

# Un occhio dall'alto con l'interferometria satellitare per monitorare operativamente fenomeni di subsidenza

di Derrold W. Holcomb

**Negli ultimi anni, una maggiore coscienza dell'impatto dell'uomo sull'ambiente ha portato le organizzazioni pubbliche e private a misurare i cambiamenti ed agire per proteggere il nostro pianeta dagli effetti avversi dell'attività umana. Uno dei molti cambiamenti per il quale le organizzazioni pubbliche hanno un particolare interesse è il monitoraggio dei fenomeni di subsidenza o abbassamento della superficie del terreno.**

I fenomeni di subsidenza possono verificarsi a causa di variazioni del sottosuolo potenzialmente causati dall'uomo. La loro osservazione stretta è cruciale in una varietà di scenari, visto che anche variazioni del sottosuolo apparentemente piccole possono avere massive - e costose - conseguenze su ciò che si trova sopra il sottosuolo.

Tutte le industrie che estraggono risorse dal sottosuolo come petrolio, gas (Maruya, 2009), acqua (Thompson, 2011) e minerali, eseguono il monitoraggio di subsidenza, assumendo il sollevamento e lo spostamento della superficie del terreno come un indicatore dei cambiamenti sottosuolo. Nell'estrazione di petrolio e gas i fenomeni di subsidenza possono presentarsi nelle zone di produzione di idrocarburi che sono soggette a collassarsi per esaurimento delle riserve.

Quando le riserve acquifere sotterranee sono utilizzate come fonte per le forniture idriche comunali, la falda acquifera può collassare se l'acqua viene estratta da una falda più velocemente di quanto le precipitazioni atmosferiche possano ricaricarla. Dopo il collasso, l'approvvigionamento può diventare impossibile, causando la perdita permanente di una risorsa critica.

La subsidenza nelle aree urbane può essere causata dal carico degli insediamenti (ad esempio per un assestamento irregolare del suolo sotto una struttura), che possono causare costosi danni alle infrastrutture vitali come le tubazioni degli acquedotti e le fognature, oppure le condotte elettriche, e vie di trasporto. Le aziende coinvolte nella realizzazione di tunnel attraverso le montagne per costruire infrastrutture di trasporto regionali devono monitorare gli effetti delle loro azioni. Per queste e molte altre applicazioni, una mappatura regionale di deformazione superficiale fornisce preziose informazioni.

## Acquisizione dei dati di subsidenza

Anche se tali informazioni possono prevenire danni costosi, può anche essere costosa la loro acquisizione. Una sfida in tal senso può essere particolarmente impegnativa poiché le attuali condizioni economiche costringono le organizzazioni a ottenere di più con risorse finanziarie limitate. Attualmente, il monitoraggio della subsidenza è condotta

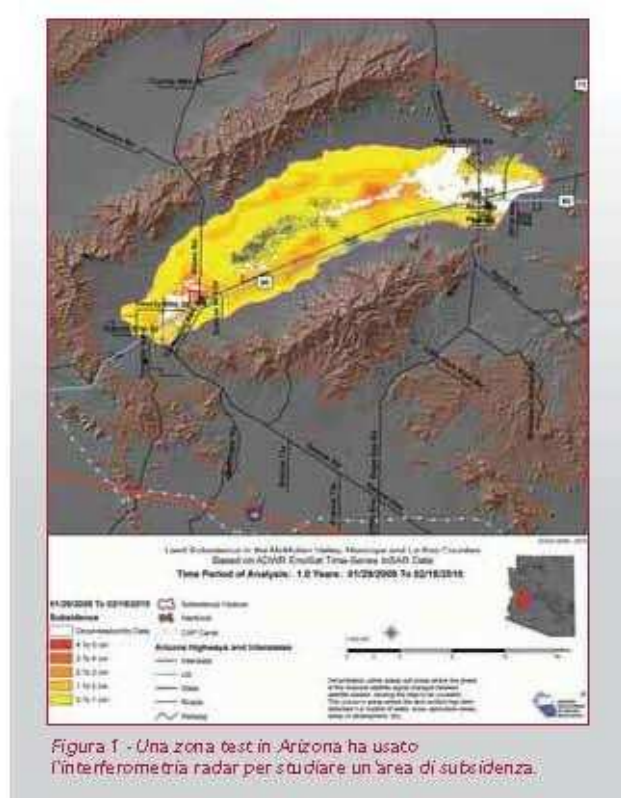


Figura 1 - Una zona test in Arizona ha usato l'interferometria radar per studiare un'area di subsidenza.

per mezzo di indagini ripetute con livellazioni topografiche convenzionali o GPS. Altre tecniche utilizzano registratori di compattazione permanenti o estensimetri verticali. Tutti questi approcci sono limitanti, perché producono dati puntuali, che sono costosi e possono essere non rappresentativi e fuorianti.

Il Telerilevamento satellitare, utilizzando la tecnologia radar interferometrica, sta offrendo un'opzione attraente per il monitoraggio della subsidenza. Prima di tutto richiede un minimo lavoro costoso sul campo, se mai sia necessario. Ma il più grande vantaggio è che invece di pochi punti sparsi, si ottiene un risultato con una matrice densa (ad esempio,



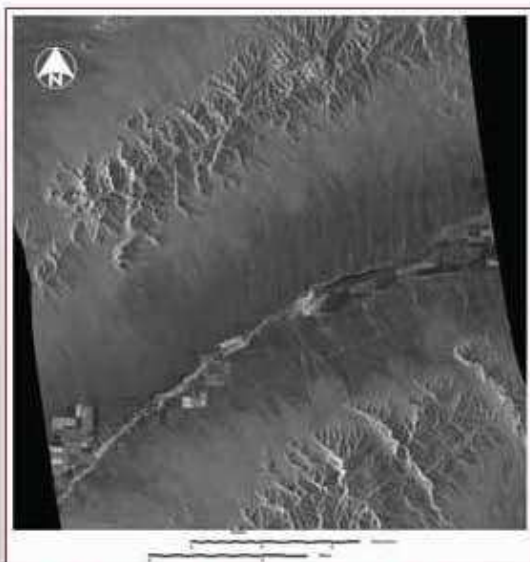


Figura 2 - Un'immagine radar della McMullen Valley mostra un sottinsieme di dati geocodificati TerraSAR-X. Si notino le aree rettangolari coltivate lungo il fiume che attraversa il centro.

ogni pochi metri) di pixel geocodificati di variazioni di quota che producono una mappa dettagliata dello spostamento della superficie.

Per dimostrare il potenziale di questa tecnica per il monitoraggio operativo della subsidenza, uno studio è stato condotto usando una regione in Arizona che giace sopra una falda nota per i suoi fenomeni di subsidenza (vedi Figura 1). Questa zona è stata studiata e mappata per un certo numero di anni dal Dipartimento delle Risorse Idriche dell'Arizona, quindi è area di test accuratamente misurata. Inoltre, il clima arido dell'Arizona offre un terreno asciutto e vegetazione minimale, situazione vantaggiosa per l'interferometria radar. La presenza della vegetazione può produrre fenomeni di de-correlazione indotti dalla vegetazione stessa, che possono compromettere o proibire analisi precise.

### La tecnologia DInSAR

Per questo studio sono state derivate dettagliate mappe di spostamento utilizzando una tecnica chiamata interferometria differenziale radar (DInSAR). In termini semplici, il satellite radar raccoglie un'immagine dell'area di studio nel corso di due differenti passaggi. L'informazione di fase del segnale radar viene elaborata da queste due immagini, per ogni pixel, per estrarre una differenza di fase chiamata interferogramma.

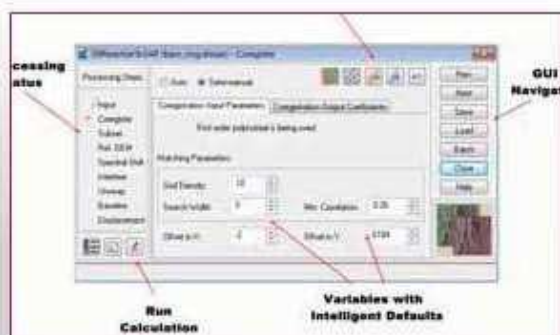


Figura 3 - Nel Workflow Wizard ERDAS IMAGINE DInSAR, la maggior parte dei parametri e delle variabili sono intelligenti e propongono una scena specifica per ottenere risultati ottimali.

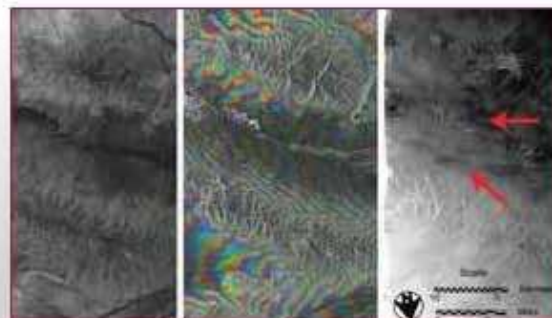


Figura 4 - Un'immagine di coerenza interscena (a sinistra); lo spostamento interferogramma (al centro) e la corrispondente immagine (a destra) possono essere creati da dati satellitari. Le frecce rosse indicano le caratteristiche di subsidenza di elevata affidabilità. Queste immagini vengono da prodotti derivati da una coppia InSAR di TerraSAR-X con sei mesi di separazione.

A seconda di vari fattori, come il rumore del sistema o le variazioni atmosferiche, questa differenza può essere apprezzata fino ad una precisione inferiore alla lunghezza d'onda, anche un quarto di lunghezza d'onda.

Così, un sensore in banda-X operante a tre centimetri, potrebbe, in condizioni ottimali, mappare uno spostamento di circa 0,75 centimetri. Una sezione di tale interferogramma si vede in Figura 4.

I dati satellitari utilizzati in questo progetto pilota provengono dal sensore tedesco TerraSAR-X forniti da Infoterra. Come suggerisce il nome, il radar ad apertura sintetica utilizza radiazioni in banda X. Questo satellite è in grado di fornire immagini a varie risoluzioni (dimensioni dei pixel), a seconda dell'applicazione prevista e l'area di copertura desiderata.

Per questo progetto sono state analizzate 20 scene in modalità strip-map a risoluzione di circa due metri/pixel. Le scene hanno coperto un'area di dimensioni di 32 per 56 chilometri (20 per 35 miglia). Una delle immagini radar è illustrata nella figura 2. Sistemi di posizionamento a bordo del satellite con post-processing forniscono informazioni sulla posizione con una precisione inferiore a 0,5 metri nello spazio, che è abbastanza per effettuare misure precise di deformazione della superficie geolocalizzate.

Il software necessario per questi calcoli precisi è complesso, sofisticato ed era disponibile in gran parte nel mondo universitario e dei centri di ricerca specializzati. Tuttavia, il software utilizzato per questo progetto, il modulo di interferometria radar IMAGINE Radar Mapping Suite, è stato sviluppato specificamente per portare questa tecnologia alle organizzazioni che hanno necessità di risultati - mappe

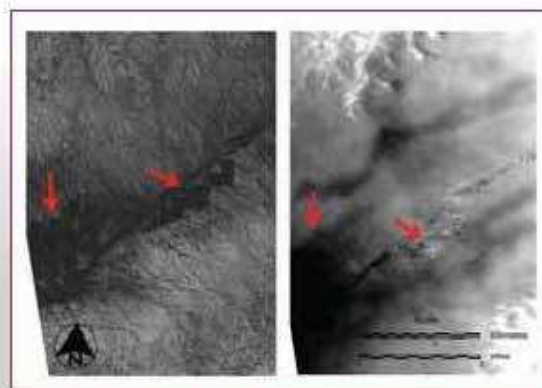


Figura 5 - Un dettaglio sull'immagine mostra la corrispondenza di bassa coerenza (a sinistra) e la misura di spostamento povera (a destra).



di spostamento-, ma non hanno o non vogliono essere costrette ad acquisire competenze specializzate nel processamento di dati radar.

In molti casi, è completamente automatico; basta inserire le due scene e attendere che l'immagine degli spostamenti derivata venga calcolata.

La figura 3 mostra una delle interfacce utente del software con workflow guidato. Le immagini mostrate nelle figure 4 e 5 sono state calcolate dal software usando un processo completamente automatizzato, raggiungendo questi risultati, senza necessità di uno specialista in elaborazioni radar appositamente addestrato.

In aggiunta alla coppia di immagini DInSAR, è richiesto per il calcolo dello spostamento, un modello accurato di elevazione digitale del terreno (DEM). Questo può essere estratto convenientemente utilizzando il processo di estrazione InSAR DEM che analizza l'interferogramma per derivare la quota di ciascun pixel. Per questo studio, molte delle immagini TerraSAR-X sono state utilizzate per creare sovrapposizioni di modelli DEM che poi sono stati mediati.

### Analisi delle Immagini

Le 20 scene TerraSAR-X possono essere combinate in coppie di immagini interferometriche che coprono vari periodi di tempo. Ciascuna coppia di immagini può poi essere elaborata per valutare uno spostamento superficiale attraverso quel periodo di tempo. Ciò consente la possibilità di monitoraggio raccogliendo una sequenza progressiva di immagini che illustrano il movimento della superficie nel tempo. Questa serie temporale di immagini permette di misurare l'effetto di un aumento delle estrazioni o la risposta ad una azione correttiva.

Il processo di calcolo degli spostamenti genera diverse immagini intermedie che gli analisti possono visualizzare, se necessario. Queste potrebbero essere utili per valutare se un particolare processo sta ottenendo i migliori risultati possibili o per determinare se i parametri di elaborazione hanno bisogno di piccoli aggiustamenti.

Una delle immagini intermedie più utili è la "interscena coherence image", una indicazione numerica (di tipo binario 0-1) che ci dà una indicazione di stabilità di misura per ciascun pixel derivato dalle due immagini. Le aree *high-coherence* (più brillanti) sono quelle più affidabili rispetto alle zone più scure. Dove manca la coerenza si ha una precisione minore dell'analisi dello spostamento e il segnale diventa rumoroso. Un'immagine campione di coerenza viene mostrata nella Figura 4, insieme con un'immagine corrispondente agli spostamenti.

Nell'immagine di coerenza (Figura 4, a sinistra), i pixel scuri indicano una significativa perdita di coerenza lungo il fiume che scorre da est ad ovest attraverso il centro della scena. Ci sono anche aree di coerenza molto bassa associata ad aree vegetate lungo il fiume. Queste sono molto scure e rettangolari.

La scena al centro in figura 4 è l'interferogramma corrispondente (a colori) sovrapposta sull'immagine radar. Queste differenze di fase quantificano lo spostamento di superficie tra le due immagini della coppia InSAR. Mostrando questa serie di differenze di fase si crea l'immagine finale della subsidenza, come visto in Figura 4 (a destra). Di particolare interesse sono le due caratteristiche oscure sinuose del centro, che sono aree di subsidenza. Ogni pixel in questa immagine ha un valore che indica subsidenza in millimetri.

La Figura 5 illustra un'analisi più approfondita, consentendo agli analisti di interpretare la mappa di spostamento nel contesto della interscena di coerenza. Ad esempio, il fiume mostra una perdita quasi totale di coerenza, così come

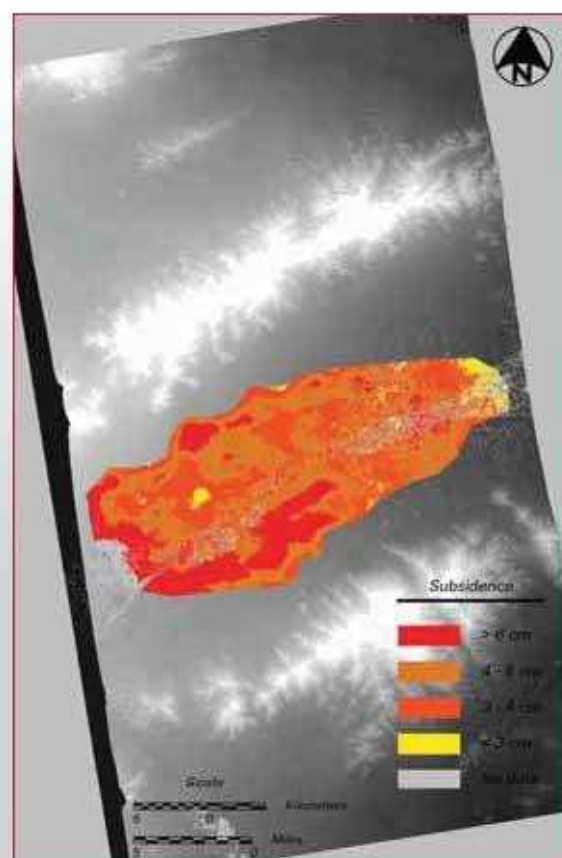


Figura 6 - Un'immagine di mappa della subsidenza codificata a colori è stata sovrapposta a un DEM.

diverse trame dell'agricoltura. Ma notate che alcuni campi agricoli mostrano coerenza molto elevata. Questi possono essere nuda terra in attesa di semina e corrispondono ad aree chiazze nell'immagine di subsidenza, indicando risultati di subsidenza errati.

Al margine sinistro, la combinazione del fiume, i campi a bassa coerenza e il bordo dell'immagine producono un'area molto scura. Questa può essere subsidenza, visto che nei campi si utilizza acqua pompata, ma c'è chiaramente inclusa una componente di errore. C'è una confusione simile sul margine destro della Figura 4. Queste aree devono essere considerate come aventi una confidenza inferiore.

In Figura 6, le informazioni contenute nelle due immagini sono combinate per facilitare l'interpretazione, fornendo una mappa di subsidenza geocodificata mostrata nel contesto di un DEM locale, anch'esso creato da immagini TerraSAR-X InSAR. Nella creazione di questa, i pixel con una coerenza sotto 0,35 sono stati considerati inattendibili e colorati di grigio. Questi indicano la traccia del fiume attraverso il centro della scena, in particolare nelle aree agricole / residenziali ai margini est e ovest dell'immagine. Questa immagine con mappatura mostra buona corrispondenza con l'immagine in Figura 1.

La forma della subsidenza mappata con DInSAR, considerata la sua irregolarità, assume una buona affidabilità, tale da poter essere presa in considerazione. Non c'è possibilità che misurazioni di parecchi punti diversi, presi sul campo, possano dare un quadro della subsidenza in quest'area. Anzi, potrebbe essere possibile avere un risultato che non colga le caratteristiche globali. Questo modello di subsidenza indica anche la struttura del sottosuolo, fornendo ai tecnici uno sguardo ulteriore sulla formazione che stanno analizzando.



Questo studio pilota ha dimostrato i punti di forza del satellite DInSAR per il mapping dei movimenti a scala regionale, in quanto la densa matrice di valori di pixel supera di gran lunga le capacità di mappatura dei movimenti da qualsiasi altra tecnologia. La necessità di verifica sul campo ridotta o praticamente nulla abbassa notevolmente il costo per ottenere tali informazioni. E l'avvento del software ERDAS completamente automatizzato DInSAR porta questa capacità ad una comunità di utenti di grandi dimensioni.

**Riferimenti**

ARIZONA DEPARTMENT OF WATER RESOURCES. JULY 2011. "McMULLEN LAND SUBSIDENCE FEATURE," [AZWATER.GOV/AZDWR/HYDROLOGY/GEOPHYSICS/McMULLENSUBSIDENCE.HTM](http://AZWATER.GOV/AZDWR/HYDROLOGY/GEOPHYSICS/McMULLENSUBSIDENCE.HTM)  
 CROSETTO, M.; CASTILLO, M.; AND ARBOL, R. 2003. "URBAN SUBSIDENCE MONITORING USING RADAR INTERFEROMETRY: ALGORITHMS AND VALIDATION," *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING AND REMOTE SENSING*, VOL. 69, No. 7, PAGES 775-783.  
 MARUYA, M.; YOSHIMOTO, S.; MINAWAKI, M.; YAMAGUCHI S.; KEBLISKIY, E.; KORVIANDY, P.; SERGEY D.; BARANOV, Y.; ANDO, G.; AND KAWA, M. 2009. "MONITORING SURFACE DEFORMATIONS OVER SIBERIAN GAS DEPOSIT AREAS USING ALOS PALSAR INTERFEROMETRY," *PIERS PROCEEDINGS*, MOSCOW, AUG. 18-21, 2009.  
 THOMPSON, T. 2006. "HYDROGEOLOGY AND DISASTER PART 1: GROUNDWATER AND LAND SUBSIDENCE," *WISCONSIN GROUND WATER ASSOCIATION NEWSLETTER*, VOL. 20, No. 3. [WGWA.ORG/ARTICLES/LANDSUBSIDENCEANDGROUNDWATER.PDF](http://WGWA.ORG/ARTICLES/LANDSUBSIDENCEANDGROUNDWATER.PDF).

**Parole chiave**

SAR, INTERFEROMETRIA, SUBSIDENZA.

**Ringraziamenti**

L'autore ringrazia Astrium Services / Infoterra GmbH per la fornitura di 20 scene TerraSAR-X in modalità strip-mappa, utilizzate come dati di input per questo lavoro. Inoltre, ringrazia per la collaborazione il Dipartimento di Geofisica presso il Dipartimento delle risorse idriche Arizona.

**Abstract**

Eyes from Above: Satellite Interferometry Monitors Operational Subsidence  
 In recent years, greater awareness of the intricate bonds among humans and their environment has compelled public and private organizations to survey changes and take action to protect our world from adverse effects of human activity. One of the many changes the public has a vital interest in monitoring is subsidence, or the lowering of the ground surface.

**Autore**

DERROLD W. HOLCOMB  
[DERROLD.HOLCOMB@INTERGRAPH.COM](mailto:DERROLD.HOLCOMB@INTERGRAPH.COM)  
 ESPERTO DI MATERIE RELAZIONATE AL RADAR IN INTERGRAPH  
 ARTICOLO ORIGINARIAMENTE APPARSO SU GEO WORLD, FEBRUARY - 2012  
 CON IL TITOLO ORIGINALE  
 EYES FROM ABOVE: SATELLITE INTERFEROMETRY MONITORS OPERATIONAL SUBSIDENCE  
 ONLINE SU GEOPLACE.COM AL LINK [HTTP://BIT.LY/GDTRCV](http://bit.ly/GDTRCV)  
 TRADUZIONE A CURA DELLA REDAZIONE DI GEO MEDIA

11 34212343  
 44 34234533  
 Gauss-Boaga  
 WGS84  
 UTM 50Q 32N  
 Cassini-Soldner  
 Latitudine  
 Longitudine  
 Effemeridi  
 ELLIPSOIDE  
 6378137  
 635752.314

**MicroSurvey**  
**ALTUS**  
 POSITIONING SYSTEMS

GPS GNSS RTK APS-3  
 Facile, Completo, Preciso

**MicroSurvey**  
**FIELDGenius**