

Primi passi verso la valutazione della vulnerabilità sismica tramite strumenti di telerilevamento

D. Polli¹, F. Dell'Acqua^{2, 3}, P. Gamba^{4, 5} ■

Sommario

Il rischio sismico dipende sia dalla pericolosità sia dalla vulnerabilità degli elementi esposti. È evidente che quest'ultimo parametro presenta un interesse almeno pari a quello della pericolosità sismica, sia per le autorità che devono gestire e mitigare il rischio sismico, sia per gli operatori del settore privato, come le imprese di assicurazione, che a vario titolo necessitano di queste informazioni. Oggi la stima della vulnerabilità degli edifici è svolta con metodi molto accurati ma anche esigenti in termini di dati che è necessario fornire al modello; questa caratteristica limita necessariamente l'indagine a un campione ridotto di edifici, oppure costringe a ricor-

rere a metodi statistici anziché deterministici. Con il presente articolo si vogliono illustrare i primi passi svolti nella direzione della costruzione di un sistema per la valutazione approssimativa della vulnerabilità sismica affidandosi in linea di principio solo a dati telerilevati da satellite o da aereo. L'obiettivo di appoggiarsi solo a dati telerilevati nasce dall'esigenza di svincolare la valutazione dalla disponibilità di dati *in situ*, che sono in genere scarsi se si considera il problema su una scala globale. Questo lavoro di ricerca è svolto nell'ambito del GEOSS (Global Earth Observation System of Systems) ed è perfettamente in linea con i suoi obiettivi, fissati nel piano decennale.

1. Introduzione

Il conto globale dei danni materiali e delle vittime causate da disastri naturali ha registrato un aumento significativo a partire dalla metà del XX secolo. Tra le ragioni, vi è senz'altro l'aumento della popolazione mondiale, la crescente urbanizzazione e la concentrazione delle così dette "megacittà" (Parker and Mitchell, 1995) in aree soggette a rischi naturali (Mitchell, 1995).

I danni causati da terremoto rappresentano certamente una porzione importante del conto annuale dei disastri naturali (Noji, 1997). Le autorità di protezione civile, così come gli attori del mercato delle assicurazioni e riassicurazioni, ognuno per il proprio campo di competenza, sono fortemente interessate ad avere a disposizione dei metodi affidabili per costruire modelli di danno e scenari di disastro, com'è testimoniato dall'iniziativa Global Earthquake Model (GEM, 2008) finalizzata a costruire un modello globale di rischio sismico.

La valutazione degli edifici esistenti è senza dubbio importante in questo contesto, infatti si registra una lunga serie di metodi proposti nel corso degli anni (Calvi et al., 2006), basata su

approcci empirici, analitici, o anche ibridi.

In generale, comunque, i vari metodi proposti hanno bisogno di una considerevole quantità di informazione, che deve essere raccolta o sugli eventi passati (per i metodi empirici) o sulle caratteristiche fisiche e strutturali degli edifici considerati (per gli approcci analitici), o su entrambi (per i metodi ibridi). Ciò rappresenta una seria limitazione all'applicabilità di questi metodi su vasta scala, perché i dati storici non sono disponibili alla precisione o nel formato desiderato, o perché la raccolta di dati *in situ* risulta troppo lenta e costosa. In questo contesto risulta senz'altro utile rivolgere l'attenzione alle tecniche di telerilevamento, che per loro natura permettono di lavorare su scale ben più ampie di quelle ragionevolmente permesse dalla raccolta dei dati edificio per edificio.

L'idea di valutare la vulnerabilità sismica basandosi su dati di osservazione della terra (*Earth Observation, EO*) è infatti apparsa nel *Work Plan 2009-2011* del *Group on Earth Observations*, l'organizzazione internazionale nata nel 2005 dal G8 con il mandato di realizzare il *Global Earth Observation System of Systems* (GEO, 2005).

¹ Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Elettronica, Pavia - ✉ diego.polli@unipv.it

² Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Elettronica, Pavia - ✉ fabio.dellacqua@unipv.it

³ Fondazione Eucentre - Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ fabio.dellacqua@eucentre.it

⁴ Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Elettronica, Pavia - ✉ paolo.gamba@unipv.it

⁵ Fondazione Eucentre - Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia - ✉ paolo.gamba@eucentre.it

Il *task* DI-09-01a del *WorkPlan* 2009-2011 di GEO, coordinato da uno degli autori del presente articolo, è infatti centrato sulla stima della vulnerabilità sismica basata su dati di EO, con speciale attenzione ad un limitato numero di siti (*"SuperSites"*) sui quali l'assegnazione di una priorità permetterà di raccogliere in un tempo ragionevole una gran quantità di dati telerilevati differenti, secondo il *Geohazards SuperSites Concept* (Geohazards, 2005). L'osservazione della terra può diventare la tecnologia abilitante per la stima su vasta scala della vulnerabilità

2. La struttura sviluppata

2.1 Quale "vulnerabilità sismica" si vuole valutare

Come già accennato, il lavoro collegato al *task* GEO DI-09-01a intende produrre una stima di livello zero della vulnerabilità, basandosi ove possibile solo su dati di EO per non dover essere vincolati alla presenza di dati di realtà a terra, spesso non disponibile, non aggiornata o non rappresentata nel formato d'interesse.

L'assegnazione alle diverse classi di vulnerabilità sarà effettuata basandosi su un modello di vulnerabilità semplificato, ottimizzato in modo di sfruttare al massimo le informazioni che possono essere estratte da dati telerilevati. Si conserverà la possibilità di integrare i dati ausiliari, ove disponibili, per migliorare l'accuratezza della valutazione di vulnerabilità.

La vulnerabilità non sarà riassunta in un singolo indice. Si considereranno separatamente tre modelli di vulnerabilità, che potranno essere collegate in una fase successiva:

- **Vulnerabilità fisica** degli edifici, cioè probabilità di danno o crollo;
- **Vulnerabilità degli abitanti**, cioè probabilità di avere feriti o vittime;
- **Vulnerabilità post-evento**, cioè facilità dell'intervento di emergenza/salvataggio

Inoltre, si prevede la produzione di una mappa

sismica, come è già stato ad esempio per le alluvioni (Sanyal and Lu, 2005), risultando in un sensibile avanzamento nella possibilità di costruire scenari di rischio e predisporre contromisure.

Nel prossimo capitolo si presenterà la struttura di questa iniziativa, ed i motivi per cui sono state effettuate determinate scelte (Polli et al., 2009), mentre nel capitolo 3 ci si concentrerà sul caso delle aree urbane. Il capitolo 4 illustrerà due casi studio ed il capitolo 5 fornirà alcune considerazioni conclusive.

dell'accuratezza, che ha lo scopo di completare la mappa di vulnerabilità fornendo indicazioni sull'affidabilità dell'informazione prodotta.

2.2 Cosa è "telerilevabile"

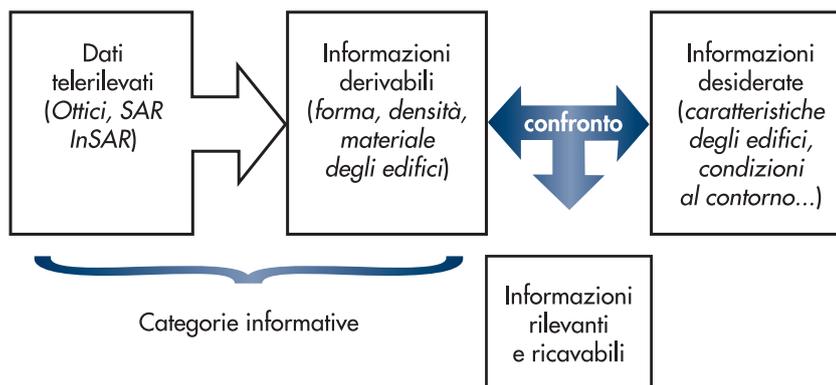
La prima questione tecnica collegata alla valutazione della vulnerabilità da sensori remoti è cosa sia effettivamente visibile e rilevante per la stima della vulnerabilità.

Tale questione è stata affrontata in maniera sistematica, partendo da un insieme di categorie di dati telerilevati più comunemente disponibili (in favore di una più ampia applicabilità del metodo), ed incrociando le informazioni derivabili da tali dati con i dati rilevanti per la vulnerabilità sismica in generale. I risultati di tale confronto sono stati organizzati in una lista schematica, riportata più avanti, basata sulle categorie derivate da entrambi i tipi di dati. Lo schema del confronto è raffigurato in figura 1.

Si sono considerati alcuni tipi di dati telerilevati che rappresentano le migliori combinazioni tra disponibilità e utilità allo scopo. Essi sono elencati nel seguito, con qualche nota sul loro campo d'utilizzo e sui loro vantaggi.

I dati ottici multispettrali a bassa risoluzione (LR). Questi sono particolarmente adatti per la classificazione della copertura del suolo e sono largamente disponibili a costi bassi o addirittura

Fig. 1
Schema di principio dell'approccio utilizzato per produrre un inventario di informazioni derivabili da dati telerilevati e rilevanti ai fini della valutazione della vulnerabilità sismica.



nulli come per i dati LANDSAT (USGS, 2008). La classificazione della copertura del suolo è utile per localizzare e stimare l'estensione delle aree urbane. Inoltre, i dati multispettrali sono disponibili a partire dal 1972, il che permette di costruire mappe storiche dell'espansione urbana; attribuendo le età agli edifici si può risalire ai codici in vigore al momento dell'edificazione.

I dati iperspettrali (Plaza et al., 2007) permettono una più precisa individuazione del tipo di materiale. La loro utilità nel determinare le caratteristiche degli edifici osservati è comunque discutibile, a meno che non si ipotizzi una correlazione forte tra i materiali che si trovano in superficie e la struttura interna dell'edificio (Borfecchia et al., 2010). I dati iperspettrali satellitari sono generalmente disponibili solo a bassa risoluzione spaziale o con un basso rapporto segnale/rumore, il che limita il loro contenuto informativo.

I dati ottici ad alta risoluzione (HR) sembrano rappresentare un buon mezzo per raccogliere informazioni collegate alla vulnerabilità. Da tali dati possono essere estratte caratteristiche importanti quali forma e dimensione (Kocaman et al., 2006), impronta dell'edificio (Baillouel et al., 2005), posizione relativa degli edifici adiacenti. Il principale problema dei dati ottici HR è collegato al costo, attualmente intorno ai 20 € al km² per dati d'archivio, che diventano 40-50 € al km² se si richiedono nuove acquisizioni da più punti di vista; quest'ultimo caso si presenta quando occorre estrarre l'altezza degli edifici, anche se in molti casi l'ombra può essere sufficiente come mostrato nello studio del capitolo 4.

I dati Radar ad Apertura Sintetica a bassa risoluzione (LR-SAR) sono di disponibilità ampia e a basso costo, grazie principalmente alla serie di satelliti Earth Remote Sensing (ERS) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), avviata nel 1991 con ERS-1 e proseguita con ERS-2 a partire dal 1995. Il sensore ASAR a bordo di ENVISAT, in funzione dal 2004 in avanti, funziona in modalità di continuità virtuale con i vecchi satelliti, assicurando così quasi 20 anni di acquisizione radar ininterrotta della superficie terrestre. L'interferometria (Crosetto, 2002), non applicabile ai dati ottici, permette di rilevare piccoli movimenti del terreno lungo la direzione di vista (Wright et al., 2004), e le tecniche dei *Permanent Scatterers* (Ferretti et al., 2001) rendono possibile misurare velocità di spostamento verticale dell'ordine dei millimetri per anno. Tali tecniche sono notissime tra chi si occupa di telerile-

vamento, ma i loro prodotti sono più d'interesse per il rischio sismico piuttosto che per la vulnerabilità.

Un aspetto più interessante dell'interferometria è invece collegato alla mappatura tridimensionale della morfologia del terreno. Una volta che si è prodotta una coppia di immagini con una congrua misura di *baseline* (distanza parallela tra le orbite effettive), l'elaborazione delle differenze di fase produce due risultati interessanti:

1. Informazione sulla quota. Permette di produrre un modello numerico del terreno (DTM) che fornisce la pendenza locale del terreno, un fattore di rischio agiuntivo.
2. Coerenza interferometrica, cioè correlazione tra i valori complessi nelle vicinanze di ciascun pixel. È noto (Fanelli et al., 2000) che valori di coerenza più elevati sono collegati a maggiore probabilità di presenza di edifici. Ciò significa che la coerenza interferometrica può essere utilizzata per facilitare la formazione di mappe delle aree urbane.

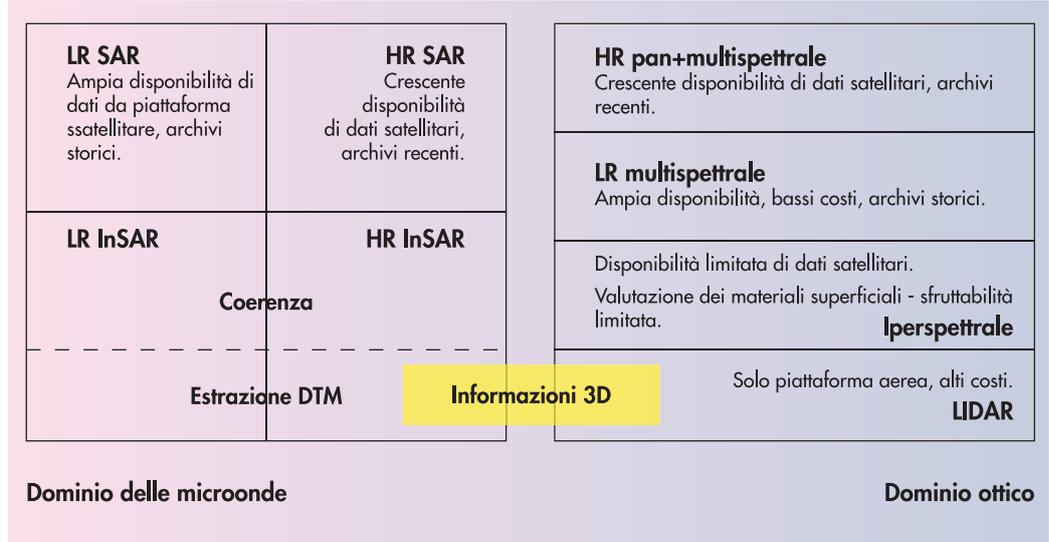
I dati SAR ad alta risoluzione (HR-SAR) stanno cominciando a diventare largamente disponibili grazie al lancio e alla attivazione di una nuova generazione di satelliti con risoluzione a terra attorno al metro. COSMO/SkyMed (Caltagirone et al., 2001) nel 2006, TerraSAR-X (Werninghaus et al., 2004) nel 2007 e RADARSAT-2 (Morena et al., 2004) ancora nel 2007, hanno cominciato a produrre immagini radar della superficie terrestre ad una risoluzione precedentemente sconosciuta ai sistemi radar satellitari civili. Si aprono quindi nuove prospettive, perché questi sistemi combinano le capacità di funzionare in qualunque condizione meteo, tipica dei sistemi radar, con una risoluzione geometrica molto fine, che permette di accedere a dettagli della scena finora inarrivabili.

Tale capacità permette ad esempio un aggiornamento accurato delle aree soggette a disastri, perché l'individuazione degli elementi significativi può essere effettuata appena i dati si rendono disponibili, attraverso una procedura di estrazione o *mapping* (Dell'Acqua et al., 2008). La disponibilità di tali informazioni aggiornate permette di conoscere in maniera affidabile la dislocazione delle "linee vitali" o *lifelines*, le vie di fuga e la distribuzione spaziale della popolazione.

Gli strumenti **LIDAR (Light Detection and Ranging)** che effettuano una scansione della scena tramite impulsi laser, possono fornire modelli tridimensionali estremamente raffinati degli edifici e di altre strutture. Si può rimediare all'alto costo di questo tipo di dati ad esempio fondendo dati LIDAR su una piccola area con dati InSAR, meno

Fig. 2

I vari tipi di dati telerilevati presi in considerazione. Per ciascuna categoria sono evidenziate le caratteristiche che possono influenzare l'utilizzabilità del dato nella valutazione di vulnerabilità sismica su vasta scala.



precisi ma decisamente più economici, acquisiti su un'area ben più vasta (Gamba et al., 2004). Confrontando i dati "di realtà a terra" forniti dal LIDAR è possibile risalire alle caratteristiche della distorsione sofferta dai dati InSAR ed invertirne gli effetti.

Questo è un esempio di fusione di dati tra diversi sensori; la fusione è implicitamente presa in considerazione ma non esplicitamente trattata in questo articolo, in quanto, oltre ad essere un argomento vastissimo:

- Dal punto di vista dei tipi di dati la fusione non aggiunge nuove categorie, ma serve piuttosto allo scopo di migliorare i risultati forniti dall'elaborazione di un singolo tipo di dati;
- In questo contesto la fusione dei dati telerilevati permette generalmente di migliorare la qualità e l'affidabilità della stessa informazione piuttosto che di ottenerne di nuova (come nell'esempio sopra, dove la fusione di dati InSAR e LIDAR porta ad avere una migliore definizione della forma tridimensionale degli edifici);
- La fusione con i dati ausiliari non provenienti da telerilevamento è un argomento a parte

rispetto all'elaborazione di dati telerilevati "puri".

La **fusione di informazioni** può invece essere sfruttata sul versante della valutazione della vulnerabilità (ad esempio, le mappe della rete stradale, della densità di popolazione, le forme degli edifici cooperano nel definire il livello di difficoltà nell'intervento di emergenza).

La figura 2 riassume le categorie dei dati presi in considerazione nel nostro lavoro, con le annotazioni sui punti significativi.

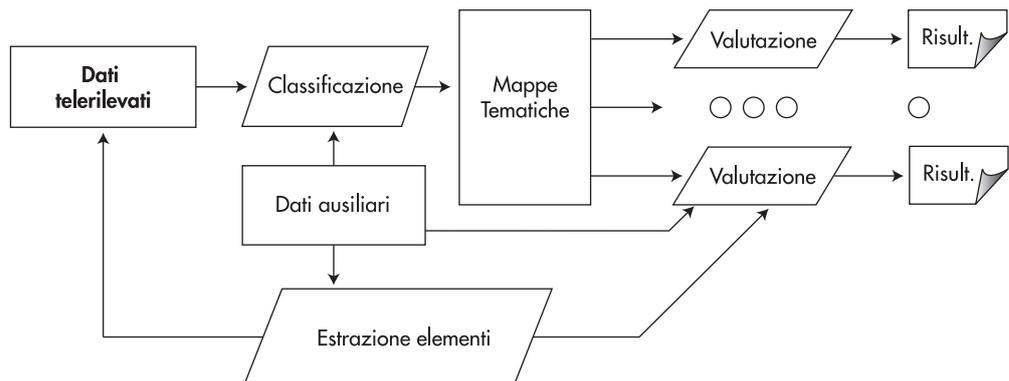
2.3 Un'ipotesi di catena di elaborazione

Dati gli elementi informativi delineati nel paragrafo precedente, si può abbozzare una prima ipotesi di catena di elaborazione come quella mostrata in figura 3. I dati telerilevati sono utilizzati prima per effettuare una classificazione tematica delle diverse coperture del suolo che si trovano nell'area di interesse (ad es. urbano, rurale, montuoso, ...) perché in linea di principio ogni contesto richiede un diverso approccio alla valutazione di vulnerabilità.

Una classificazione approssimativa in macroclassi come urbano/rurale può basarsi su dati

Fig. 3

Ipotesi di catena di elaborazione dei dati telerilevati per la valutazione su vasta scala della vulnerabilità sismica.



telerilevati a bassa risoluzione, mentre un'ulteriore analisi come la rilevazione di singole strutture d'interesse (ad es. ponti, autostrade) in un contesto rurale richiede dati a risoluzione spaziale più fine. I dati ausiliari possono essere immessi a tutti

3. Il caso delle aree urbane

Nel capitolo precedente si è accennato al primo passo della catena di elaborazione, che consisterà di una partizione preliminare dell'area di interesse in classi tematiche; tale partizione è utile per poter applicare un opportuno modello di vulnerabilità a ciascuna classe (es.: urbano residenziale, commerciale, vegetazione, ...).

Una delle categorie di massimo livello di tale classificazione tematica sarà sicuramente quella delle aree urbane, dato che queste ultime rappresentano una concentrazione molto alta di persone e beni potenzialmente in pericolo in caso di terremoto. La rilevazione e la delimitazione delle aree urbane da dati telerilevati è stata largamente studiata nel passato, utilizzando sia il radar (Gamba et al., 2007), (Stasolla et al., 2008), sia strumenti ottici (Kayaa and Curranb, 2006), sia addirittura l'illuminazione notturna (Imhoff et al., 1997), particolarmente efficaci per le nazioni economicamente sviluppate, dove l'illuminazione pubblica è onnipresente negli aggregati urbani.

Una volta che le aree urbane sono state rilevate, i singoli edifici contenuti al loro interno possono essere rilevati e delimitati (Sohn and Dowman, 2007) (Gamba et al., 2007a) e si possono estrarre le loro caratteristiche rilevanti.

Da una ricerca preliminare effettuata sulla letteratura scientifica riguardante la valutazione della vulnerabilità sismica è emersa una serie di caratteristiche rilevanti per la valutazione di tale parametro e potenzialmente derivabile da dati telerilevati: area e forma dell'impronta, numero di piani, altezza dei piani con esplicita distinzione tra il piano terra ed i superiori, rapporto

4. Casi studio

Per illustrare l'utilità del telerilevamento nella stima della vulnerabilità attraverso l'elaborazione di acquisizioni satellitari, vengono di seguito presentati due casi studio. Nel primo caso si utilizzano immagini satellitari ottiche per individuare e censire gli elementi a rischio, utilizzando poi le caratteristiche geometriche per stimare la vulnerabilità. Le dimensioni degli oggetti, così ricavate, sono utilizzate per formulare ipotesi ragionevoli sulle caratteristiche non visibili nelle immagini satellitari (ad es. lo spessore delle lamiera) e deri-

gli stadi del processo, ma danno probabilmente il massimo beneficio se sono utilizzati per determinare caratteristiche non facilmente estraibili da dati telerilevati come ad esempio la struttura interna degli edifici.

tra area delle finestre ed area totale della facciata, distanza orizzontale tra le finestre.

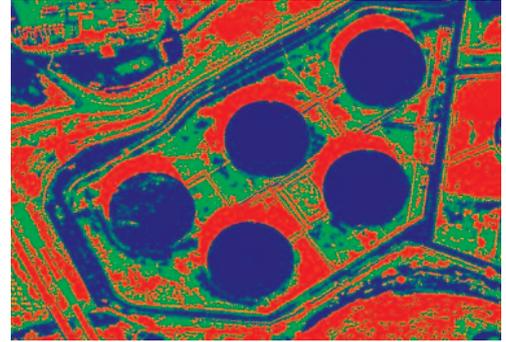
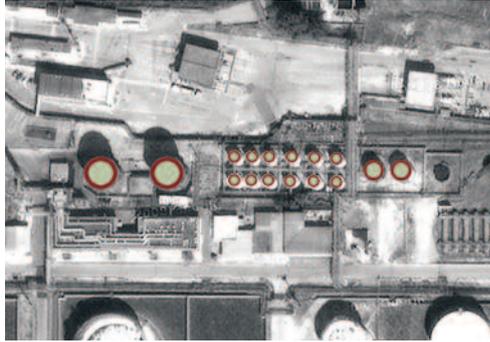
Sfortunatamente, però, la distinzione cruciale tra le due principali forme di costruzione, ovvero costruzioni in muratura e costruzioni in cemento armato, non si può fare basandosi solo su dati telerilevati. Solo lo strato più esterno degli edifici può essere rilevato e classificato, tuttavia esso non ha ovviamente influenza sulle caratteristiche strutturali dell'edificio. Un aiuto può però venire da eventuali correlazioni di queste ultime con le caratteristiche superficiali; ad esempio i tetti di cotto sono tipici degli edifici in mattoni, mentre palazzi più alti di quattro piani non possono che essere costruiti in cemento armato. Purtroppo alcune correlazioni sono dovute alla normativa o agli usi e sono quindi validi solo per determinate aree geografiche. In un'ottica globale, occorre pensare anche ad altre soluzioni, ed in questo si possono mettere a frutto le disponibilità di dati ausiliari.

D'altro canto sono disponibili archivi immensi d'immagini telerilevate a bassa risoluzione, che permettono di risalire all'età degli edifici tramite osservazione del cambiamento (detta *change detection* in letteratura) tra date adiacenti. Gli archivi ERS risalgono al 1991, gli archivi LANDSAT addirittura al 1972; sebbene l'intervallo temporale sia relativamente breve rispetto all'età di una parte rilevante del costruito, si deve considerare la forte tendenza all'urbanizzazione che si è riscontrata dalla metà del XX secolo insieme al diffondersi dei codici di progettazione sismica, spesso evolutisi in più versioni nel corso degli anni. La concomitanza di tali fattori rende importante distinguere l'età di costruzione anche su scale temporali relativamente piccole.

vare una stima di vulnerabilità sismica. Maggiori dettagli si possono trovare in un articolo precedentemente pubblicato su questa stessa rivista (Borzi et al., 2009).

Nel secondo caso si tratta invece di un esempio, su area urbana a rischio, di fusione di informazioni ricavate da dati satellitari di diversa natura; nel caso in specie si è sperimentata in via preliminare l'estrazione dell'impronta degli edifici da immagini ottiche e del numero di piani degli stessi edifici da immagini radar ad apertura sintetica. Il secondo caso è particolarmente

Fig. 4
I serbatoi rilevati sono evidenziati con una circonferenza di colore rosso (a sinistra); i pixel di ombra sono rappresentati in rosso, i manufatti in blu, e lo spessore di un'area rossa adiacente ad un'area blu è ovviamente legata sull'altezza della struttura (a destra).



interessante perché l'obiettivo di lungo termine del lavoro di ricerca è l'automatizzazione della procedura e di conseguenza la sua estendibilità a vaste aree del paese.

4.1 Primo caso studio: Priolo

Nel primo esempio preso in considerazione è stato affrontato uno studio di vulnerabilità su una vasta area industriale, in cui si trovano numerosi impianti petroliferi, nella zona di Priolo, sul Golfo di Siracusa. Una serie di problemi, tra cui un gran numero di società diverse che operano nelle varie sezioni dell'area industriale, hanno reso particolarmente difficoltosa la raccolta di tutte le informazioni relative alle strutture e infrastrutture che si trovano nel sito (serbatoi, tubazioni, ciminiere, strade, ...) necessarie per un valutazione approfondita dei fattori di vulnerabilità.

È stato quindi deciso di raccogliere i dati necessari attraverso l'analisi di immagini satellitari. Per agevolare questa estrazione, è stata utilizzato un sistema Software (SW), chiamato BREC (da "Built-up area RECOgnition") in grado di estrarre informazioni da immagini satellitari. BREC è stato sviluppato all'interno del Gruppo di Telerilevamento presso l'Università di Pavia, ed è attualmente utilizzato per l'estrazione di diverse informazioni da immagini ad alta risoluzione EO. I risultati sono prodotti in un formato standard GIS, consentendo così un notevole risparmio sul lavoro necessario per l'analisi (Polli et al., 2008).

Per il sito di Priolo sono state selezionate immagini DigitalGlobe® Quickbird (QB) a 0,61 m di passo di campionamento spaziale nella banda pancromatica; si sono scelte acquisizioni singole con criteri basati su età, qualità ed angolo di incidenza. Dalle immagini è stato possibile estrarre dati riguardanti le strutture, come cisterne e ciminiere, rilevanti per il processo di valutazione della vulnerabilità. Per realizzare quest'ultimo processo è stata utilizzata una procedura semplificata di modellazione meccanica della struttura. In questo studio i dati estratti dalle

immagini da satellite sono stati utilizzati come input in un progetto simulato delle strutture, al fine di determinare le caratteristiche di questi ultimi, compresi lo spessore e le caratteristiche delle barre d'acciaio delle strutture in cemento armato. Un esempio di un passo per l'estrazione di una caratteristica è illustrato nella figura 4, a sinistra, dove vengono individuate le strutture circolari indicate come cerchi rossi. La figura 4, a destra, mostra invece il principio della stima dell'altezza a partire dall'estensione dell'ombra.

Anche la rete stradale, all'interno della zona, è stata estratta attraverso procedure semiautomatiche. Questa informazione non è strettamente necessaria per la valutazione della vulnerabilità, ma, in caso di emergenza, le informazioni aggiornate sull'area d'interesse possono essere di aiuto per l'evacuazione e gli interventi di soccorso.

Le caratteristiche estratte a partire dalle immagini telerilevate e i risultati sulla valutazione della vulnerabilità sono stati integrati in una piattaforma GIS, che rappresenta un valido supporto per la gestione di dati di grandi dimensioni nel campo del rischio sismico. Per ulteriori dettagli si rinvia il lettore ad una pubblicazione specifica (Borzi et al., 2009).

4.2 Stima della vulnerabilità

Nell'area in esame, i dati volumetrici relativi a serbatoi e ciminiere sono stati estratti a partire da immagini satellitari. La vulnerabilità sismica è stata stimata dalla sezione Rischio Sismico di EUCENTRE utilizzando un metodo di analisi semplificata basato sulla re-ingegnerizzazione; le informazioni volumetriche estratte dalle immagini da satellite sono utilizzate per simulare la progettazione di strutture conformi ai dati estratti, utilizzando il codice edilizio in vigore al momento della loro costruzione. Le ciminiere e le cisterne sono state suddivise in categorie, ognuna di essa rappresentata con una curva di danno: essa riporta la probabilità di raggiungere un determinato stato limite in funzione della accelerazione di picco al suolo.



Fig. 5
Mappa di vulnerabilità: gli elementi visualizzati in rosso presentano una vulnerabilità superiore ad una soglia prefissata.

Tutti i metodi sviluppati sono progettati per essere in grado di fornire risultati più accurati nel caso in cui si rendano disponibili ulteriori informazioni, sia estratti da dati telerilevati o da dati ausiliari raccolti.

I risultati sono stati inseriti in un formato standard e integrati in un GIS, che è la scelta naturale per un'analisi della vulnerabilità su vasta scala, creato dalla sezione Rischio Sismico di EUCENTRE. Il GIS sviluppato per questo progetto è stato composto in 2 e 3 dimensioni, questo ha permesso l'estrazione delle altezze degli oggetti e ha generato una rappresentazione particolarmente realistica della superficie. Con una mappa 3D, come quella rappresentata nella figura 5, un operatore esperto è facilitato nell'individuare visivamente i rischi connessi alla collocazione delle strutture.

4.3 Secondo caso studio: Messina

Il sito selezionato per questo secondo caso di studio è Messina, Italia. Si tratta di una città nota nel mondo della sismica a causa del disastroso terremoto del 1908, accompagnato da

un maremoto che provocò la quasi completa distruzione della città stessa. Diversi studi sono in corso su questo sito di prova e la Conferenza di Geofisica Applicata del 2008 (AGE 2008) si è svolta proprio a Messina per celebrare i 100 anni di progressi nella gestione e mitigazione delle catastrofi. La vulnerabilità del patrimonio edilizio di Messina è stata analizzata attraverso un approccio statistico in cui l'unità di valutazione era l'unità censuaria.

Nel quadro di lavoro di cooperazione con la società canadese InterMap®, che possiede i propri strumenti radar aviotrasportati, è stata effettuata una campagna di acquisizione sopra l'area urbana e la zona circostante; l'acquisizione è stata ripetuta 6 volte lungo 6 diverse linee di volo, fornendo così diversi punti di vista su ciascun edificio. Intermap ha utilizzato il proprio sensore radar aviotrasportato STAR-4® montato sull'apparecchio King Air®. Una vista complessiva del dato reso a toni di grigio e a risoluzione ridotta è visibile nella figura 6. La descrizione delle sei linee di volo e le loro caratteristiche sono riportate nella Tabella 1 e rese visivamente nella figura 7.

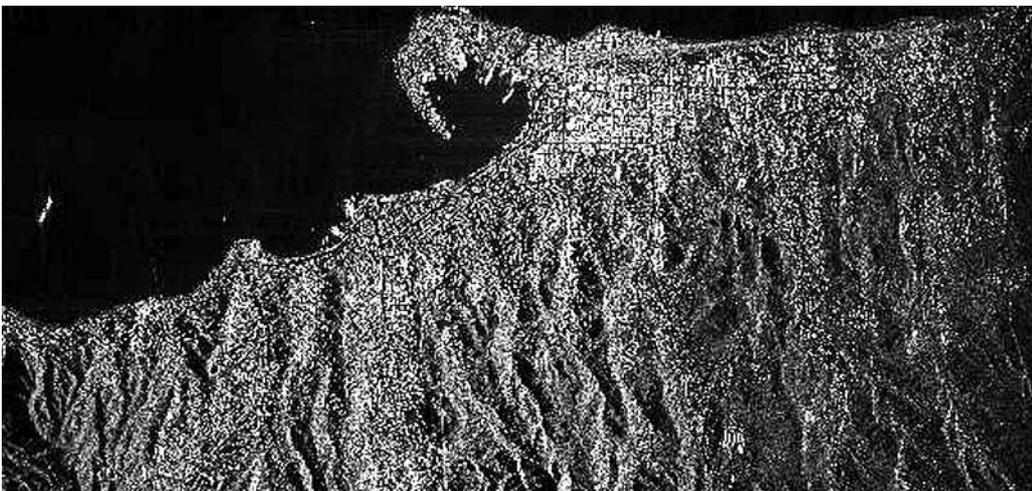
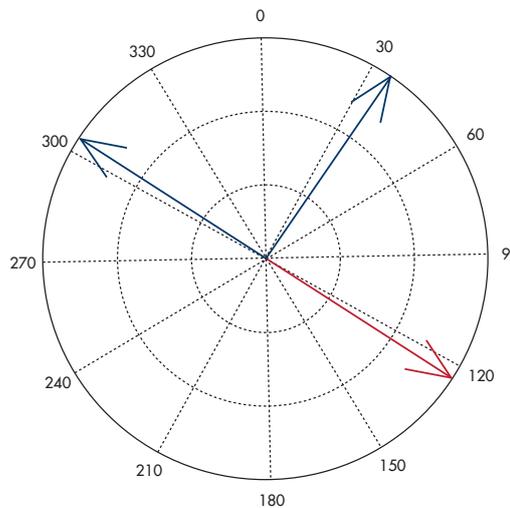


Fig. 6
Esempio di immagine radar SAR ad alta risoluzione sul centro urbano della città di Messina.

Tabella 1 - Descrizione delle 6 linee di volo dell'acquisizione radar su Messina

Codice immagine	Dimens.imagine (pixel)	Direz. di volo	Lato di acquisizione (risp. moto aereo)	Quota media di volo (m)
m9044p1s1_00	18298 ↔ 8708	304°	destra	7429
m9044p2s1_00	12494 ↔ 16505	35°	destra	7426
m9045p1s1_00	13174 ↔ 9187	124°	sinistra	5606
m9045p2s1_00	13192 ↔ 9186	304°	destra	5610
m9045p3s1_00	10334 ↔ 16830	35°	destra	5609
m9045p4s1_00	10336 ↔ 16830	35°	destra	5608

Fig. 7
Direzioni di volo nelle acquisizioni radar su Messina: le linee continue blu rappresentano i voli con acquisizione a destra, le linee rosse tratteggiate quelli con acquisizione a sinistra.



Ricordando lo scopo di confronto con i risultati della valutazione *in situ*, è stato selezionato come campione un piccolo gruppo di edifici prospiciente la centrale Piazza Duomo. Prima delle successive elaborazioni, tutte le sei immagini radar geocodificate sono state ritagliate su questo gruppo di edifici, lasciando una ragionevole zona cuscinetto attorno.

Non essendo ancora disponibili dati ottici specificamente acquistati sull'area selezionata, per i nostri esperimenti di fattibilità abbiamo deciso di utilizzare immagini Google Earth® (GE), pubblicamente accessibili. L'edificio è stato indivi-

duato sul collage ottico GE e ritagliato, anche in questo caso lasciando una zona cuscinetto intorno ad esso, come visibile nella figura 8.

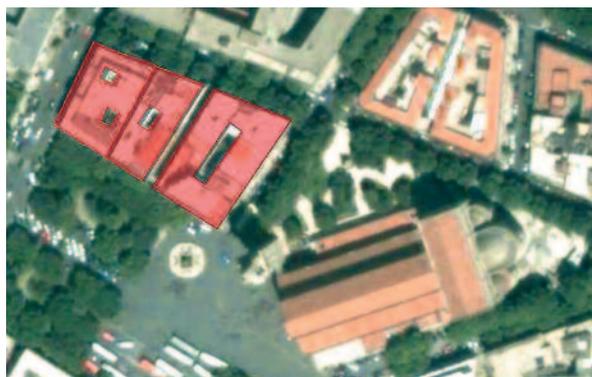
4.4 Estrazione delle caratteristiche dell'edificio e fusione

L'estrazione della pianta dell'edificio, così come l'estrazione del numero di piani, è effettuata basandosi ampiamente sull'estrattore di elementi lineari, presente nel SW BREC.

4.5 Estrazione della pianta dell'edificio

L'impronta della costruzione è stata estratta appli-

Fig. 8
Immagine Google Earth® dell'area selezionata, in cui è evidenziato, con la sovrapposizione di un poligono rosso parzialmente trasparente, il gruppo di edifici scelto per l'esperimento.



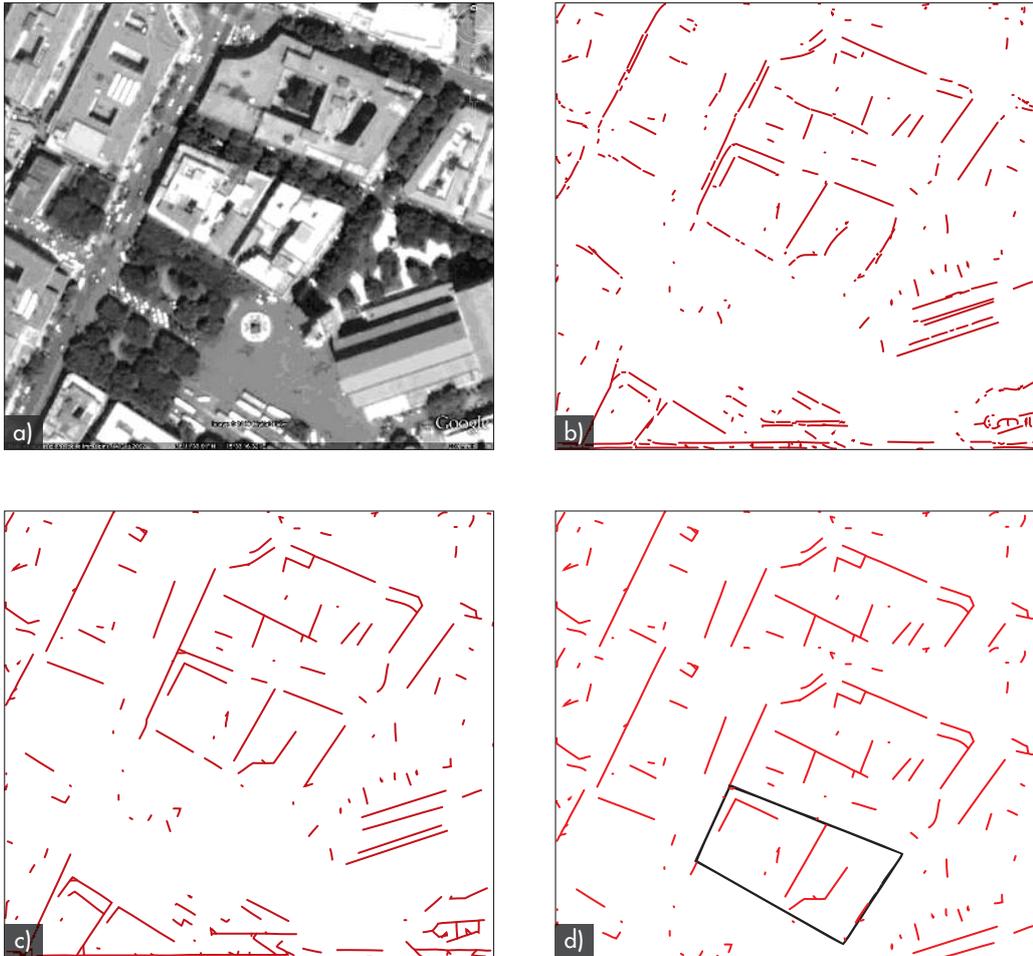


Fig. 9
Passi della generazione di stime di impronta degli edifici. a) l'immagine originale, b) estrazione preliminare degli elementi lineari, c) fusione degli elementi, d) ipotesi d'impronta dell'edificio evidenziata con un quadrilatero di colore nero.

cando l'estrattore di elementi lineari ad un'immagine di bassa qualità catturata dallo schermo di Google Earth. La sua scarsa qualità non sembra essere un ostacolo troppo elevato, infatti il risultato dell'estrazione parrebbe soddisfacente (si veda la figura 9). Solo la chiusura del contorno dell'edificio deve essere effettuata manualmente, perché questa parte della suite di software è ancora in fase di sviluppo. Questa procedura permette di delineare l'impronta dell'edificio e di determinarne la dimensione lungo entrambe le direzioni, due parametri molto importanti per la valutazione della vulnerabilità.

4.6 Estrazione del numero dei piani

Un altro parametro importante per la determinazione della vulnerabilità sismica degli edifici è il numero di piani. In questo paragrafo si tratta del problema della sua determinazione a partire da dati telerilevati. È da notare che il numero di piani è derivabile dall'altezza dell'edificio, la cui determinazione è un problema noto nel telerilevamento, ma la stima dell'altezza degli edifici è un problema di più difficile ed incerta soluzione di quanto non sia la determinazione diretta del numero di piani.

L'ispezione delle immagini di Google Earth ha consentito la selezione del miglior angolo in azimuth tra quelli che caratterizzano le 6 linee di volo su Messina. Come mostrato in figura 10 (a sinistra) la facciata dell'edificio più visibile è quella nord-occidentale poiché è rivolta verso una grande strada urbana e non è occlusa da vegetazione. L'immagine radar corrispondente, figura 10 (lato destro), è caratterizzata da file di riflettori molto evidenti, probabilmente originate dalle strutture ad angolo costituite da balconi sporgenti (vedi figura 11) e dal riflettore ad angolo costituito dall'intersezione marciapiede/facciata. Se si suppone disponibile l'impronta dell'edificio, estratta al passo precedente, è possibile determinare la direzione dominante della facciata nell'immagine: a questo punto, una filtratura direzionale permette di trasformare tali riflettori discontinui, in una più omogenea linea luminosa, che può essere facilmente individuata dall'estrattore di elementi lineari (Fig. 12). Qui sono piuttosto evidenti i tre segmenti paralleli che segnano i relativi tre piani. Contando le linee parallele più lunghe estratte dall'immagine si ottiene il numero di piani della costruzione.



Fig. 10
Sulla sinistra l'immagine ottica di Google Earth®, sulla destra l'immagine radar ad apertura sintetica relativa al gruppo di edifici selezionato. Sulla destra appaiono piuttosto chiaramente le quattro file di riflettori che marciano i tre piani, probabilmente originati dalle strutture sporgenti su cui si ha riflessione ad angolo dell'onda radar.



Fig. 11
Collage di fotografie che rappresenta con continuità la facciata dell'edificio

Fig. 12
Segmenti estratti dalla facciata nordoccidentale (elaborazione effettuata sull'immagine radar con illuminazione da nord-ovest).

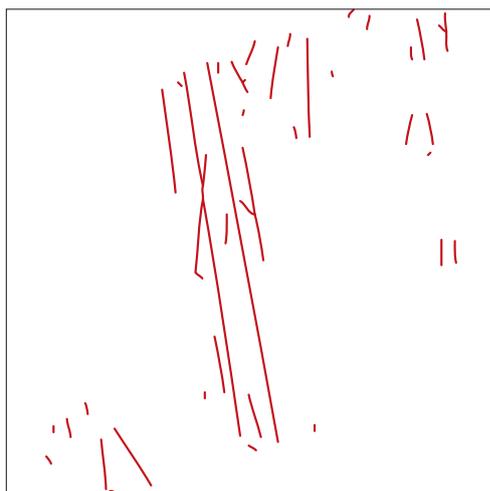
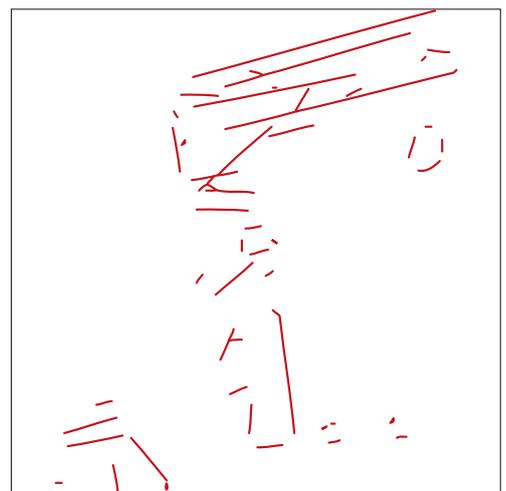


Fig. 13
Segmenti estratti dalla facciata nord (elaborazione effettuata sull'immagine radar con illuminazione da nord).



Ripetendo la stessa procedura per la successiva facciata più visibile, cioè quella settentrionale, si ottiene lo stesso risultato che conferma quello ottenuto in precedenza (vedi Fig. 13). Lo schema del procedimento seguito è visibile in figura 14.

La stessa procedura è stata applicata ad altri due edifici della stessa area urbana, come illustrato nella figura 15. La figura 15 a1) e a2), mostra le immagini ottiche dei due edifici, mentre figura 15 b1) e b2) rappresenta le immagini SAR. In figura 15 c1),

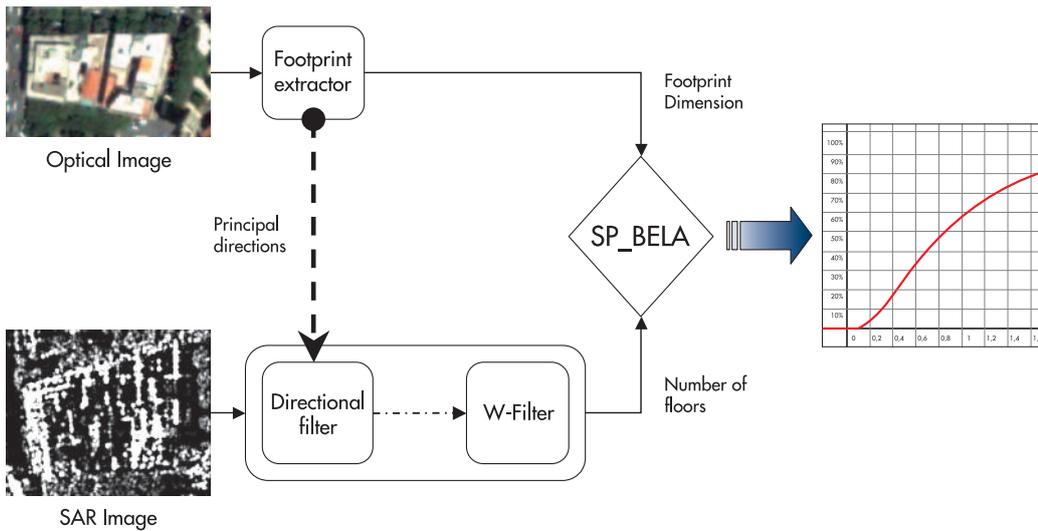


Fig. 14
Diagramma di flusso del metodo applicato.

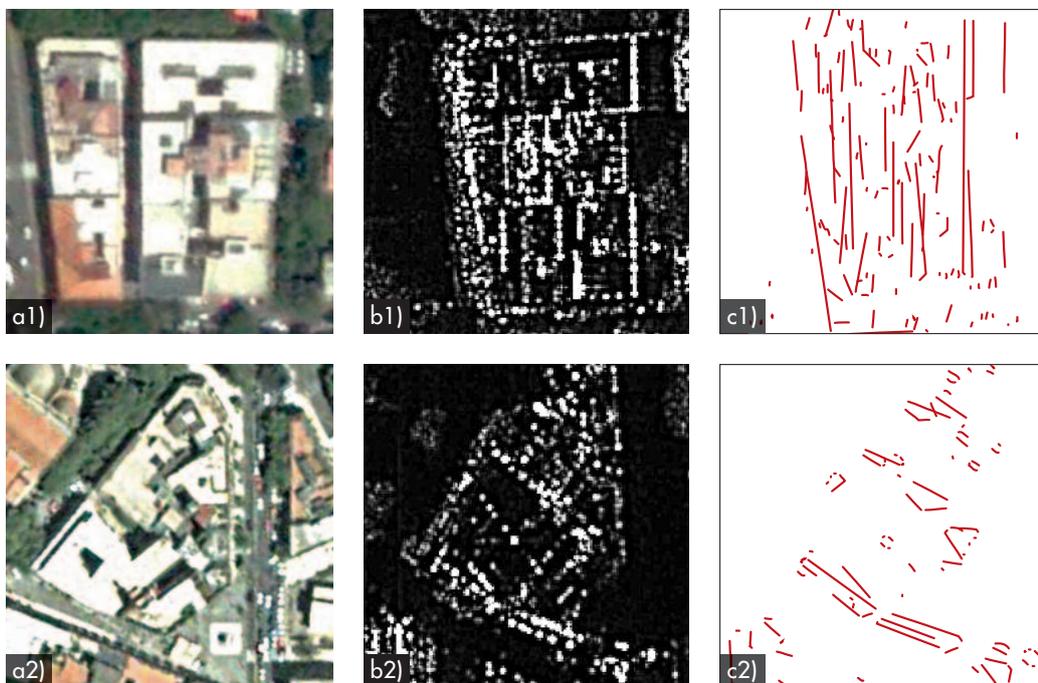


Fig. 15
Altri edifici presi in esame nell'area di studio. Per ogni riga, la prima figura (a) rappresenta la porzione di immagine ottica considerata per l'estrazione dell'impronta dell'edificio, la seconda; (b) rappresenta la corrispondente porzione di immagine radar, la terza (c) rappresenta il risultato dell'estrazione delle file di riflettori, che evidenziano sottoforma di gruppi di linee parallele le divisioni tra i piani, utili per il conteggio di questi ultimi.

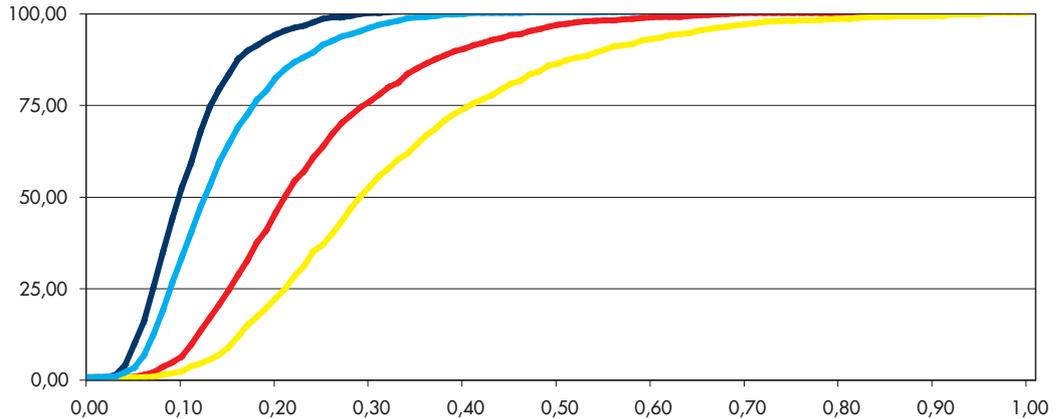
sono rappresentate le caratteristiche estratte dalla facciata nord-ovest del secondo edificio testato e figura 15 c2) mostra i segmenti estratti dalla facciata sud-ovest del terzo edificio.

4.7 Valutazione della vulnerabilità

In questa fase preliminare si è considerato solo l'aspetto fisico della vulnerabilità sismica, ovvero la fragilità degli edifici, rinviando alle fasi successive altri aspetti di vulnerabilità molto più complessi e di difficile interpretazione quali vulnerabilità umana, sociale ed economica. Si ritiene comunque che per la stima di questi ultimi la valutazione della vulnerabilità fisica degli edifici sia un passo preparatorio fondamentale. Per stimare la vulnerabilità fisica degli edifici, definita anche come fragilità, basandosi su cri-

teri quantitativi, la scelta è caduta sul modello SP-BELA (Borzi et al., 2008), concepito per gli edifici in cemento armato ma con una versione adatta anche per gli edifici in muratura (Borzi et al., 2008a). Tale modello è stato sviluppato dalla sezione Rischio Sismico di EUCENTRE, che ha cortesemente messo il software a disposizione della sezione Telerilevamento. Semplificando in maniera estrema si può affermare che SP-BELA, lavorando in un quadro statistico, permette di stimare la probabilità che un dato edificio raggiunga i quattro strati limite predefiniti (danno lieve, danno non strutturale, danno grave, collasso), per ogni dato valore di accelerazione di picco del terreno. La scelta di utilizzare SP-BELA è dovuta alle sue caratteristiche particolarmente appetibili nel contesto della

Fig. 16
 curva di vulnerabilità per un
 esempio di edificio in
 cemento armato con
 tamponature, a 2 piani,
 con impronta rettangolare di
 4,8 m. L'asse orizzontale
 riporta l'accelerazione di
 picco al terreno espresso in
 g ($1\text{ g} = 9,81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$). Le
 curve di colore blu,
 azzurro, rosso e giallo
 rappresentano gli stati limite
 di danno lieve, danno non
 strutturale, danno grave e
 collasso rispettivamente.



valutazione su vasta scala della vulnerabilità sismica a partire da dati telerilevati:

1. non necessita di un insieme esteso di dati sull'edificio preso in esame, di cui hanno invece bisogno molti precedenti metodi basati su simulazioni meccaniche;
2. molti dei dati che esso richiede (dimensioni dell'impronta, numero di piani, ...) sono ricavabili da dati telerilevati;
3. ha tempi di esecuzione contenuti (dell'ordine dei secondi per ogni edificio su un calcolatore con prestazioni standard).

I risultati dei precedenti passi di elaborazione su ogni singolo edificio sono passati ad SP-BELA, che produce le relative quattro curve per gli strati limite definiti. Un esempio di resa grafica dell'uscita prodotta è mostrato in figura 16, in cui l'asse verticale indica la probabilità di raggiungimento dello strato limite e l'asse orizzontale riporta le accelerazioni di picco al terreno. L'informazione contenuta nelle curve di vulnerabilità è naturalmente ridondante rispetto a quanto si può ritenere utile per applicazioni

5. Conclusioni

Nel presente articolo si è presentata un'iniziativa di carattere scientifico relativa alla stima della vulnerabilità sismica utilizzando dati telerilevati. L'obiettivo nel lungo termine è di renderla operativa; finora sono stati mossi i primi passi verso un sistema che dovrà produrre una valutazione approssimativa della vulnerabilità basandosi in linea di principio solo su dati telerilevati, ma in grado di sfruttare, se disponibili, anche dati di altra natura per migliorare l'accuratezza della stima. Nelle intenzioni, tale sistema dovrebbe svincolare la valutazione della vulnerabilità sismica dalla disponibilità di dati a terra e in situ, che risultano, in una prospettiva globale, estremamente scarsi, disomogenei e spesso di difficile reperibilità.

quali la preparazione di scenari di rischio o per il supporto a metodi di valutazione su larga scala dei danni da evento sismico basati su dati satellitari.

Il lavoro è naturalmente ancora incompleto, perché finora non vi è stata possibilità di confrontare i risultati della valutazione effettuata secondo la procedura descritta con i risultati di una valutazione di vulnerabilità effettuata secondo i metodi tradizionali, più precisi ancorché più esigenti in termini d'informazioni da fornire relativamente alle caratteristiche degli edifici esaminati.

Gli ultimi sviluppi del lavoro sono stati recentemente presentati in un lavoro a convegno (Polli et al., 2010). Uno dei prossimi problemi che si affronteranno sarà come tradurre in modo efficace il risultato di SP-BELA in un numero limitato di categorie di vulnerabilità che possano essere rappresentate su una mappa ad esempio con codici di colore, allo scopo di rendere meglio visibile la distribuzione spaziale degli elementi più critici in caso di evento sismico.

Le iniziative per la valutazione del rischio sismico su vasta scala come il Global Earthquake Model (GEM, 2008) sono tra i possibili beneficiari di questa iniziativa.

Lo stadio attuale di sviluppo vede un sistema già delineato nella sua struttura generale e nel suo diagramma di flusso; esso accetta in ingresso immagini ottiche e radar ad alta risoluzione del sito oggetto di studio, estrae alcune caratteristiche rilevanti degli edifici e ne produce una stima approssimativa della curva di vulnerabilità sismica.

Alcuni passi della procedura sono automatizzati, mentre altri richiedono un intervento da parte dell'operatore. In questo senso il sistema non è operativo.

Molto è ancora da fare nell'analisi dei metodi

semplificati per la stima della vulnerabilità, nell'adattarli alla limitata offerta d'informazioni ricavabili da dati telerilevati, e nell'esaurire tutte le possibilità di ricavare dati utili allo scopo da ogni genere di acquisizione remota. Gli autori si stanno impegnando fortemente in queste direzioni, e le ricerche sono in corso. È da notare

che la possibilità di valutare su ampia scala la vulnerabilità sismica fornirebbe informazioni preziose, anche da un punto di vista economico, non solo agli utenti istituzionali quali le organizzazioni per la protezione civile, ma anche ad utenti commerciali quali le imprese di assicurazione o di riassicurazione.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare Barbara Borzi, Helen Crowley e Rui Pinho della sezione Rischio Sismico di Eucentre per le discussioni sull'argomento, risultate molto utili agli autori di questo articolo; Maria Serena Teramo per le informazioni sul sito di Messina. I dati radar sono stati cortesemente forniti dall'a-

zienda canadese Intermap (www.intermap.ca) nell'ambito di un accordo di cooperazione con il Gruppo di Telerilevamento. Le attività descritte nel presente articolo sono state parzialmente finanziate dal Dipartimento della Protezione Civile attraverso il Piano Esecutivo 2008-2011.

Bibliografia

- Bailloleul T., Prinnet V., Serra B., Marthon P., Chen P., Zhang H. (2005) - Digital Building Map Refinement from Knowledge-Driven Active Contours and Very High Resolution Optical Imagery. Proc. of the ISPRS Hannover Workshop 2005, High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. [online]. URL: <http://www.isprs.org/publications/related/hannover05/paper/109-alamus.pdf>
- Borfecchia F., De Cecco L., Pollino M., Lugari A., Martini S., La Porta L. (2010) - Active (LIDAR) and passive (multi/hyperspectral) remote sensing techniques for supporting the evaluation of the urban seismic vulnerability. Proceedings of GI4DM, 2-4 February 2010, Turin, Italy. On CD-ROM
- Borzi B., Crowley H., Pinho R. (2008) - Simplified Pushover-Based Vulnerability Analysis for Large Scale Assessment of RC Buildings. Engineering Structures. Volume 30, Issue 3, March 2008, Pages 804-820.
- Borzi B., Crowley H., Pinho R. (2008a) - Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) Method for Masonry Buildings. International Journal of Architectural Heritage, 2:4, 353 - 376
- Borzi B., Dell'Acqua F., Faravelli M., Gamba P., Lisini G., Onida M., Polli D. (2009) - Studio di vulnerabilità di una vasta area industriale mediante immagini telerilevate da satellite". *Progettazione Sismica*, n.2/2009, pagg. 105-117. ISSN 1973-7432.
- Calvi G.M., Pinho R., Bommer J.J., Restrepo-Vélez L.F., Crowley H. (2006) - Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years - ISET Journal of Earthquake Technology, paper No. 472, Vol. 43, No. 3, September 2006, pp. 75-104.
- Caltagirone F., Spera P., Gallon A., Manoni G., Bianchi L. (2001) - COSMO-SkyMed: A dual use Earth observation constellation. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Satellite Constellation and Formation Flying, 2001, 87-94.
- Crosetto M. (2002) - Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 57, Issue 3, December 2002, Pages 213-227
- Dell'Acqua F., Gamba P., Lisini G. (2008) - Rapid mapping of high resolution SAR scenes. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Article in Press.
- Fanelli A., Santoro M., Vitale A., Murino P., Askne J. (2000) - Understanding ERS coherence over urban areas. Proc. of ERS/Envisat Symposium, ESA-SP-461, Gothenburg 16 - 20 October 2000
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001) - Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Jan 2001, Volume: 39, Issue: 1, pp. 8-20
- Gamba P., Dell'Acqua F., Trianni G. (2007) - Satellite SAR and Human Settlement Detection. Proc. of the 2007 Urban Remote Sensing Joint Event, Paris, France, 11-13 April 2007, pp. 1-4.
- Gamba P., Dell'Acqua F., Lisini G., Trianni G. (2007a) - Improved VHR Urban Area Mapping Exploiting Object Boundaries. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 45, Issue 8, Aug. 2007 Page(s): 2676-2682
- Gamba P., Dell'Acqua F., Cisotta F., Lisini G. (2004) - High resolution InSAR "Bultscape" improvement using LIDAR as ancillary data. Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Anchorage, AK, USA, 20-24 Sept. 2004, Volume: 3, pp. 1808-1811
- GEM (2008) - The Global Earthquake Model. [online] URL: <http://www.globalquakemodel.org/>
- GEO (2005) - The Group on Earth Observation. [online] URL: www.earthobservations.org
- GeoHazards (2005). <http://www.igosgeohazards.org/supersites.asp>
- GEOSS 10-Y (2005) - The Global Earth Observation System of Systems (GEOSS) 10-Year Implementation Plan. [online] URL: <http://www.earthobservations.org/documents/10-Year%20Implementation%20Plan.pdf>
- Imhoff M.L., Lawrence W.T., et al. (1997) - A Technique for Using Composite DMSP/OLS "City Lights" Satellite Data to Map Urban Area. *Remote Sensing of Environment* 61: 361-370.
- Kayaa S., Curranb P.J. (2006) - Monitoring urban growth on the European side of the Istanbul metropolitan area: A case study. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 8, Issue 1, January 2006, Pages 18-25

- Kocaman S., Zhang L., Gruen A., Poli D. (2006) - 3D City Modeling from High-Resolution Satellite Images. Proceedings of ISPRS Workshop on Topographic Mapping from Space, Ankara, Turkey, February 14-16, 2006. Proc. on CD-ROM.
- Mitchell J.K. (1995) - Coping with natural hazards and disasters in megacities: Perspectives on the Twenty-First Century, *GeoJournal*, Volume 37, Number 3 / November, 1995, pp. 303-311.
- Morena L.C., James K.V., Beck J. (2004) - An introduction to the RADARSAT-2 mission. *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 3, pp. 221-234, 2004.
- Noji E.K. (1997) - The Public Health Consequences of Disasters. Oxford University Press US, 1997 ISBN 0195095707, 9780195095708. 468 pages.
- Parker D., Mitchell J.K. (1995) - Disaster Vulnerability of Megacities - An expanding problem that requires rethinking and innovative responses. *GeoJournal*, Volume 37, Number 3 / November, 1995, pp. 295-301.
- Plaza A., Mueller A., Richter R., Skauli T., Malenovsky Z., Bioucas J., Hofer S., Chanussot J., Jutten C., Carrere V., Baarstad I., Kaspersen P., Nieke J., Itten K., Hyvarinen T., Gamba P., Dell'Acqua F., Benediktsson J.A., Schaepman M.E., Clevers J.G.P., Zagajewski B. (2007) - HYPER-I-NET: European research network on hyperspectral imaging. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. 23-28 July 2007 Page(s): 4790-4793.
- Polli D., Dell'Acqua F., Gamba P., Lisini G. (2008) - Remote sensing as a tool for vulnerability assessment. Proc. of the 6th International Workshop on Remote Sensing for Disaster Management Applications, Pavia, Italy, 11-12 September 2008. CD-ROM and online. URL: http://tlc.unipv.it/6_RSDMA/Finals/3.2%20-%20Dell%27Acqua.pdf
- Polli D., Dell'Acqua F., Gamba P. (2009) - First Steps Towards a Framework for Earth Observation (EO)-Based Seismic Vulnerability Evaluation. *Environmental Semeiotics*, (2009) 2(1), 16-30. DOI 10.3383/es. 2.1.2
- Polli D., Dell'Acqua F., Gamba P. (2010) - Seismic vulnerability assessment in the framework of GEO: a case study on Messina, Italy. Proceedings of GI4DM, 2-4 February 2010, Turin, Italy. On CD-ROM.
- Sanyal J., Lu X.X. (2005) - Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India. *Hydrological Processes*, Volume 19 Issue 18, Pages 3699-3716.
- Sohn G., Dowman I. (2007) - Data fusion of high-resolution satellite imagery and LiDAR data for automatic building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* Volume 62, Issue 1, May 2007, Pages 43-63
- Stasolla M., Gamba P. (2008) - Spatial Indexes for the Extraction of Formal and Informal Human Settlements From High-Resolution SAR Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Volume 1, Issue 2, June 2008 Page(s): 98-106
- USGS (2008) - Imagery for Everyone... Technical Announcement, U.S. Department of the Interior and U.S. Geological Survey, released 21st April 2008. [online] URL: http://landsat.usgs.gov/documents/USGS_Landsat_Imagery_Release.pdf
- Werninghaus R., Balzer W., Buckreuss St., Mittermayer J., Mühlbauer P. (2004) - The TerraSAR-X Mission, Proc. of EUSAR 2004, Ulm, Germany
- Wright T.J., Parsons B., England P.C., Fielding E.J., (2004) - InSAR Observations of Low Slip Rates on the Major Faults of Western Tibet. *Science* 9 July 2004, Vol. 305. no. 5681, pp. 236-239.