LIVELLAZIONE-INTERF | v16mm/anno         |
| SANTARCANGELO            | FORLÌ     | EMILIA ROMAGNA        |                      | LIVELLAZIONE            | v14mm/anno         |
| SANTA GIUSTINA           | BELLUNO   | VENETO                |                      | LIVELLAZIONE            | v10mm/anno         |
| CASTEL S. PIETRO TERME   | BOLOGNA   | EMILIA ROMAGNA        | Prelievo acquifero   | LIVELLAZIONE            | v9mm/anno          |
| SANTARCANGELO DI ROMAGNA | FORLÌ     | EMILIA ROMAGNA        | Rimozione fluidi     | GPS                     | v5mm/anno          |
| MEZZANO                  | TRENTO    | TRENTINO ALTO ADIGE   |                      |                         |                    |
| CASTELLANA GROTTE        | BARI      | PUGLIA                |                      |                         |                    |
| LUCERA                   | FOGGIA    | PUGLIA                | Estrazione gas       |                         |                    |
| MOTOLA                   | TAPANTO   | PUGLIA                |                      |                         |                    |
| PRATO                    | FIRENZE   | TOSCANA               | Prelievo acquifero   | INTERFEROMETRICO        | v20mm/anno         |
| PREONE                   | UDINE     | FRIULI VENEZIA GIULIA |                      |                         |                    |
| CUTROFANO                | LECCE     | PUGLIA                | Estrazione mineraria |                         |                    |
| ACIREALE                 | CATANIA   | SICILIA               |                      |                         |                    |
| GARRI                    | CATANIA   | SICILIA               |                      |                         |                    |
| PRATO CARICO             | UDINE     | FRIULI VENEZIA GIULIA | Naturali             | LIVELLAZIONE            | v12mm/anno         |
| MONTENURLO               | FIRENZE   | TOSCANA               | Prelievo acquifero   | INTERFEROMETRICO        | v30mm/anno         |
| BIENTINA                 | PISA      | TOSCANA               | Prelievo acquifero   | INTERFEROMETRICO        | v6-10mm/anno       |
| FORCARI                  | LUCCA     | TOSCANA               | Prelievo acquifero   | INTERFEROMETRICO        | nulla              |
| SARNO                    | SALERNO   | CAMPANIA              | Prelievo acquifero   | INTERFEROMETRICO-LIVELL | v13mm/anno         |

Fig. 1: Stralcio del Database implementato

### 3 METODI DI MISURA DELLA SUBSIDENZA E LORO APPLICAZIONI

I metodi comunemente utilizzati per misurare le deformazioni del terreno sono rappresentati principalmente da livellazioni topografiche con strumentazione ottica, misure GPS con reti di misura periodiche e/o permanenti.

Tali tecnologie tradizionali permettono di ottenere misure accurate su singoli punti mentre la più moderna tecnica InSAR fornisce la possibilità di ottenere una mappa bidimensionale della distribuzione spaziale dei movimenti con un'accuratezza nella misura comparabile con quella delle tecniche convenzionali.

#### 3.1 .LIVELLAZIONE GEOMETRICA

La livellazione geometrica è utilizzata per determinare con la massima precisione le quote dei punti (materializzati da appositi capisaldi) distribuiti in un dato territorio, che costituiscono i rilievi altimetrici fondamentali a cui si possono collegare le successive operazioni di rilievo altimetrico.

La quota di un punto situato sulla superficie è il tratto di verticale compreso tra la superficie geodetica di riferimento (quota zero) ed il punto stesso. Generalmente nelle operazioni altimetriche che interessano distanze inferiori a 20 Km, le quote dei punti possono essere riferite alla sfera locale anziché al geoide; per operazioni con distanze inferiori ai 400 metri si può adottare come superficie di riferimento il piano orizzontale, commettendo un errore di circa 1 cm nella determinazione delle quote; nel caso vengano richieste quote con precisione del millimetro il piano di riferimento orizzontale può sostituire la sfera locale solamente nelle operazioni con distanze inferiori a 100 m .

La livellazione geometrica permette di raggiungere le massime precisioni per il monitoraggio degli spostamenti verticali. In particolare per l'esecuzione della livellazione di "Alta Precisione" è richiesto l'uso di idonea strumentazione (livello a cannocchiale, stadie e un eventuale micrometro a lamina piano parallela) e l'adozione di particolari modalità operative quali: distanza fra strumento e stadia non superiore a 40 m; misura del dislivello in andata e ritorno di ogni tratto, da caposaldo a caposaldo, in momenti diversi e in modo indipendente, evitando le ore calde o di foschia e le visuali radenti al di sotto dei 40 cm dal terreno; la discordanza fra il dislivello misurato in andata e quello in ritorno non deve superare la tolleranza di  $T = \pm 2,5 \sqrt{L}$  mm su ogni singolo tratto ed  $E = \pm 2 \sqrt{L}$  mm sul singolo poligono dove  $L$  rappresenta rispettivamente la lunghezza del tratto e del poligono espressa in chilometri.

Le metodologie per la determinazione del dislivello con livellazione geometrica sono così suddivise:

- livellazione equidistante
- livellazione da un estremo
- livellazione reciproca

Con la livellazione reciproca per calcolare il dislivello AB si effettuano due stazioni. Nella prima stazione in prossimità del punto «indietro»  $A$  e si fanno le letture alla stadia sia in  $A$  che in  $B$ . Si effettua una seconda stazione questa volta in prossimità del punto «avanti»  $B$ , posizionando il livello in modo che la distanza verso il punto avanti sia uguale a quella che la precedente stazione aveva dal punto indietro ma anche che la distanza verso il punto indietro sia uguale alla precedente verso il punto «avanti», lavorando cioè secondo uno schema a parallelogramma. Il dislivello corretto è dato dalla media aritmetica dei due dislivelli calcolati dalle due stazioni.

La livellazione geometrica equidistante risulta essere la più precisa tra le livellazioni geometriche. Il livello occupa una posizione equidistante tra i punti A e B di cui si vuole conoscere il dislivello. Tale tipologia è impiegata nel calcolo degli abbassamenti del terreno.

In relazione alla loro precisione i livelli tradizionali a cannocchiale si suddividono in:

| Tipologia Livelli           | Errore medio Km |
|-----------------------------|-----------------|
| Livelli da cantiere         | 10-5mm          |
| Livelli di media precisione | 5-2mm           |
| Livelli di precisione       | 2-1mm           |
| Livelli di alta precisione  | <1mm            |

dove per precisione dei livelli si intende l'errore che si commette impiegandoli nella misura del dislivello tra due punti distanti tra loro 1 Km.

I livelli digitali di precisione con errore medio chilometrico variabile da  $\pm 10$  mm a  $\pm 0.2$  mm, offrono grande affidabilità nelle misure.

Precisioni fino a sub-millimetriche sono quindi possibili tanto con livelli tradizionali che con quelli Digitali. I livelli digitali garantiscono maggiore produttività, con riflessi notevoli sui costi per Km nelle operazioni di misura. I dati rilevati con i livelli digitali dotati di memoria interna ed in grado di comunicare con P.C. per lo scaricamento dei dati vengono elaborati da software commerciali (ambienti DOS, Windows) in formati standard.

Il controllo della subsidenza può essere effettuato con elevata precisione individuando capisaldi di riferimento stabili (rispetto ad un sistema di riferimento assoluto) cui ancorare l'intera rete di livellazione. Tale rete è costituita da un numero opportuno di vertici (capisaldi) solidali al terreno, tra i quali si calcolano i dislivelli ad intervalli da definire.

Come vertici della rete di livellazione possono essere utilizzati i capisaldi della rete dei trigonometrici IGM (Istituto Geografico Militare) e i capisaldi della rete di livellazione nazionale.

### **VANTAGGI**

- Precisione millimetrica

### **SVANTAGGI**

- Tecnica costosa per aree estese;
- Richiede operazione di misura complesse che in aree molto vaste necessitano di tempi lunghi e numerose squadre di misura. Inoltre tale metodo fornisce soltanto dati relativi all'intorno dei capisaldi misurati;
- Difficoltà nella localizzazione dei capisaldi di riferimento.

## **3.2 GPS**

Il NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Rancing Global Positioning System) è un sistema di posizionamento globale basato sull'emissione, da parte di una costellazione di satelliti artificiali, di opportuni segnali elettromagnetici che permettono di ricavare informazioni relative al tempo ed alle distanze tra i satelliti ed una stazione ricevente (ferma o in movimento). Attraverso la ricezione e l'interpretazione di tali segnali, da parte della suddetta stazione, è possibile realizzare un posizionamento tridimensionale della stessa (anche in tempo reale), in un sistema di riferimento cartesiano geocentrico.

Il sistema GPS si compone di tre parti:

- Segmento spaziale
- Segmento di controllo
- Segmento utente

Il segmento spaziale è costituito da una costellazione nominale di 24 satelliti, più 3 satelliti di scorta, disposti su 6 piani orbitali, distanziati di  $60^\circ$  in ascensione retta ed inclinati di  $55^\circ$  rispetto

all'equatore celeste; l'orbita ha un raggio di circa 26.000 km, con un periodo di rivoluzione di 12 ore siderali.

La particolare geometria della costellazione garantisce la visibilità di almeno 4 satelliti da ogni punto della terra.

Le principali funzioni del segmento spaziale sono quelle di:

- fornire varie informazioni agli utilizzatori attraverso, l'invio di diversi tipi di segnali;
- ricevere e memorizzare le informazioni provenienti dal segmento di controllo e permettere a quest'ultimo di impartire le opportune correzioni d'orbita, eseguite attraverso razzi di manovra;
- mantenere un segnale di tempo molto accurato, utilizzando 4 oscillatori atomici (2 al cesio e 2 al rubidio) collocati a bordo di ciascun satellite.

Il segmento di controllo: comprende stazioni di monitoraggio a terra che ricevono continuamente i segnali emessi da tutti i satelliti per controllare le loro effemeridi e predire la loro rotta; valutano l'effetto troposferico sulla ricezione dei segnali e compensano gli errori degli orologi dei satelliti (fondamentale la sincronia tra gli orologi dei satelliti e quelli dei ricevitori e la conoscenza dell'istante esatto in cui il segnale è partito dal satellite per la definizione del posizionamento; basti pensare che una differenza di 1/1000 di secondo potrebbe penalizzare la rilevazione con un errore di circa 270 Km).

Il segmento utente: costituito dagli utenti civili e militari. Ogni utente è dotato di un equipaggiamento più o meno sofisticato che, in ogni caso, comprende un'antenna ed un ricevitore capace di ricevere i segnali emessi dai satelliti per ottenere il posizionamento tridimensionale in tempo reale e di raccogliere i dati per una compensazione successiva che fornisca risultati più precisi.

Il posizionamento di un punto a terra si basa sulle misure delle tre distanze del punto da almeno 3 satelliti della costellazione statunitense NAVSTAR, dei quali siano note le coordinate.

La determinazione della posizione di punti sulla superficie terrestre può essere influenzata da una serie di errori dovuti a (forse è troppo dettagliato lasciare solo se avanza spazio):

- eventuale mancanza di sincronismo tra gli orologi dei satelliti e dei ricevitori;
- eventuali deviazioni della posizione di ciascun satellite rispetto alla sua posizione teorica (errori delle effemeridi);
- variazioni della velocità di propagazione che il segnale proveniente dai satelliti subisce attraversando la ionosfera e la troposfera;
- creazione di errori di vario tipo da parte del Governo americano (Selective Availability, letteralmente “disponibilità selettiva”) in modo da ridurre la precisione del sistema per motivi di sicurezza;
- sdoppiamento del segnale (multipath): il segnale potrebbe non giungere direttamente al ricevitore ma essere in certo modo sdoppiato lungo il suo percorso da ostacoli di vario genere, per cui il ricevitore riceve prima la parte del segnale che arriva direttamente dal satellite e, successivamente, la parte del segnale.

A seconda del tipo di rilevamento da eseguire e della precisione da conseguire, possono essere adottate procedure operative differenti :

- procedure statiche: prevedono osservazioni contemporanee su due ricevitori fissi sugli estremi della base per tutto il tempo necessario all’acquisizione dei dati che può richiedere sessioni di misura di alcune ore. È questa la procedura che consente di ottenere la massima precisione formale (precisione subcentimetrica: da 0.2 a 10 ppm per basi inferiori a 20 Km);
- procedure dinamiche: presuppongono lo spostamento dei ricevitori durante la sessione di acquisizione dei dati, allo scopo di determinare un numero maggiore di punti in tempi brevi ;
- Un particolare metodo dinamico è la procedura RTK (*Real Time Kinematic*) nella quale l’acquisizione delle coordinate si avvale di un collegamento radio che permette di ricevere la risoluzione delle ambiguità di fase da un ricevitore di riferimento e consente di ottenere le coordinate in tempo reale evitando la post-elaborazione.

Le operazioni di tipo statico e dinamico possono essere svolte con il supporto di una rete di stazioni GPS permanenti; queste sono in grado di fornire dati da utilizzare per un trattamento sia in tempo reale che in post elaborazione.

Nell'ambito di un rilievo geodetico, un tale sistema di misura offre i seguenti vantaggi e svantaggi:

### **VANTAGGI**

- la semplicità di esecuzione delle misure;
- la precisione dei risultati e la rapidità del rilievo: oggi, per un rilievo GPS, si riescono a raggiungere (ed in alcune applicazioni a superare) le precisioni ottenibili con le migliori strumentazioni tradizionali, riducendo, nel contempo, i tempi di esecuzione dei rilievi;
- la non necessaria intervisibilità tra i punti estremi della base da misurare e l'inesistenza di limiti massimi di distanza;
- l'unicità del sistema di riferimento sia per la componente planimetrica che per quella altimetrica;
- la possibilità di operare di notte o in presenza di condizioni meteorologiche sfavorevoli (pioggia, foschia, ecc.) che renderebbero molto difficile o addirittura impossibile il ricorso a metodologie tradizionali.

### **SVANTAGGI**

- la necessaria “visibilità dei satelliti” che rende possibile l'impiego della strumentazione GPS solo nel caso di rilievi all'aperto e la sensibilità ai disturbi elettromagnetici;
- la precisione non uniforme in planimetria ed in quota (minore);
- la necessità di occupare i punti da rilevare, che non ne rende possibile l'impiego per alcune tipologie (punti materializzati da assi di campanili, spigoli di muri, ecc.);



- la diversità tra il sistema di riferimento GPS e il sistema geodetico nazionale.

In molte applicazioni geodetiche, nonostante gli svantaggi evidenziati, la tecnica GPS è ormai in grado di sostituire completamente (o quanto meno di integrare notevolmente) le tecniche di rilievo tradizionale. Esso risulta particolarmente indicato per il rilievo periodico di reti geodetiche, finalizzato al controllo delle deformazioni in ambito locale, regionale ed anche continentale.

### 3.3.2 IL CASO DEI CAMPI FLEGREI: CONFRONTO TRA L'UTILIZZO DEL GPS E LA LIVELLAZIONE GEOMETRICA

Come esempio dell'utilizzo della metodologia GPS e della livellazione geometrica, viene illustrato il caso dei Campi Flegrei che offre un interessante confronto tra le due tecniche di rilievo.

Come è noto, l'area dei Campi Flegrei è soggetta a importanti fenomeni di bradisismo che vedono l'alternarsi di fasi di sollevamento e abbassamento del terreno in ragione dei movimenti del magma in profondità. Pertanto il processo di subsidenza risulta in questo caso solo una parte di una fenomenologia ben più ampia e complessa. Nonostante ciò il caso offre un interessante confronto tra le tecniche di monitoraggio GPS e livellazione geometrica.

La rete di stazioni GPS è costituita da 8 stazioni permanenti.

I principali parametri di processamento dei dati ,che vengono utilizzati sono quelli tipici per l'elaborazione di reti GPS locali.

La soluzione finale giornaliera viene ottenuta in modalità multibase vincolando fortemente (al livello di 0,1 mm) le coordinate della stazione di riferimento QUAR, la stabilità della quale viene continuamente monitorata tramite un'altra elaborazione con

stazioni esterne (CAGL, MATE, MEDI, NOT1) della rete IGS e/o EUREF ed inquadrata nel sistema ITRF00.<sup>2</sup>

Dagli output della combinazione delle soluzioni giornaliere e settimanali vengono ricavate le serie temporali delle variazioni in Nord, Est, Up delle coordinate delle stazioni.

La rete di livellazione copre l'intera area flegrea ed è collegata a quella corrispondente che insiste sull'area vesuviana; è costituita da circa 330 capisaldi distribuiti su circa 135 km con interdistanza media di 400 m e strutturata in quattordici circuiti concatenati.

Da maggio 2004 a marzo 2006 sono state effettuate 5 diverse campagne di livellazione (maggio 2004 - novembre 2004 - maggio 2005 - ottobre 2005 - marzo 2006).

I dati compensati delle 4 campagne condotte da novembre 2004 a marzo 2006, sono stati utilizzati per graficare gli andamenti delle quote sui vertici del circuito Solfatara e per quelli lungo le linee Costiera e Sud-Nord, rispetto al maggio 2004 (fig.2). Da tale rappresentazione si possono dedurre alcune considerazioni circa il campo di spostamento attivo nell'area flegrea negli ultimi 2 anni.

Ad un'iniziale fase di subsidenza che ha portato ad un abbassamento dell'area centrale di Pozzuoli, segue un periodo di sollevamento di circa pari entità che ha riportato le variazioni di quota avvenute nel periodo maggio 2004-maggio 2005 a rientrare sostanzialmente nei limiti d'errore del metodo (curva blu in fig. 2), pur se generalmente verso valori più alti rispetto a maggio 2004, specie nell'area storicamente interessata dalle maggiori variazioni.

A causa della sostanziale stabilità intercorsa nel periodo maggio 2005-ottobre 2005, la curva cumulativa rispetto al maggio 2004 (in verde in fig. 2) va praticamente a sovrapporsi alla precedente.

La ripresa del sollevamento rilevato dalle misure del marzo 2006, ha portato lo spostamento cumulativo rispetto al maggio 2004

---

<sup>2</sup> Pingue *et al.*, 2005

(curva in magenta in fig. 2) a valori massimi di poco inferiori ai 2 cm nell'area puteolana.<sup>3</sup>

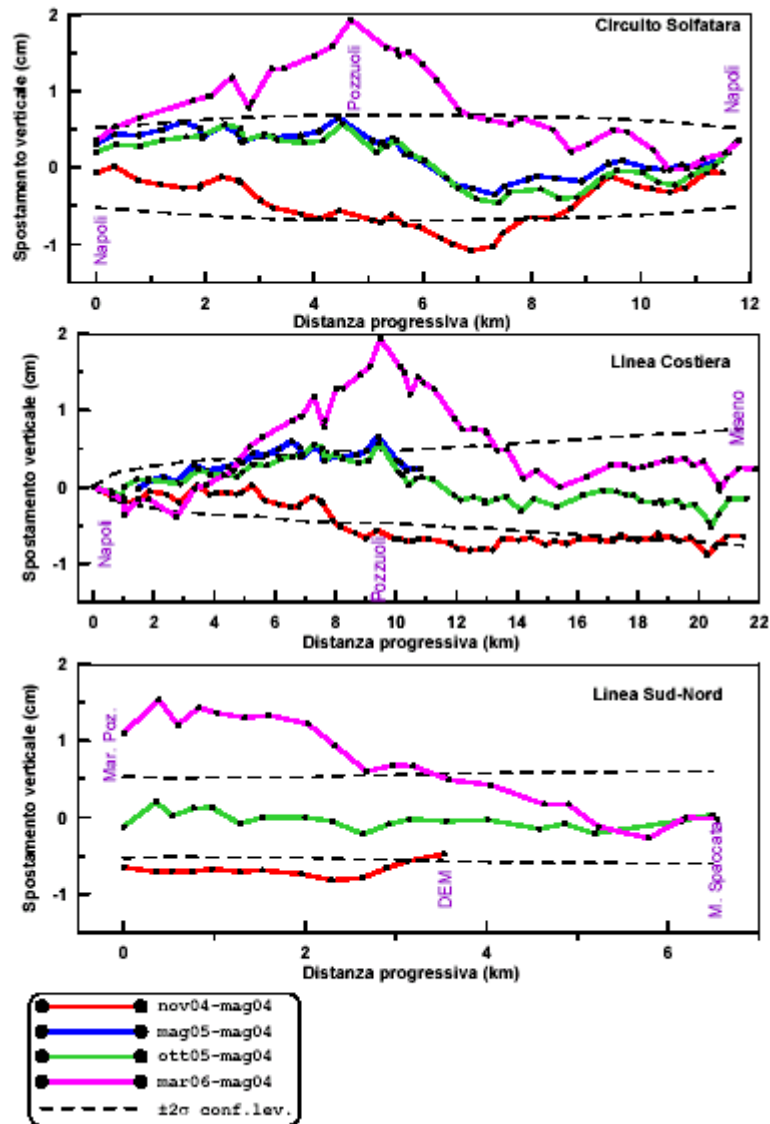


Fig. 2: Variazioni di quota nel periodo Maggio 2004 - Marzo 2006 lungo il Circuito Solfatara, la Linea Costiera e la Linea Sud-Nord (Pozzuoli-Quarto). Le linee colorate indicano gli spostamenti verticali avvenuti tra 4 differenti intervalli di monitoraggio; le linee tratteggiate delimitano i livelli di confidenza  $\pm 2\sigma$ .

### Confronto Livellazione-GPS

Sono riportate di seguito le curve dell'andamento temporale, nell'intervallo gennaio 2000-marzo 2006, delle tre componenti Nord, Est ed Up della stazione GPS RITE, per confronto sono

<sup>3</sup> Pingue *et al.*, 2005

evidenziate le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005, 2006.

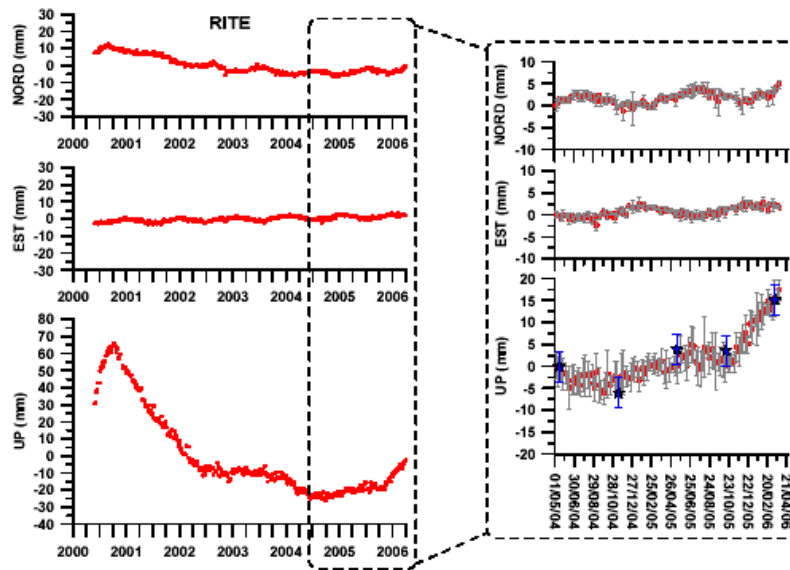


Fig. 3: Serie temporale delle variazioni settimanali delle coordinate della stazione RITE. Nel riquadro sono evidenziate le variazioni registrate nel periodo maggio 2004 - marzo 2006, con le barre d'errore  $\pm \sigma$ . Sono anche riportate, per confronto, le variazioni di quota (stelle blu) calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004, con le rispettive deviazioni standard, per il caposaldo di livellazione posto nei pressi della stazione CGPS.

Il confronto tra dislivelli GPS e di livellazione mostra un buon accordo come trend ed anche come valori numerici degli spostamenti; le differenze, sono limitate entro pochi millimetri.

Riferendosi al periodo 2004-2006 si nota come i dati disponibili per l'area di massimo sollevamento, riportati in fig. 3 e 4 (RITE) inducono ad ipotizzare quattro periodi a comportamento diverso:

- nei mesi che grossomodo vanno dal maggio 2004 al novembre 2004 i dati di livellazione e CGPS mostrano una leggera subsidenza con un tasso nel *range*  $-0.3 \div -1.0$  mm/mese;
- nei sei mesi successivi, fino a maggio 2005, si evidenzia un periodo di sollevamento<sup>4</sup> con un tasso simile ( $+0.6 \div +1.6$  mm/mese), ma opposto, a quello del periodo precedente, tanto da tornare sui livelli del maggio 2004;

<sup>4</sup> Pigue *et al.*, 2005

- da maggio ad ottobre 2005 la situazione deformativa dei Campi Flegrei sembra caratterizzata da una sostanziale stabilità (tasso di subsidenza  $< -0.1$  mm/mese), considerato i livelli di tolleranza;
- infine, nell'ultimo periodo ottobre 2005-marzo 2006 si rileva una fase di sollevamento più significativa, con un tasso di  $+2.3 \div +3.1$  mm/mese, che sembra ancora continuare.<sup>5</sup>

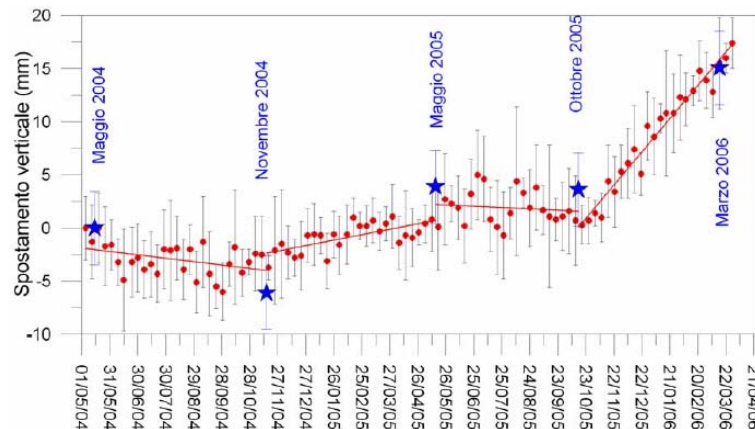


Fig. 4: Serie temporale delle variazioni della quota su base settimanale per la stazione permanente RITE della rete CGPS per il periodo maggio 2004 – marzo 2006 (vedi fig. 6). Sono riportati anche le curve di regressione lineare dei dati GPS per i quattro intervalli temporali evidenziati. Le stelle blu indicano le variazioni di quota calcolate dalle campagne di livellazione effettuate nel 2004, 2005 e 2006, rispetto a maggio 2004.

Queste caratteristiche sono ricavabili sia dai dati di livellazione che da quelli delle stazioni permanenti GPS; quindi l'attuale sistema di stazioni permanenti nell'area flegrea è perfettamente in grado sia per la sua configurazione che per le metodiche di analisi dei dati di seguire e tracciare correttamente, nell'ambito delle tolleranze del metodo, il fenomeno bradisismico in atto in tale area. Le informazioni planimetriche provenienti dal GPS hanno una precisione comparabile a quella della componente verticale determinata con la livellazione. Pertanto l'unione delle informazioni ricavabili da entrambe le tecniche costituisce un potente mezzo per un miglior vincolo nella stima dei parametri geometrici della sorgente. Infatti, il rapporto tra le deformazioni orizzontali e quelle verticali varia fortemente con la forma della sorgente del fenomeno di subsidenza.

<sup>5</sup> Pingue *et al.*, 2005

Va anche segnalato che, guardando con maggior dettaglio l'andamento temporale della deformazione in questi ultimi periodi, si nota una minore coerenza a piccola scala (temporale e spaziale), rispetto al passato, come se il campo di deformazione fosse più disturbato. L'effetto sembra essere prodotto dall'assenza negli ultimi anni di un segnale deformativo forte e coerente come quello che ha caratterizzato la fase di subsidenza dal 1985.

### 3.3 L'INTERFEROMETRIA RADAR

L'Interferometria SAR (Synthetic Aperture Radar) (InSAR), usata per la prima volta nel 1974 per produrre mappe topografiche, è oggi largamente applicata nel rilevamento delle variazioni della superficie terrestre.

Le immagini Sar oggi più utilizzate vengono acquisite dai due satelliti Ers (European Remote Sensing Satellite) dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa), lanciati nel 1991 e 1995 su orbite circumpolari a un'altezza di 780 chilometri.

Il SAR è un sistema radar generalmente collocato su piattaforme spaziali, che opera mediante l'invio di opportuni impulsi di energia sotto forma di microonde verso la terra e misura la potenza e il ritardo dell'impulso che ritorna indietro per riflessione. Il SAR fornisce quindi immagini che contengono sia l'informazione d'intensità (legata alla riflettività degli oggetti) sia l'informazione di fase (legata alla distanza tra bersaglio e radar). Il suo uso interferometrico (cioè operando una differenza tra le fasi di due passaggi eseguiti in tempi differenti) permette di rilevare sia la topografia di un'area sia (eliminando la componente topografica) le eventuali deformazioni.

L'influsso topografico può essere simulato con un modello digitale di elevazione (cioè una carta digitale delle quote) e sottratto all'interferogramma; il risultato è la misura dello spostamento della superficie terrestre nella direzione del satellite durante il tempo trascorso nell'acquisizione delle due immagini.

La precisione dell'interferometria radar differenziale per la misura della subsidenza è inferiore al centimetro.

Alcuni dei limiti dell'interferometria differenziale classica (DInSAR), causati principalmente dalla presenza di artefatti atmosferici, dai fenomeni di decorrelazione temporale del segnale indotti dalle variazioni nel tempo delle caratteristiche elettromagnetiche della scena illuminata dal radar e dal rumore intrinseco del segnale, possono essere superati mediante l'approccio multiinterferogramma".

Basandosi sull'utilizzo di grandi data-set di immagini (almeno 20-25) e non di due singole acquisizioni come per le analisi DInSAR, il Politecnico di Milano (POLIMI) ha sviluppato e brevettato un algoritmo di elaborazione interferometrica capace di fornire misure di spostamento con precisione millimetrica su alcuni punti, chiamati *Permanent Scatterers* (PS), caratterizzati da elevati valori di segnale retrodiffuso su tutte le acquisizioni. Di solito i PS rappresentano strutture antropiche (edifici, ponti, etc.) ma anche riflettori naturali come rocce esposte.<sup>6</sup>

Questo tipo di analisi, benché limiti la possibilità di ottenere misure di spostamento ad un sottoinsieme dei pixel dell'intera immagine radar, escludendo quindi zone vegetate o aree in cui lo scenario sia interessato da drastici cambiamenti durante il periodo di monitoraggio, permette di ottenere una rete di punti di misura che in area urbana raggiunge una densità pari a 200-300 PS/km<sup>2</sup>.

## **VANTAGGI**

- Monitoraggio continuo su ampie regioni ed in qualsiasi condizione ambientale;
- Fornisce informazioni sulla distribuzione areale delle deformazioni della superficie terrestre;
- Alta risoluzione relativamente alle deformazioni superficiali del terreno;

---

<sup>6</sup> Ferretti *et al.*, 1999

- Per aree molto vaste risulta un metodo di controllo relativamente più economico ;
- Aspetti operativi (p.e. congruità dell'archivio con le aree di interesse nazionale).

### **SVANTAGGI**

- Fenomeni di decorrelazione temporale del segnale indotti dalle variazioni nel tempo delle caratteristiche elettromagnetiche della scena illuminate dal radar e dal rumore intrinseco del segnale;
- Misure non affidabili per aree di ridotta estensione.

#### **3.3.1 ANALISI DEI FENOMENI DI SUBSIDENZA NEL BACINO DEL FIUME ARNO MEDIANTE INTERFEROMETRIA RADAR**

Per mappare e misurare le aree interessate da fenomeni di subsidenza sia naturale che di origine antropica nelle aree di pianura ubicate nel bacino del fiume Arno è stata utilizzata l'interferometria SAR da satellite (InSAR). E' stata effettuata un'analisi mediante la tecnica dei Permanent Scatter sull'intero territorio del bacino del fiume Arno (9.100 km<sup>2</sup>) utilizzando dati dei satelliti ERS1 ed ERS2 acquisiti nell'intervallo temporale 1992-2002. Oltre ai dati ERS sono stati elaborati su questa zona anche i dati Radarsat acquisiti fino al 2005.

L'analisi PS effettuata sull'intero bacino del fiume Arno ha permesso di ottenere circa 438.000 PS di cui 260.000 da orbite discendenti e 178.000 da orbite ascendenti, raggiungendo un valore di densità spaziale pari a 226 PS/km<sup>2</sup>, grazie all'alto livello di urbanizzazione dell'area.

Dall'osservazione della distribuzione spaziale dei PS, classificati in funzione della loro velocità di abbassamento media annua, è stato possibile identificare alcune zone affette da fenomeni di subsidenza con significativi tassi di deformazione annua. Mentre nella piana di Firenze- Prato-Pistoia i dati interferometrici hanno confermato le



condizioni di stabilità dell'area fiorentina, in corrispondenza della conoide fluviale del T. Bisenzio hanno invece identificato forti abbassamenti del terreno.

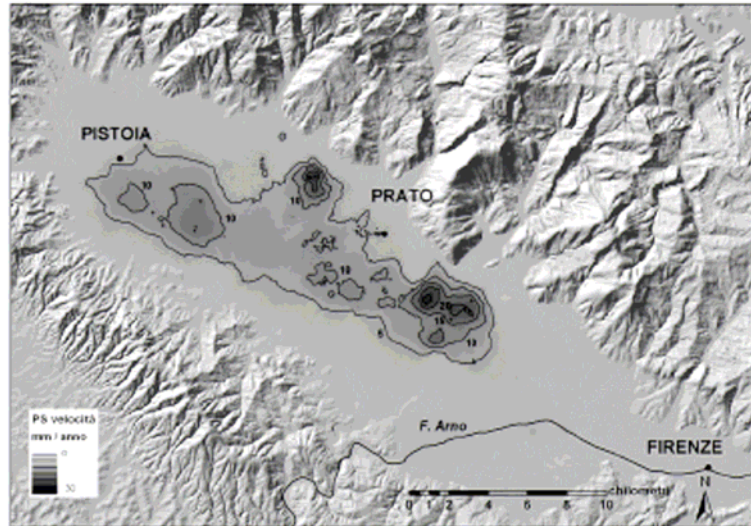


Fig. 5: Curve di isovelocità (equidistanza 5 mm/anno) ottenute dall'interpolazione dei PS.

L'acquifero principale di questa zona è rappresentato dai livelli grossolani dei sedimenti fluviali del Bisenzio ed è interessato dagli anni '60 da estrazione di acqua per alimentare l'acquedotto della città di Prato ed il suo distretto industriale tessile; i tassi dell'abbassamento raggiungono valori superiori ai 10 mm/anno. Sovrapposto a tale trend generale di deformazione che interessa tutta la conoide del Bisenzio, si registra nelle zone distali della conoide presso Montemurlo e Cadenzano, ove sono quindi presenti maggiori spessori di ghiaie, alcune "bolle" di subsidenza con abbassamenti più consistenti pari a 30 mm/anno correlabili all'elevata concentrazione degli impianti industriali.

Il territorio intorno all'abitato di Bientina mostra tassi del abbassamento superiori a 15 mm/anno nell'intervallo temporale 1992-2002. Per ottenere un aggiornamento delle misure di abbassamento del terreno su questa zona sono state acquisite ed elaborate mediante la tecnica PS anche le immagini radar del

satellite canadese Radarsat per il periodo marzo 2003-maggio 2005<sup>7</sup>.

L'analisi di questi dati ha evidenziato come in generale negli ultimi 2 anni i tassi di abbassamento siano diminuiti notevolmente nell'area di Porcari, fino quasi ad annullarsi mentre nell'area di Bientina è stata registrata una leggera diminuzione degli abbassamenti fino a raggiungere valori medi pari a 6-10 mm/anno.

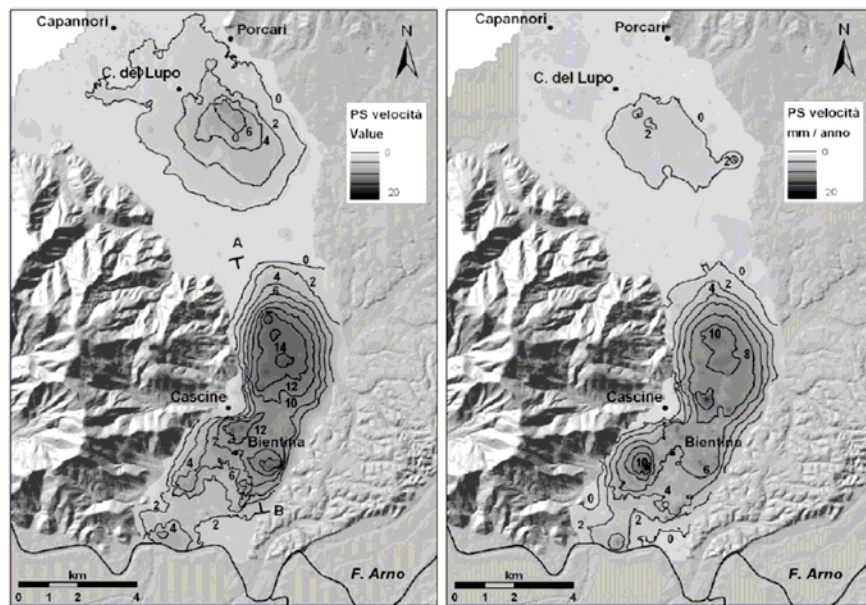


Fig. 6: Curve di isovelocità (equidistanza 2 mm/anno) ottenuti dall'interpolazione dei PS nel periodo 1992-2002 (a sinistra) e 2003-2005 (a destra) nella pianura lucchese

Per evidenziare le possibili correlazioni esistenti tra gli abbassamenti della falda nell'area di studio e la distribuzione spaziale delle deformazioni del terreno e la loro variazione nel tempo, le misure fornite dai PS tra il 1992 ed il 2005 sono state analizzate congiuntamente ai dati riguardanti le condizioni idrogeologiche dell'area. Sono stati utilizzate a tal fine carte piezometriche relative a diversi anni a partire dal 1970, dati derivanti dal monitoraggio piezometrico di alcuni pozzi, sondaggi stratigrafici e prove di laboratorio. La distribuzione spaziale dell'escursione piezometrica tra il 2002 ed il 1970 è solo parzialmente sufficiente a spiegare la distribuzione degli

<sup>7</sup> Canuti *et al.*, 2006

abbassamenti del terreno ottenuta dall'interpolazione dei PS. Per ottenere una migliore comprensione di tale distribuzione sono stati raccolti dati stratigrafici per ricostruire l'andamento nel sottosuolo degli spessori di materiali comprimibili, principalmente argille e limi.

Da questi studi si è desunto che la velocità di abbassamento del terreno è fortemente correlata alla differenza tra i livelli piezometrici del 2002 e del 1971. Inoltre le massime velocità di abbassamento del terreno sono localizzate in corrispondenza degli spessori maggiori di materiale comprimibile.

### 3.3.2 IL CASO DI SARNO: CONFRONTO TRA L'UTILIZZO DELLA INTERFEROMETRIA E LA LIVELLAZIONE GEOMETRICA

Viene presentato il caso dell'area dell'abitato di Sarno ove il fenomeno di subsidenza legato a fenomeni di tipo antropico è controllato con le metodologie di monitoraggio interferometrico e di livellazione geometrica.

Sono state utilizzate 44 immagini di ERS-112 (orbita discendente track 36 frame 2781) che coprono l'intervallo temporale esteso dal giugno 1992 alla fine di settembre del 2000; gli interferogrammi sono stati ottenuti da coppie di immagini SAR caratterizzate da valori di baseline inferiori a 130 m, usando informazioni orbitali e un DEM SRTM dell'area.

I cedimenti misurati con la tecnica DInSAR sono stati confrontati con quelli ottenuti con livellazioni topografiche di precisione condotte su una rete di 18 capisaldi, alcuni dei quali coincidenti con la sommità di fori di sondaggio attrezzati con piezometri<sup>8</sup>.

Grazie ad una maggiore densità spaziale dei pixel SAR rispetto ai capisaldi topografici, le mappe ottenute dai dati DInSAR presentano un livello di dettaglio di gran lunga superiore a quelle

---

<sup>8</sup> Cascini *et al.*, 2005

derivate dalle analisi dei dati di livellazione, consentendo, quindi, una più accurata individuazione delle fasce di territorio che hanno manifestato le stesse aliquote di cedimento (Fig. 7b).

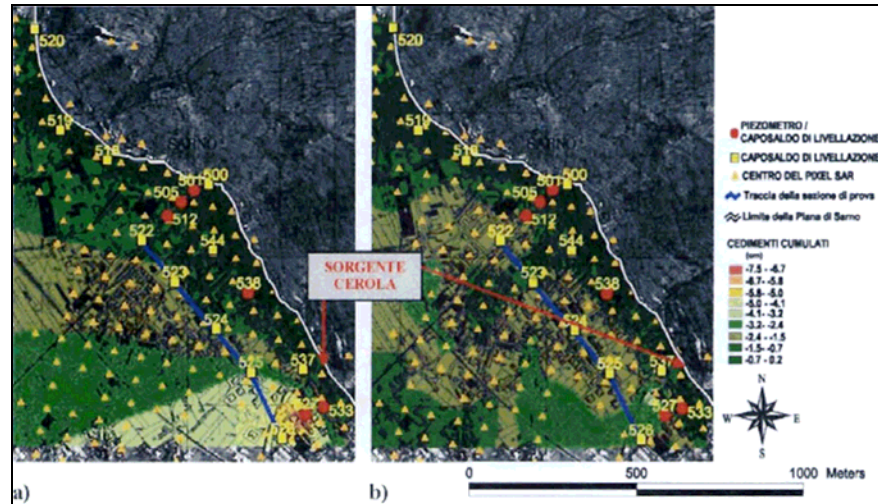


Fig 7: Mappe di deformazione relative a: a) misure di livellazione (luglio 1992-ottobre 1993); b) dati SAR (giugno 1992- novembre 1993) (modificata da Cascini et al. 2005).

### III. LA SUBSIDENZA NELLA PIANURA PADANA

In questo paragrafo viene trattato il caso di subsidenza della Pianura Padana che costituisce uno degli esempi più emblematici del territorio nazionale sia per l'entità ed estensione del fenomeno sia per le conseguenze economiche. All'interno di quest'area sono stati applicati differenti metodi di controllo ed realizzati interessanti progetti per ridurre il fenomeno della subsidenza. Fin dal secondo dopoguerra la Pianura Padana e, in particolare, quella emiliano romagnola, è soggetta a fenomeni estesi di subsidenza.<sup>9</sup> Questo processo diventa un fattore di rischio quando l'abbassamento del terreno è particolarmente forte o quando la topografia è già depressa e vicina, o al di sotto, del livello del mare. Per la pianura alluvionale dell'Emilia-Romagna i valori di subsidenza naturali attesi sono dell'ordine di 0,1-0,3 cm/anno mentre i valori

<sup>9</sup> Arpa Regione Emilia Romagna

effettivamente misurati nelle ultime decine d'anni sono quasi ovunque maggiori di 0,4 cm/anno e con punte di 5 cm/anno.<sup>10</sup> (Fig. 8)

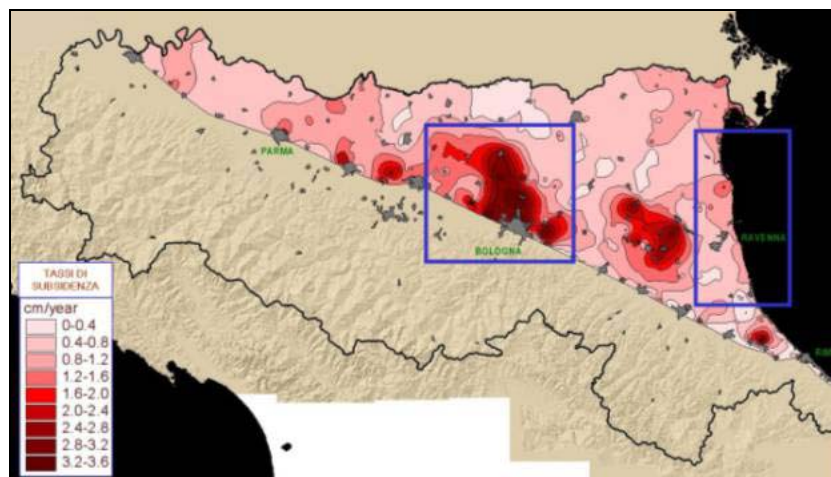


Fig. 8: Distribuzione della subsidenza nella pianura emiliano romagnola nel periodo 1973/93-1999 e delimitazione di due aree critiche oggetto di studi specifici. Dati ARPA Ingegneria Ambientale, Bologna.

La Regione Emilia-Romagna, ha realizzato tramite ARPA Emilia-Romagna e in collaborazione con il DISTART dell'Università di Bologna, la Rete Regionale di Controllo della Subsidenza a partire dalla fine degli anni '90. Essa consta di una rete di linee di livellazione di alta precisione integrata con una rete di stazioni di misura GPS. Dal 2005 per il monitoraggio è stato possibile utilizzare la tecnologia interferometrica SAR. Un cospicuo lavoro di omogeneizzazione dei dati di subsidenza disponibili per gli anni '70-'90, e dei dati provenienti dalla Rete regionale ha permesso di elaborare delle carte dell'abbassamento del suolo in Emilia-Romagna che mettono in luce le aree più critiche e le relazioni con i principali ambienti geologici della pianura, ovvero:

1. Le conoidi alluvionali allo sbocco delle valli appenniniche. Fra queste la conoide del Fiume Reno, su cui si sviluppa una parte rilevante della città di Bologna e della sua provincia, registra il preoccupante record di 6 metri di abbassamento in 50 anni. Nelle

<sup>10</sup> Arpa Regione Emilia Romagna



aree in cui si ha un abbassamento della piezometrica si è osservato l'aumentare dei processi di subsidenza.(Fig.9).

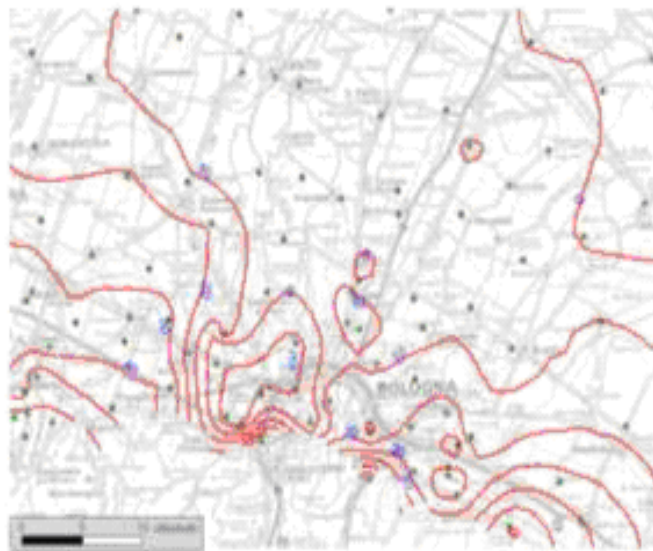
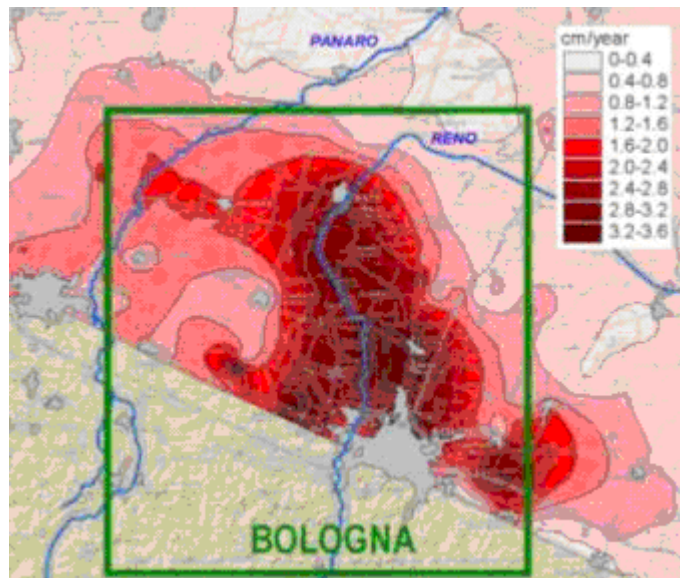


Fig. 9 : Il dettaglio dei valori di subsidenza nella pianura bolognese tratto dalla figura precedente messo a confronto con i dati sui livelli piezometrici della stessa area e i principali pozzi di prelievo delle acque sotterranee. Dati ARPA Ingegneria Ambientale, Bologna.

2. La pianura deltizia del Po e la costa emiliano romagnola, dove i tassi di subsidenza arrivano a 0,8-1,6 cm/anno (Fig.10).

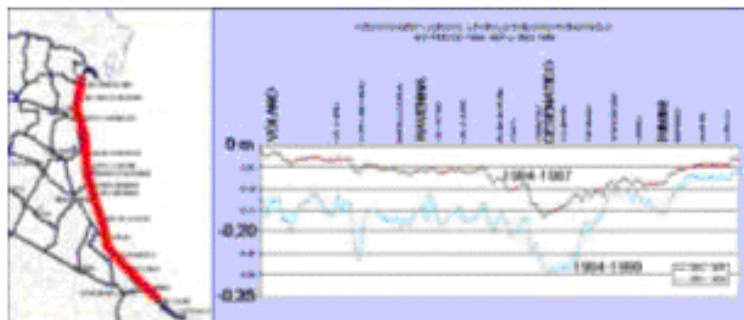
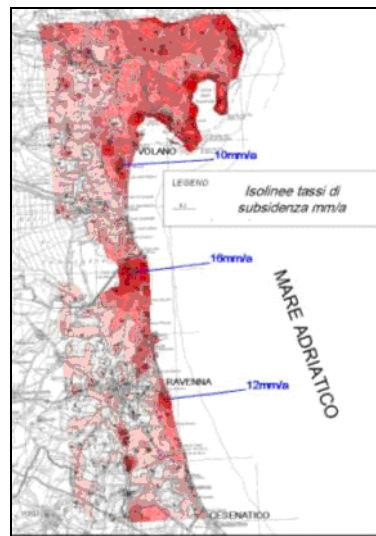


Fig. 10: Distribuzione della subsidenza nella costa emiliano romagnola per il periodo 1992-2000 in base all'elaborazione di dati di Interferometria satellitare tipo SAR e diagramma degli abbassamenti misurati lungo il litorale nei periodi 1984-87 e 1984-99 tramite livellazione topografica. Tratti da ARPA (2003).

L'elevato tasso di subsidenza della fascia costiera emiliano romagnola è riconducibile oltre alla connessione con i prelievi idrici sotterranei, all'estrazioni metanifere costiere e marine più vicine alla costa

Si può concludere dicendo che, la subsidenza delle aree costiere induce la necessità continua di opere a difesa della costa

dall'ingressione marina e dalla erosione , ed a difesa del territorio dal rischio idraulico. Queste comportano investimenti che sono di qualche ordine superiore a quelli che sarebbero necessari per una infrastrutturazione efficace che sia sostitutiva dei prelievi di acque sotterranee.

#### 4.1 PROGETTI DI STUDIO E SPERIMENTAZIONE DI INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE

Il Servizio Geologico Sismico e dei Suoli della Regione Emilia Romagna, ha eseguito in particolare i seguenti studi specifici finalizzati alla comprensione della subsidenza in aree critiche:

Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche

E' un progetto formalizzato in un apposito protocollo di intesa (deliberazione della Giunta della Regione Emilia-Romagna n° 1096 del 2001) tra Regione Emilia Romagna, Provincia di Bologna, Comune di Bologna, Autorità di Bacino del Reno ed HERA s.p.a, ed eseguito nel periodo 2001-2006 attraverso la collaborazione di ARPA Ingegneria Ambientale (Regione Emilia-Romagna et al., 2005). In questo ambito il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli ha anche attivato una collaborazione con il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Milano per approfondimenti sulla parte modellistica del progetto<sup>11</sup>.

I risultati principali dello studio sono sintetizzati nella realizzazione dei seguenti prodotti:

- 1) La ricostruzione del modello geologico di sottosuolo (Fig.11);

---

<sup>11</sup> Arpa Regione Emilia Romagna



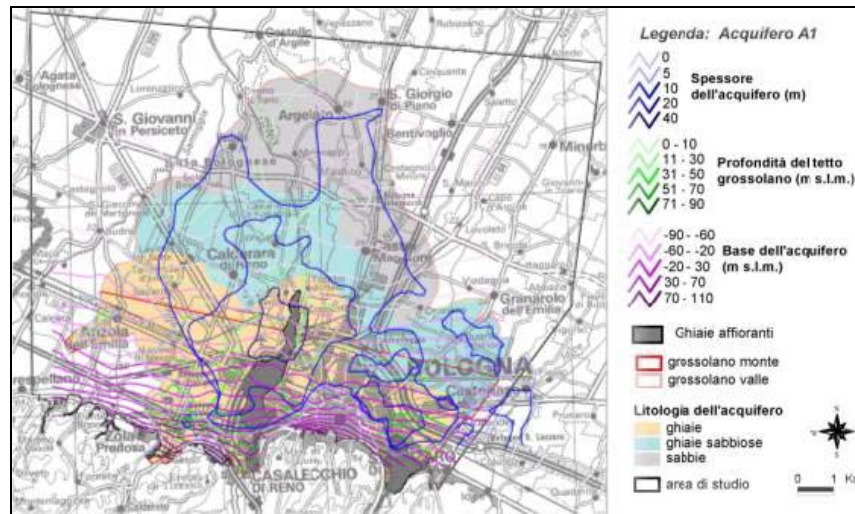


Fig. 11 : Esempio di rappresentazione cartografica dei depositi grossolani nell'acquifero più superficiale della conoide del Fiume Reno

2) La definizione dello schema concettuale di flusso idrico e la sua modellazione matematica (fig.12);

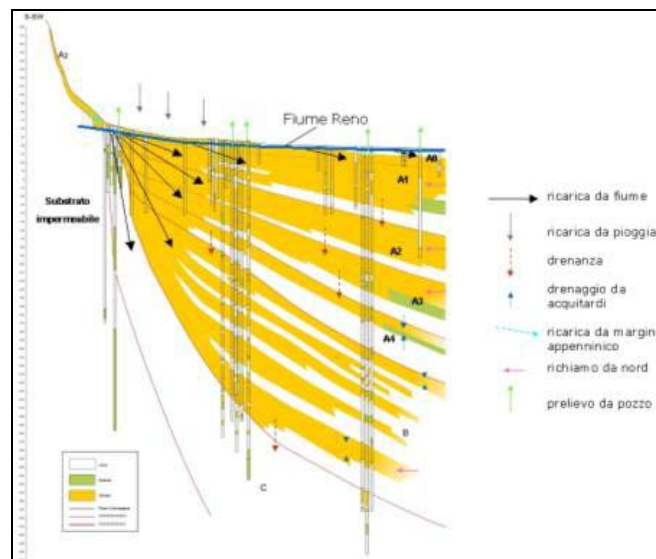


Fig.12 Rappresentazione della direzione di flusso delle acque di falda nella conoide del Fiume Reno.

3) La realizzazione di un modello matematico della subsidenza collegato a quello del flusso;

4) La messa in opera di apposita strumentazione (assestimetri) per il monitoraggio della subsidenza (fig.13).

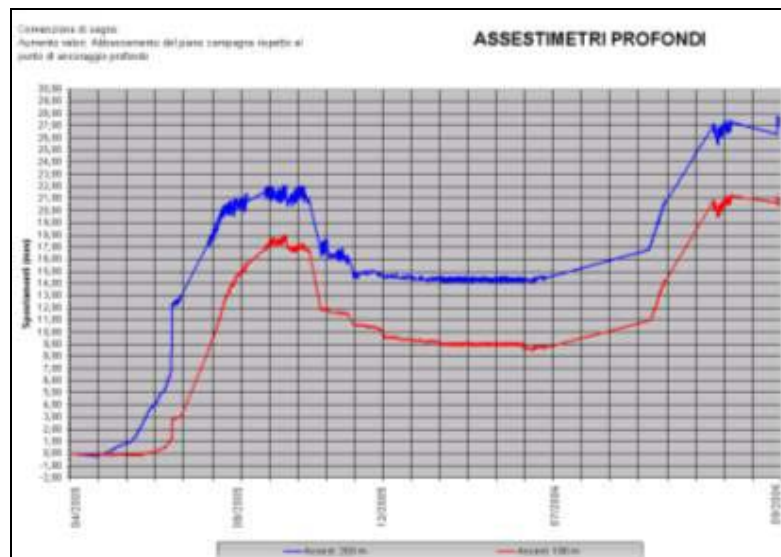


Fig. 13: Diagrammi degli abbassamenti del terreno nel tempo nei due assestimetri alla profondità di 100 m (linea rossa), e 200 m (linea blu) installati a Castelmaggiore (Bo). Nel periodo tra il settembre 2005 ed il settembre 2006 l'abbassamento è stato di 4 millimetri per l'assestometro a 100 metri e di 6 millimetri per quello a 200 metri.

#### Studio della subsidenza antropica generata dall'estrazione di acqua di falda lungo la costiera emiliano romagnola

Il progetto ha realizzato i seguenti prodotti:

1. L'analisi dei dati piezometrici
2. L'analisi dei dati relativi alla subsidenza
3. Il modello geologico di sottosuolo: caratteri interni e geometrie di acquiferi e acquitardi
4. La ricostruzione dei consumi e dei prelievi da falda
5. I modelli tridimensionali di falda e subsidenza

Tra i risultati più interessanti del progetto si segnala (Fig. 14) la buona corrispondenza fra il modello matematico e i dati osservati che consente di affermare che nella pianura costiera ravennate una gran parte della subsidenza degli ultimi decenni è effettivamente attribuibile ai prelievi idrici. Pertanto, prevedendo una riduzione dei prelievi per il prossimo decennio si può calcolare una significativa diminuzione del fenomeno subsidenza. Viene però evidenziato che questa buona corrispondenza modellistica non è valida nella fascia direttamente affacciata al mare (per es. l'area critica di Cesenatico) per la quale bisogna individuare altri fattori

responsabili del fenomeno per spiegare i valori di subsidenza effettivamente misurati.<sup>12</sup>

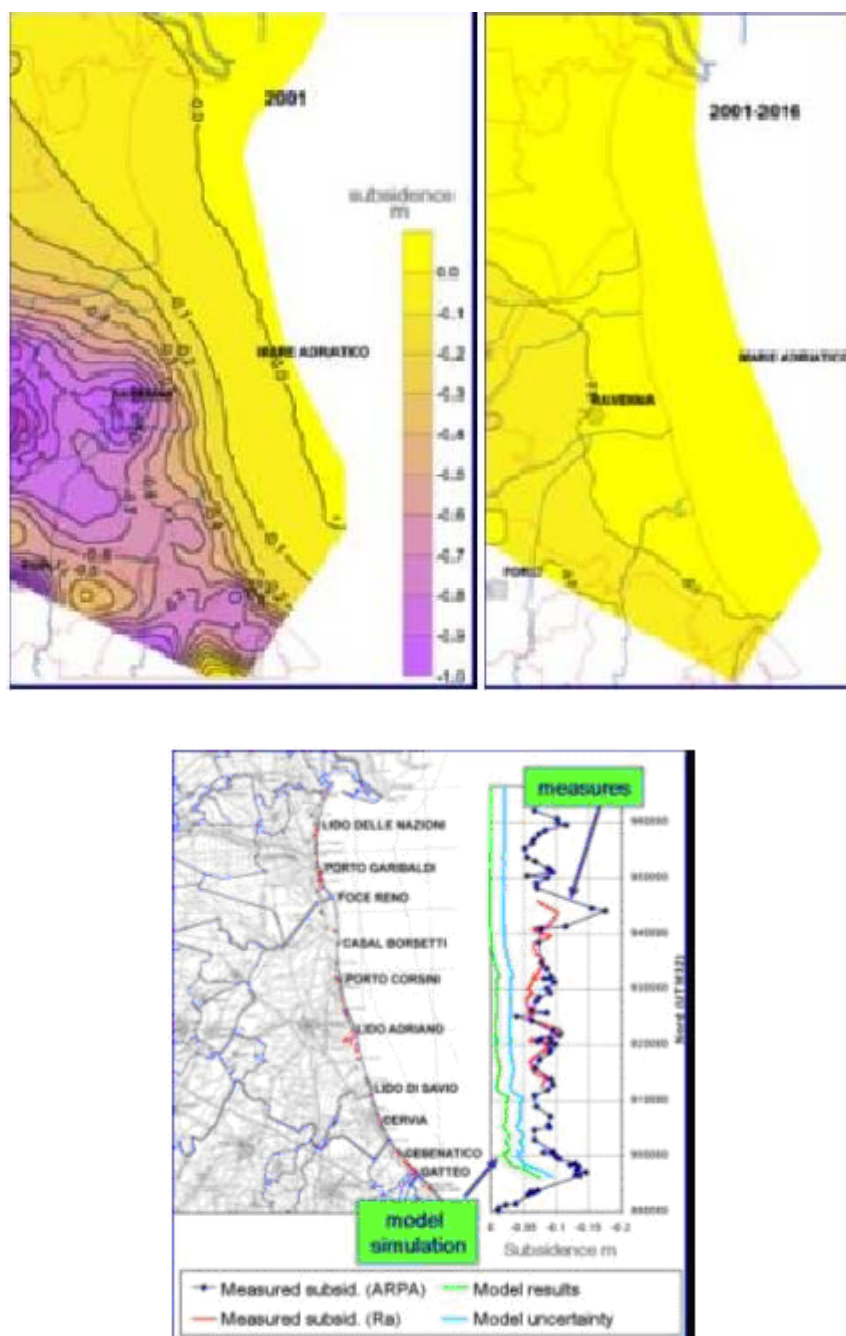


Fig. 14 :Il modello matematico per lo studio della subsidenza consente di ricostruire l'andamento del fenomeno nel passato (carta di sinistra, periodo 1946-2001), consente di fare delle previsioni di subsidenza per gli anni futuri (carta al centro, periodo 2001-2016) e di individuare le aree problematiche in cui vi è scostamento fra i dati previsti da modello e quelli misurati sperimentalmente (carta e diagramma a destra). Tratto da ARPA (2003).

<sup>12</sup> Arpa Regione Emilia Romagna

Progetto Sperimentale Angela -Angelina “pressure maintenance”:  
ripressurizzazione dei livelli produttivi del campo metanifero  
Angela-Angelina situato a sud di Ravenna

Il Progetto rientra nell’ambito di un protocollo di Intesa tra Eni S.p.A., Divisione Exploration & Production, Regione Emilia-Romagna, Provincia di Ravenna, Comune di Ravenna.

Obiettivo generale del progetto, che costituisce una delle azioni pilota del programma Gestione Integrata della Zona Costiera (GIZC), è il controllo e il mantenimento della pressione degli acquiferi dei livelli produttivi attraverso la reiniezione di acqua nei giacimenti profondi, al fine di contrastare il fenomeno della subsidenza. L’acqua utilizzata per la reiniezione proviene dal sistema di captazione delle acque marine BMS (beach management system) che è stato installato sul litorale prospiciente il campo Angelina con l’ulteriore scopo di sperimentare una tecnica innovativa di stabilizzazione e recupero della spiaggia (Fig.15).

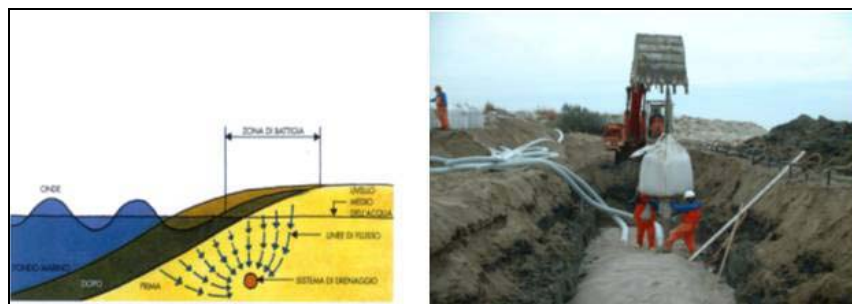


Fig. 15: Il sistema sperimentale di ripressurizzazione nei giacimenti metaniferi di sottosuolo prevede il prelievo di acqua marina tramite un sistema di drenaggio della falda di spiaggia (il Beach Management System - BMS), con l'ulteriore obiettivo di stabilizzare e recuperare i litorali in erosione. Un grosso condotto sotterraneo consente il pompaggio e il trasferimento delle acque prelevate verso i giacimenti da ripressurizzare.

Il progetto è articolato in due fasi:

1. La fase sperimentale finalizzata alla messa a punto della metodologia e alla validazione dei risultati dei modelli; rappresenta la prima esperienza di questo tipo a livello Nazionale ed Europeo.

Nel primo periodo, in cui l'impianto BMS non era ancora operativo, sono state reiniettate solo le acque di strato che sono state anche oggetto di un apposita valutazione di tossicità. Una volta a regime, verso la fine del 2005, la quantità d'acqua reiniettata giornalmente era complessivamente di 300 m<sup>3</sup> al giorno, un'entità evidentemente ancora troppo esigua per fornire dei risultati certi sull'efficacia del sistema. Il monitoraggio delle pressioni registrate in corrispondenza dei livelli stratigrafici oggetto della reiniezione hanno comunque evidenziato un lieve (fino a 40 kg/cm<sup>2</sup>) ma incoraggiante incremento. La fase sperimentale è stata completamente monitorata. Oltre al controllo periodico sulle pressioni nei livelli oggetti di iniezione, si sono effettuate misure costanti con assestimetri installati da ENI nell'area di intervento e controlli sulle stazioni DGPS per rilevare anche le minime variazioni di quota. Sono state condotte inoltre ripetute campagne topografiche e morfodinamiche per la valutazione dell'efficienza dell'impianto di drenaggio sulla spiaggia.

2. L'applicazione alla scala di campo. I principali obiettivi di questa fase di progetto sono la realizzazione di un impianto di iniezione in un pozzo esistente, che raggiunga una capacità di 2500 m<sup>3</sup> al giorno (quindi 60 volte superiore a quella attuale). Ad esso deve essere abbinato l'incremento della capacità di captazione dell'acqua di mare attraverso la realizzazione di un nuovo impianto di drenaggio BMS. Le attività di progettazione sono iniziate nel corso del 2006, mentre l'avvio della reiniezione è previsto per la fine del 2007.

#### 4 ANALISI DEI RISULTATI

Il lavoro svolto ha permesso, ad oggi, di raccogliere informazioni su 746 casi interessati da subsidenza.

La figura seguente, che sinteticamente riporta la distribuzione spaziale del fenomeno secondo il Comune di appartenenza, mostra la rilevanza che il rischio subsidenza presenta in Italia: 746 Comuni costretti a convivere con questo rischio.

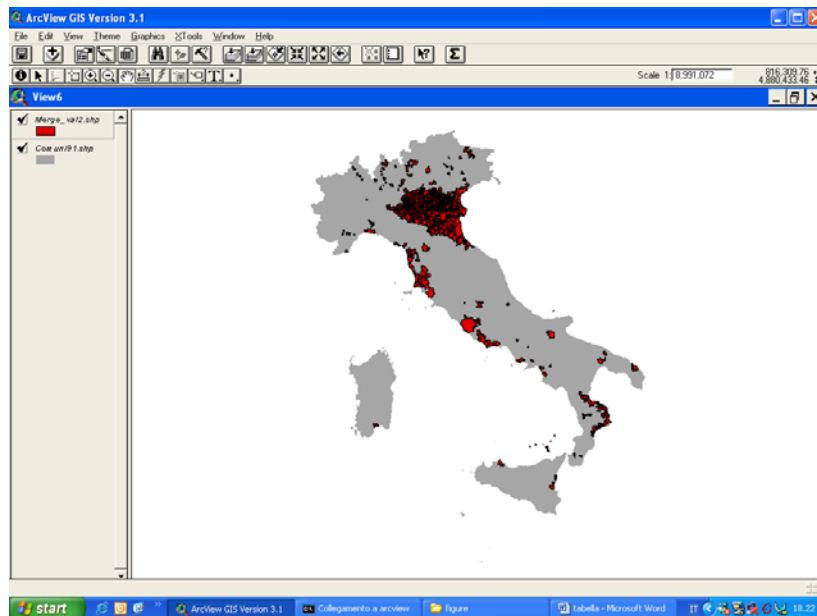


Fig. 16: Comuni Subsidenti in Italia

Si tratta per la maggior parte di Comuni situati nelle regioni del Nord, con particolare addensamento nell'area del delta padano. In particolare, il Veneto, con 244 Comuni a rischio subsidenza (pari al 32,70 % del totale) e l'Emilia Romagna, con 180 Comuni (24,12 %), sono le regioni più esposte; seguite dalla Lombardia con 177 Comuni a rischio (23,72 %) nell'area compresa tra la riva settentrionale del Po e i margini meridionali dei laghi.

Nell'Italia centrale i Comuni a rischio si trovano nelle pianure costiere dell'alta Toscana (35 comuni) e del Lazio meridionale (15 Comuni), mentre al sud le regioni più esposte sono la Campania (9 Comuni) e la Calabria ionica (39 Comuni).

| <b>Regione</b>        | <b>Tot.Comuni</b> | <b>Comuni interessati da Subsidenza</b> |
|-----------------------|-------------------|---|
| Abruzzo               | 305               | 1                                       |
| Basilicata            | 131               | 0                                       |
| Calabria              | 409               | 39                                      |
| Campania              | 551               | 9                                       |
| <b>Emilia Romagna</b> | <b>341</b>        | <b>180</b>                              |
| Friuli Venezia Giulia | 219               | 5                                       |
| Lazio                 | 378               | 15                                      |
| Liguria               | 235               | 9                                       |
| <b>Lombardia</b>      | <b>1546</b>       | <b>177</b>                              |
| Marche                | 246               | 0                                       |
| Molise                | 136               | 0                                       |
| Piemonte              | 1206              | 17                                      |
| Puglia                | 258               | 6                                       |
| Sardegna              | 377               | 1                                       |
| Sicilia               | 390               | 5                                       |
| Toscana               | 287               | 35                                      |
| Trentino Alto Adige   | 339               | 3                                       |
| Umbria                | 92                | 0                                       |
| Valle d'Aosta         | 74                | 0                                       |
| <b>Veneto</b>         | <b>581</b>        | <b>244</b>                              |
| <b>ITALIA</b>         | <b>8101</b>       | <b>746</b>                              |

Vaste aree delle piane costiere italiane risultano soggette a fenomeni di subsidenza. In particolare, le coste principalmente interessate dal fenomeno di subsidenza sono la costa della Calabria ionica, della Toscana e dell'Emilia Romagna.

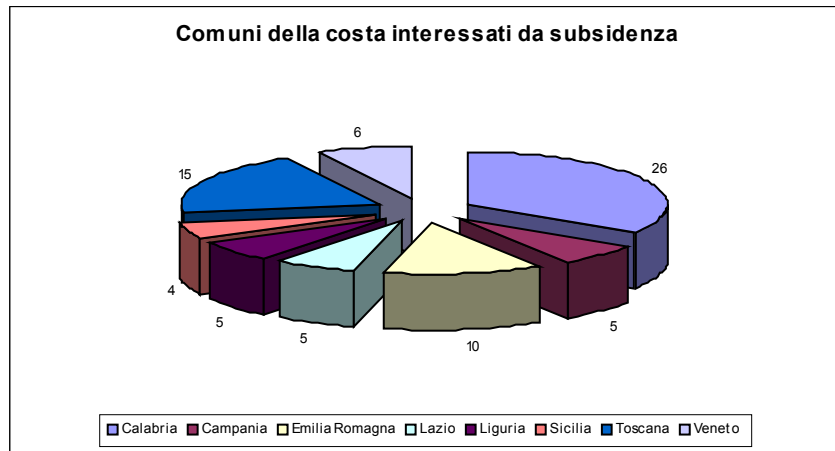
A seconda dei luoghi questa assume proporzioni notevoli: per la fascia costiera emiliano-romagnola si registrano tassi compresi tra 10 e 30 mm/anno e per alcune aree della pianura pisano-versilese si osservano tassi di 20mm/anno.

Tale subsidenza è ragionevolmente da attribuire alla sovrapposizione di processi indotti dall'uomo a fenomeni di tipo naturale. E' questo il caso della costa emiliano-romagnola ove il preoccupante fenomeno di subsidenza è da attribuire principalmente all'estrazione di fluidi dal sottosuolo.

Per la costa calabrese, il cui fenomeno di subsidenza si è innescato negli ultimi 10 anni, le cause sono attribuibili principalmente ad estrazione di gas, con misure di abbassamento che variano da 9 a 14 mm/anno.



La subsidenza lungo le coste è così distribuita :



Le prime misure di subsidenza, risalenti al 1897 e basate essenzialmente su misure di livellazione geometrica, danno indicazione fino agli anni '50 di una subsidenza attribuibile principalmente a cause naturali legate a fenomeni geologici a scala locale e/o regionale. In seguito si ha un cambio di tendenza, cioè i fenomeni di natura antropica si innescano o si aggiungono ai precedenti: trend che sembra stia subendo nuovamente un'inversione.

Negli ultimi decenni, le aree di Ravenna (e Comuni limitrofi), Modena e Bologna sono state colpite da fenomeni di subsidenza antropica, dovuta principalmente a pompaggio di acque e in subordine a estrazioni di metano che risultava essere molto più veloce rispetto a quelle dovute a cause naturali attribuibili all'assestamento di terreni Plio-Pleistocenici.

In particolare per l'area di Ravenna a, partire dagli anni '60, il progressivo aumento dell'area di subsidenza ha colpito la zona urbana e costiera, a pochi chilometri dal centro storico, con picchi di alto rischio. La progressiva diminuzione dell'uso di acque sotterranee negli ultimi anni ha riportato la subsidenza a valori prossimi a quelli naturali, pur permanendo le conseguenze negative. Per evidenziare questa differenza tra il primo e il secondo periodo di misura della subsidenza, le misure nel database sono state



riportate separatamente, evidenziando quei casi in cui si hanno più informazioni temporali.

Comunque per i casi in cui si sono evidenziate più misure non si sono verificate delle variazioni sensibili della subsidenza indipendentemente dalle metodologie di misura adottate.

Come precedentemente detto dall'analisi risulta che le cause più frequenti sono da attribuire a cause naturali (566 casi), e al prelievo da acquifero (34 casi).

I casi più recenti di subsidenza si sono verificati nell'area Calabrese nel periodo 1993-98, tra il 1999-2002 nell'area di Parma, Bologna, Ferrara, Modena e Reggio Emilia mentre nell'area della costa emiliana i casi più recenti risalgono al 2005.. La maggior parte di questi eventi sono principalmente attribuibili a cause di natura antropiche.

Nella figura seguente si può vedere la dislocazione delle cause della subsidenza in Italia.

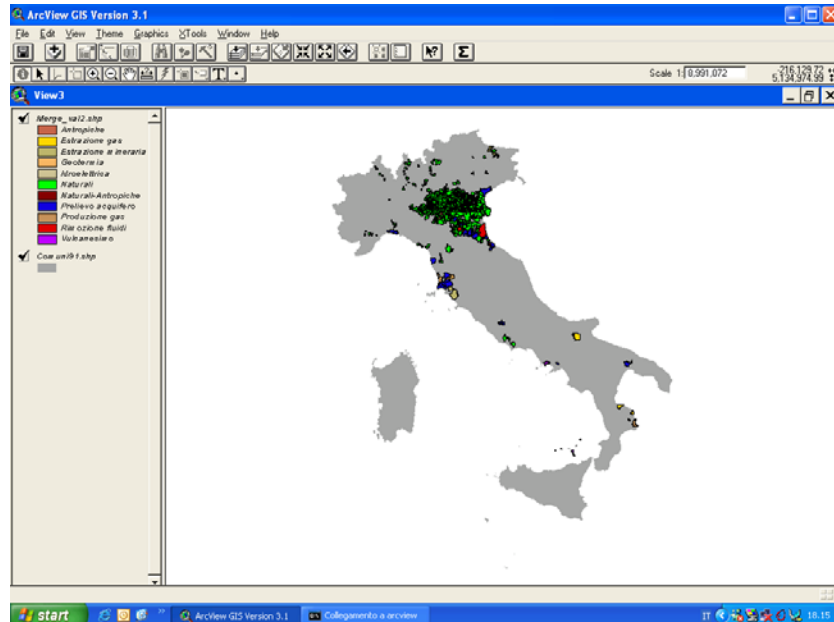


Fig. 17: Cause della Subsidenza in Italia

Per quanto attiene alle velocità di abbassamento registrate queste oscillano tra i 2,5 mm/anno nei pressi dell'area di Padova a 38

mm/anno nell'area di Bologna. Di seguito viene inserita un'immagine che evidenzia gli abbassamenti medi della regione Emilia Romagna; è stata scelta questa regione perché per tale area si ha un numero elevato di misure d'abbassamento, rispetto al totale dei comuni della regione interessati da subsidenza.

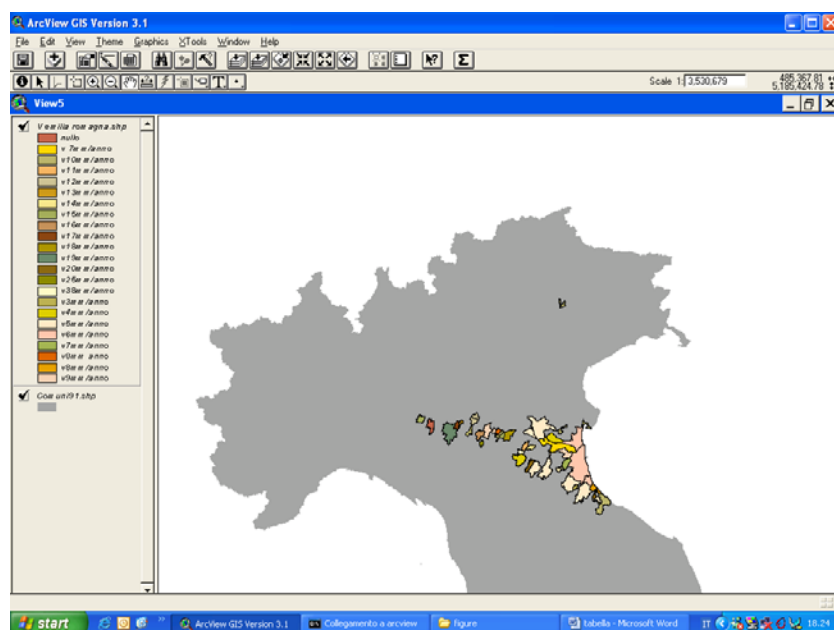


Fig. 18: Abbassamenti medi della Regione Emilia Romagna

Il massimo abbassamento del suolo, pari appunto a 38 mm/anno è stato misurato con metodologia Gps nel periodo 1997-2002 in località Castel Maggiore (BO). Le cause che vengono indicate come innescanti sono antropiche.

Castel Maggiore è uno dei capisaldi (475 totale) della rete di livellazione della provincia di Bologna istituita nel 1970. Nel periodo tra il 1970-1983 sono state eseguite misure di livellazione, che mostravano un abbassamento massimo con velocità di 15-16cm/anno, la causa di tale fenomeno è stata attribuita principalmente all'emungimento d'acqua. (Arpa Regione Emilia Romagna rilievo 2002)

.La dislocazione di tale area farebbe pensare ad una subsidenza naturale iniziale, essendo questa la causa innescante per l'intero

comprensorio della provincia di Bologna .(Bollettino di geodesia e scienze affini 1985)

Il più piccolo abbassamento 2,5 mm/anno (Bollettino di geodesia e scienze affini 1985) si ha nel comune di Piacenza d'Adige (Padova), misurato con la tecnica della livellazione nel periodo tra il 1897-1957 è attribuibile a causa naturali. Anche qui come in molti altri casi non è specificata la causa naturale innescante, ma essendo la misura riferita al periodo 1897-1957 è possibile attribuirlo alla subsidenza geologica.

Per quel che riguarda l'area Veneziana lo sfruttamento intensivo del sistema multifalde, effettuato principalmente per scopi industriali, ha provocato abbassamenti del suolo, che incrementati alle cause naturali (subsidenza geologica) innescanti il fenomeno, ha portato a valori di 17 mm/anno a Marghera e 14 mm/anno a Venezia nel 1969.

Da studi effettuati sono state ottenute stime della subsidenza naturale, la quale risulta essersi svolta in modo differenziale nello spazio e nel tempo in relazione ai diversi eventi tettonici e deposizionali succedutesi sul territorio. A seguito della chiusura dei pozzi artesiani i livelli idraulici sono risaliti ed è stato misurato un recupero altimetrico dell'ordine del 15-20% della deformazione totale. Tale recupero rappresenta la risposta elastica dei sedimenti fini ripressurizzati.<sup>13</sup> Quindi il fenomeno della subsidenza da attribuirsi all'aspetto antropico può considerarsi concluso.

I successivi monitoraggi condotti fino alla data odierna, sia attraverso i rilievi tradizionali (livellazioni, GPS) che di più recente attuazione (InSAR), hanno confermato che in generale la situazione altimetrica del territorio, salvo particolari condizioni localizzate (sfruttamenti minori, zone torbose, ecc.) non è preoccupante e si può concludere dicendo che se non interverranno nuovi eventi destabilizzanti, non si dovrebbero più rivivere le preoccupazioni del passato.

---

<sup>13</sup> Carbognin , 2003

In molti casi non è stato possibile inserire nel database le metodologie adottate per la misura delle subsidenze, riporto quindi alcune considerazioni limitandole ai casi riscontrati.

Dall'analisi dei risultati emerge che a livello Nazionale la livellazione topografica è ancora oggi il metodo maggiormente utilizzato per misurare i fenomeni di subsidenza, seguito dalla metodologia GPS. Si ha infatti che per 124 comuni le misure di subsidenza sono effettuate con la livellazione, tale dato può essere attribuito al fatto che tali misure sono relative agli anni 50 e quindi tale metodologia rappresentava il mezzo d'indagine più efficace per il rilievo dei movimenti verticali del suolo e fornisce delle buone serie storiche. Naturalmente, oggi tale metodo è integrato dalle più moderne tecniche di monitoraggio, come osservabile per la regione Emilia Romagna a partire dagli anni '90 per il GPS e 2005 per l'interferometria (InSAR).

## BIBLIOGRAFIA

Amici A., Costantini M., Malvarosa F., Minati F., Pietranera L., Monitoraggio delle degli spostamenti del terreno mediante interferometria differenziale SAR e relative applicazioni, Telespazio S.p.A, Roma.

APAT, 2004, Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkholes e ruolo delle amministrazioni statali e locali nel governo del territorio, 1° Seminario, 2004, Roma.

Arca S., Beretta G.P. Bollettino, 1985, Bollettino di Geodesia e Scienze affini.

Baldi P., Cenni N., Loddo F., Martinelli G., Moro M., Pesci A., Saroli M., Stramondo S., Approccio multi-disciplinare al problema della subsidenza nella Regione Emilia Romagna.

Berrino G., Borgstrom S. E. P., Capuano P., Cecere G., D'Alessandro A., De Martino P., Del Gaudio C., d'Errico V., La Rocca A., Malaspina S., Obrizzo F., Pingue F., Pinto S., Ricciardi G. P., Ricco C., Russo A., Sepe V., Serio C., Siniscalchi V., Tammaro U., Aquino I. 2006 Sorveglianza geodetica nell'area vulcanica napoletana, pp.35 - 42.

Bitelli G., Bonsignore F. & Vittuari L., 2005, Il monitoraggio della subsidenza in Emilia-Romagna. Aquifer Vulnerability and Risk, 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater, Reggio di Colorno PR, 21-23 Settembre 2005, pp. 1-11.

Borgia G. C., Brighenti G., Messini E., Subsidenza della Pianura Padano-Veneta da Produzione di fluidi dal sottosuolo: parte 2, casa editrice Histories.

Canuti P., Casagli N., Farina P., Ferretti A., Marks F., Menduini G., 2006, Analisi dei fenomeni di subsidenza del fiume Arno mediante interferometria radar, Giornale di Geologia Applicata 4 (2006), pp. 131-136, doi:10.1474/GGA.2006-04.0-17.0145.

Carbognin L., 2003, Cenni sulla geologia della Laguna di Venezia e sul processo di subsidenza, CNR ISMAR (ex ISDGM) Venezia.

Carbognin L., Gambolati G., Johnson A.I., 2000, Proceedings of the sixth international symposium on land Land subsidence Ravenna/Italia/24-29 september 2000, Land Subsidence vol.1, vol.2.

Cascini L., Ferlisi S., Fornaro G., Lannari R., 2005, Impiego delle tecniche satellitari per lo studio di aree in subsidenza.

CNR.1987, Atlante delle spiagge Italiane.

Crespi M., 2003, Dispense topografia corso di laurea ingegneria per l'ambiente e il territorio.

Cucci L., Tertulliani A., 2006, I Terrazzi marini nell'area di Capo Vaticano (Arco Calabro): solo un record di sollevamento regionale o anche di deformazione cosismica?, Italian Journal of Quaternary Sciences 19(1).

Fossati D., Laffi R., Ferretti A., Prati C., Tecnologie innovative di telerilevamento satellitare per la gestione del territorio.

Fulvio M., Nisi M., Gabellino & Silenzi S., Mare e cambiamenti globali- ICRAM, La valutazione del rischio da ingressione marina nelle aree di piana costiera, pp.199-206, Roma.

Galluzzo F., La cartografia Geologica delle grandi aree urbane Italiane, APAT - Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, Servizio CARG, Rilevamento Geologico e Analisi di Laboratorio.

Risotti G., Benedini M., 2000, Il dissesto idrogeologico, Carocci Editore, pp. 361-377.

Marchesini C., Zambon G., Zanferrari A., 2006, Misure di subsidenza in area urbana: il caso di Prato Carnico (UD), GNGTS – Atti del 21° Convegno Nazionale / 07.06.

Meisina C., Zucca F., Conconi F., Verri F., Fossati D., Cerini M., Allievi J., 2005, Interpretazione geologica e geotecnica dei risultati del monitoraggio SAR (tecnica PS) in Oltrepo Pavese, Giornale di Geologia Applicata 2 (2005) 227–236, doi: 10.1474/GGA.2005–02.0–32.0058.

Piano strutturale d'area della Val di Cornia, 2005, Comuni di Campiglia M.ma Piombino Superato, L.R.T.n°1 del 16.01.2005.

Pingue F., De Martino P., Serio C., Tammaro U. 2006, Stima del campo di spostamento ai Campi Flegrei da dati CGPS e di livellazione di precisione nel periodo maggio 2004- marzo 2006, Osservatorio Vesuviano.

Regione Emilia-Romagna, Autorità di bacino del Reno & ARPA, 2005, Studio della conoide alluvionale del fiume Reno per la realizzazione di un modello idrogeologico per la gestione sostenibile delle risorse idriche. Relazione finale, Assessorato Ambiente e Sviluppo Sostenibile, pp 126, Regione Emilia-Romagna.

Sbrilli L., Fenomeni diffusi di Sinkholes nella pianura del fiume Cornia.

Todaro Rudj M.,Progetto rete geodetica VenezianaGPS 2000.

Tuttoscienze, Il Caso Italiano: Bologna si abbassa di 4 centimetri all'anno, La stampa.

Siti internet

[www.Arpa.emr.it/ingamb/subs2001.htm](http://www.Arpa.emr.it/ingamb/subs2001.htm), 5 Dicembre 2006

[www.arpat.it](http://www.arpat.it) , 21Aprile 2007

[www. Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna.htm](http://www.Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna.htm)\subsidenza 5aprile\ARPA - Ingegneria Ambientale, 5 Aprile 2007

[www.greensite.it](http://www.greensite.it)

[www.pontedinona.it](http://www.pontedinona.it)

[www.provincia.Bologna.it/ptcp/conf\\_pian/allegati\\_tematici](http://www.provincia.Bologna.it/ptcp/conf_pian/allegati_tematici), 10 Dicembre 2006

[www.Regione Emilia Romagna.htm](http://www.Regione Emilia Romagna.htm)/ Servizio Geologico Sismico e dei Suoli/ Lo studio della subsidenza, 12 Febbraio 2007

[www.Regione Emilia Romagna.htm](http://www.Regione Emilia Romagna.htm)/ Servizio Geologico Sismico e dei Suoli/ I progetti, 12 Febbraio 2007

[www.tremi.planetk.it](http://www.tremi.planetk.it)