

## **Tecniche aerospaziali attive (LIDAR) e passive (multi/iperspettrali) per la stima della vulnerabilità sismica del tessuto urbano**

F. Borfecchia, L. De Cecco, M. Pollino, A. Lugari, S. Martini, L. La Porta

ENEA - Dipartimento ACS - Unità Osservazione della Terra e Sistemi Informativi Territoriali  
C.R. Casaccia, Via Anguillarese 301 - 00123 Roma  
Tel.: 06.3048.6042 - Fax: 06.3048.6038 - e-mail: borfecchia@casaccia.enea.it

### **Riassunto**

La stima estensiva della vulnerabilità del costruito esistente è un problema che si pone in particolare evidenza per il territorio italiano sul quale, nonostante il rilevante rischio sismico, la percentuale di abitazioni in edifici progettati e realizzati in assenza di prescrizioni sismiche adeguate supera di larga misura il 50%. Le attività di ricerca qui descritte riguardano lo sviluppo di metodologie e strumenti innovativi basati su dati aerospaziali, per l'analisi estensiva dei parametri geometrici e tipologici degli edifici in aree urbane a supporto della stima della loro vulnerabilità a sollecitazioni dinamiche di tipo sismico. Le metodologie sviluppate si basano sull'uso integrato di dati aerospaziali per la caratterizzazione di aree urbanizzate scelte nel comune sismico di Avellino mediante rilievi di tipo aerofotogrammetrico e LIDAR unitamente a dati multi/iperspettrali satellitari ed aerei. È stata dapprima ottenuta una stima estensiva dei parametri geometrici e delle caratteristiche planimetriche tridimensionali di ogni edificio nelle aree d'interesse, nonché dell'andamento del suolo. Tali risultati, integrati con rilevamenti campionari *in situ* e con altri dati aerospaziali, sono stati utilizzati con tecniche di "data mining" per una zonizzazione mirata delle aree d'interesse, da cui stimare, su base statistica, anche le caratteristiche strutturali di ogni singolo edificio. In tale contesto, i risultati preliminari ottenuti con reti neurali (Artificial Neural Network) appositamente configurate e calibrate hanno permesso di prevedere le caratteristiche strutturali degli edifici con buona accuratezza (>80%) a partire sia dai loro parametri geometrici, sia delle loro caratteristiche iperspettrali ricavate da dati a 30 bande appositamente rilevati con sensore AISA-Eagle.

### **Abstract**

*The extensive vulnerability assessment of the existent urban settlements is strictly required in many Italian regions where, despite the relevant seismic risk, the percentage of existent buildings designed without seismic prescriptions is higher than 50%. This paper describes the methodologies implemented for evaluating the geometrical and typological parameters of buildings in selected areas of Avellino (a seismic municipality in Southern of Italy), using different data remotely acquired by means of aero spatial platforms in order to support a suitably extensive estimation of seismic vulnerability at urban level. The activities have been based on integration of digital aerofotogrammetry and laser ranging (LIDAR) techniques devoted to 3-D reconstruction (containing buildings geometrical parameters) of selected test areas. In this framework, data acquired by LIDAR sensor have allowed to obtain both the ground DEM and the buildings heights and shape over entire administrative area of municipality of Avellino. These results were integrated with those derived from multi/hyper spectral techniques to achieve information about the structural typology of each building in the test areas by means different "data mining" approaches. In particular here the structural types of buildings have been estimated with 80% of accuracy using on purpose configured ANN (Artificial Neural Network). In such a way the integrated use of various*

*information, coming from the different techniques, has allowed to produce, for each building within the test areas, useful information in terms of geometrical and typological parameters to be used for their extensive vulnerability assessment.*

### **Introduzione**

L'Italia è uno dei paesi maggiormente interessato dal rischio sismico. Negli ultimi 2500 anni, infatti, sono stati ben 30.000 gli eventi sismici di intensità pari o superiore a IV-V grado che hanno interessato il nostro paese. Sebbene tutto il territorio nazionale sia stato interessato da sismi rilevanti, ad eccezione della Sardegna, la sismicità più elevata si registra lungo la dorsale appenninica. Nell'Appennino meridionale, il Beneventano e l'Irpinia sono state le zone tra le più colpite, con rari eventi sismici di forte entità (magnitudo compresa tra 6.5 e 7) ripetutisi più volte nel corso dei secoli. Le conseguenze di un forte terremoto sul tessuto sociale, economico, culturale e storico dell'area colpita, sono enormi, infatti, oltre a provocare la morte di un gran numero di persone, in molti casi il sisma distrugge interi paesi o ne danneggia profondamente il patrimonio storico e le strutture economico-sociali. In Italia, il rapporto tra i danni prodotti dai terremoti e l'energia rilasciata nel corso degli eventi è molto più alto rispetto a quello che si verifica normalmente in altri Paesi ad elevata sismicità, quali la California o il Giappone. Ad esempio, il terremoto del 1997 in Umbria e nelle Marche ha prodotto un quadro di danneggiamento (senza tetto: 32.000; danno economico: circa 10 miliardi di Euro) confrontabile con quello della California del 1989 (14.5 miliardi di \$ USA), malgrado fosse caratterizzato da un'energia circa 30 volte inferiore. Ciò è dovuto principalmente all'elevata densità abitativa e alla notevole fragilità del nostro patrimonio edilizio. Uno studio prodotto dal Servizio Sismico Nazionale da cui sono tratte le tabelle riassuntive riportate (Tab. 1-2) ha evidenziato che il 10% del patrimonio abitativo del 64% dei comuni italiani è ad elevata vulnerabilità. In un arco di 100 anni, nel 31% dei comuni italiani almeno il 10% delle abitazioni sarebbero rese inagibili da un evento sismico. Una stima approssimativa valuta che vi possano essere circa 800 vittime/anno ed oltre 1 miliardo di euro i danni diretti derivanti da sismi.

**Tabella 1- I NUMERI DELLA CLASSIFICAZIONE SISMICA IN ITALIA (1984)**

Comuni sismici	Superficie sismica del territorio (%)	Popolazione residente nei comuni sismici	Abitazioni con progetto antisismico
37%	45%	40%	35%

Fonte dati: Servizio Sismico Nazionale

**Tabella 2- ABITAZIONI SISMICAMENTE PROTETTE NELLE ZONE CLASSIFICATE**

Italia	Nord	Centro	Sud
35%	30%	27%	39%

Fonte dati: Servizio Sismico Nazionale

In questo contesto la stima della vulnerabilità del costruito esistente è un problema di particolare evidenza per il territorio italiano, sul quale la percentuale di abitazioni in edifici progettati e realizzati in assenza di prescrizioni sismiche adeguate supera di larga misura il 50%. Pertanto risulta importante mettere a punto efficaci strumenti per analisi estensive, tempestive e ripetitive del tessuto urbano esistente in modo da ricavarne i parametri più significativi geometrici e tipologici che, uniti a quelli dei suoli, permettano stime efficaci di vulnerabilità da utilizzare per il miglioramento delle metodologie di prevenzione ed a supporto delle politiche di pianificazione territoriale e della eventuale gestione post-evento.

### Metodologia e risultati

Le informazioni basilari necessarie per la stima di vulnerabilità degli edifici sono costituite principalmente da quelle relative alla loro geometria tridimensionale (principalmente la rispettiva altezza o numero di piani) ed al tipo di tecnica costruttiva adottata. In quest'ottica tenendo conto delle necessità di stime estensive e delle premesse illustrate precedentemente è stata implementata e messa a punto una metodologia con l'obiettivo di rispondere ad entrambe queste esigenze utilizzando dati telerilevati da piattaforme aerospaziali. In particolare, come sintetizzato in Figura 1, la valutazione estensiva dei parametri geometrici è stata effettuata con tecnologia attiva LIDAR supportata da tecniche aerofotogrammetriche mentre per le tipologie edilizie sono stati utilizzati anche dati telerilevati iper/multispettrali con metodologie di "data mining", l'impiego di tecniche GIS e di adeguate calibrazioni tramite rilievi a terra hanno permesso stime di dettaglio (scala 1:2000) a livello di ogni singolo edificio, adeguate a supportare efficacemente politiche decisionali e pianificazioni d'interventi mirati.

Sebbene per edifici in cemento armato che rappresentano la maggior parte del patrimonio edilizio presente sul territorio italiano, sia possibile una stima più rigorosa di vulnerabilità intesa come

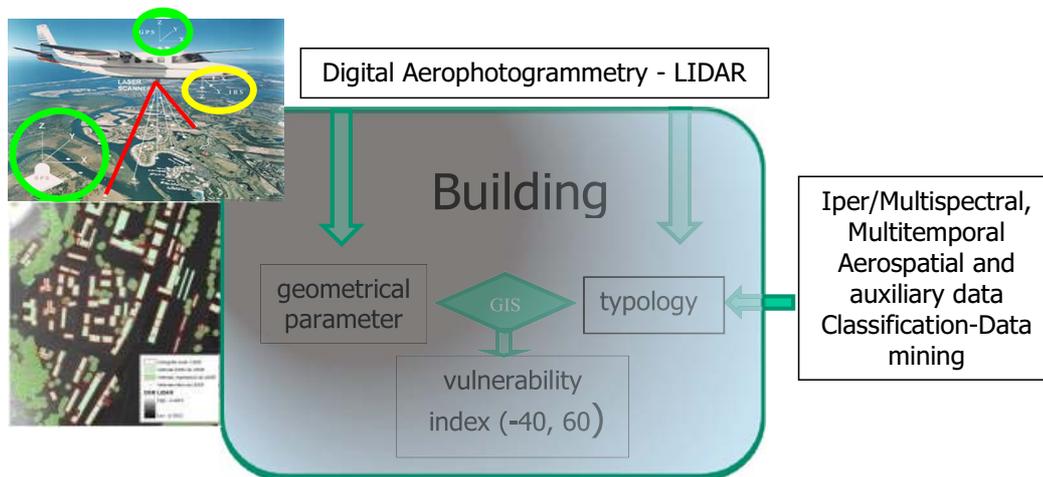


Figura 1- Schema della metodologia per la stima della vulnerabilità sismica degli edifici da dati telerilevati aerospaziali

probabilità di danneggiamento derivante dalle relative curve di fragilità definite analiticamente per strutture standard, la rilevante presenza di costruzioni in muratura specialmente negli abitati appartenenti all'ampio patrimonio storico, spesso con valenze culturali notevoli, giustifica un approccio semplificato globale per stime di prima approssimazione basate sull'indice di vulnerabilità  $I_v$ , definito tramite l'analisi statistica dei danni sull'edificato inventariati a seguito dei vari eventi sismici avvenuti (Giovinazzi, Lagomarsino, 2001) su base regionale. Tale indice si basa

Typ.	Cod.	Epoca Costruzione	$I_v$	Manutenzione	N° Piani			Agglomerato
					1-2-3	4-5-6	6+	
Muratura	M6	Dal 1946 al 1971	30	6		5	10	6
		Dopo il 1971	20			5	10	6
Cemento Armato	PC1	Prima della classificazione sismica (<2000)	20		-6		6	6
	RC2	Dopo la classificazione sismica (>2000)	0		-6		6	

Tabella 3- Indici di vulnerabilità e modificatori per le tipologie presenti nella zona d'interesse

in primis sulla tipologia delle costruzioni, divise in macro-gruppi, tra i quali quelli maggiormente rappresentativi sono costituiti dal cemento armato e dalla muratura. Per la situazione in esame, nell'ambito degli edifici in muratura risultano più importanti quelli realizzati in mattoni pieni e quelli in muratura non armata con solai in c.a., mentre per le realizzazioni completamente in c.a. è necessario distinguere quelle costruite con specifiche antisismiche dopo il 2000 dalle altre. L'indice  $I_v$  risulta maggiore per le strutture più deboli e suscettibili di essere maggiormente danneggiate ed ha un intervallo che può andare da -50 a 60. Oltre che alla tipologie edilizie,  $I_v$  è legato anche ad altri parametri degli edifici, soprattutto a quelli geometrici che ne determinano le modalità di risposta all'onda sismica. A titolo d'esempio, nella Tabella 3 sono riportate, per le due tipologie prevalenti nella zona d'interesse, gli indici di vulnerabilità medi ( $I_v$ ) per epoca di costruzione ed i relativi modificatori, dipendenti dal livello di manutenzione, dall'altezza (espressa in numero di piani) e dall'appartenenza o meno ad agglomerati. Oltre a questi parametri, altri modificatori proposti riguardano la simmetria in elevazione ed in pianta della struttura e le caratteristiche dei suoli sottostanti. Quindi nel caso specifico, oltre alle informazioni relative alla tipologia ed allo stato della costruzione, risulta importante avere anche informazioni su altezza superficie e forma degli edifici

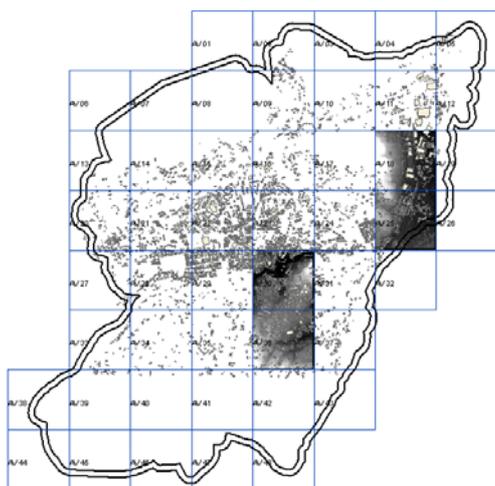


Figura 2 – Confini del Comune di Avellino con distribuzione dell'edificato e quadro d'unione dei rilievi LIDAR. Per le aree di test è visualizzato in toni di grigio il DSM.

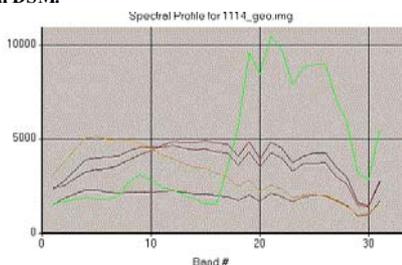


Figura 3 – Firme iperspettrali di coperture di edifici (tonalità del rosso) e vegetazione (verde) nelle aree d'interesse.

n. band	c-λ (nm)	FWHM
1	402,01	2,3
2	417,61	2,3
3	436,61	2,3
4	455,61	2,3
5	474,61	2,3
6	493,61	2,3
7	512,61	2,3
8	531,61	2,3
9	550,61	2,3
10	569,61	2,3
11	588,61	2,3
12	607,61	2,3
13	626,61	2,3
14	645,61	2,3
15	664,61	2,3
16	683,61	2,3
17	702,61	2,3
18	721,61	2,3
19	740,61	2,3
20	759,61	2,3
21	778,61	2,3
22	797,61	2,3
23	816,61	2,3
24	835,61	2,3
25	854,61	2,3
26	873,61	2,3
27	892,61	2,3
28	911,61	2,3
29	930,61	2,3
30	949,61	2,3
31	968,61	2,3

Tabella 4 – Caratteristiche spettrali delle bande di acquisizione del sensore AISA-Eagle

presenti nel tessuto urbano di interesse, da cui derivare i parametri modificatori geometrici della Tabella 3. Da un rilievo LIDAR effettuato nel 2007 da elicottero tramite un'apparecchiatura Optech ALTM 3100

sull'intero comune di Avellino con un'accuratezza di 4 punti al metro quadro ed un piano di volo adeguato ad ottimizzare la restituzione tridimensionale degli edifici nelle aree urbanizzate sono state estratti tramite metodologie appositamente implementate e calibrate sulle aree d'interesse sia il DEM (Digital Elevation Model) del suolo sia le altimetrie in corrispondenza degli edifici (DSM-Digital Surface Model) ad adeguata risoluzione. Da quest'ultime, tenendo conto dell'andamento del suolo è stato poi possibile derivare

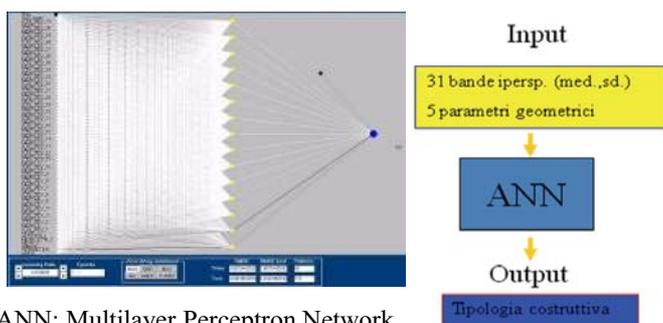
estensivamente il numero di piani per ogni singolo edificio. I dati LIDAR, opportunamente elaborati, oltre a consentire una migliore definizione piano altimetrica degli edifici, sono utilizzati sia per la caratterizzazione delle loro coperture sia per l'individuazione della distribuzione della vegetazione nelle aree d'interesse (Figura 1). In contemporanea ai rilievi LIDAR è stata acquisita una copertura con camera digitale a colori utilizzata poi per produrre un'ortofotocarta dell'intero territorio comunale con risoluzione di 20 cm a terra. Da

ultimo sono stati effettuati i rilievi iperspettrali in bande dall'ottico al NIR (Near-Infrared) tramite camera AISA-Eagle in grado di riprendere sino a 244 bande da 400 a 1000 nm. Per l'ottimizzazione dei rilievi e tenendo conto dell'elevata correlazione delle riprese spettralmente contigue il range di acquisizione è stato diviso in 31 bande equispaziate ( tabella 4).

Le firme spettrali delle coperture dei singoli edifici ottenute da tali dati (Figura 3) sono state utilizzate in modo integrato con i prodotti ottenuti per via aerofotogrammetria e da LIDAR per una stima delle tipologie edilizie delle aree d'interesse. A tal fine sono state implementate ed utilizzate metodologie di "data mining", in particolare reti neurali (ANN- Artificial Neural Network) ed alberi decisionali (Decision Trees), calibrate e validate tramite appositi rilievi a terra acquisiti in contemporanea a quelli LIDAR (Tabella 5). Tenendo conto che le tipologie edilizie adottate sono notevolmente correlate all'epoca di costruzione dei manufatti, come sintetizzato anche nella tabella 3, sono state utilizzati dati telerilevati multispettrali della serie storica Landsat MSS/TM-ETM unitamente a quelli ad alta risoluzione a terra Quick\_Bird per la produzione di mappe tematiche dell'evoluzione temporale dell'urbanizzato nelle aree d'interesse (Figure 5, 6) al fine di

Cod.	N. edifici
PC1	38
RC2	189
M6	6

Tabella 5 – Campionamento tipologie edilizie a terra



ANN: Multilayer Perceptron Network

Backpropagation Learning:  
 Epoch =51.9; Hidden:15  
 RMSE TRAIN < 0.00750; R²=0.97  
 RMSE TEST < 0.28004; R²=0.65

Figura 4 – Schema della rete ANN utilizzata e parametri ottenuti con i dati dell'area test

d'esempio è riportato lo schema (Figura 4) della rete ANN utilizzata per stimare le tipologie edilizie dell'area di test partendo dai dati a terra su 233 edifici facendo uso sia delle firme iperspettrali che dei parametri geometrici relativi ad ogni edificio, con un'accuratezza risultante di oltre l'85% (Tabella 6). Mentre in Figura 7 è riportata una mappa finale relativa alla distribuzione di vulnerabilità calcolata secondo la Tabella 3. Come si vede la rete ANN è stata trainata su un campione di 60 edifici mentre la sua validazione è stata effettuata sui rimanenti 173. Tre sono state le tipologie edilizie individuate di cui una in muratura le altre 2 in C.A. (antisismico e non) con una dipendenza significativa dall'epoca di costruzione.

N. Edifici : 233					
Tipologie :3					
N. Train: 60					
N. Test: 173					
	TP	1	2	3	n.t.
	PC1	22	4		26
	RC2	5	133	2	140
	M6		5	1	7

Tabella 6 – Dati di calibrazione e test della rete ANN con accuratezza ottenuta (>85%) sull'area campione di Avellino.

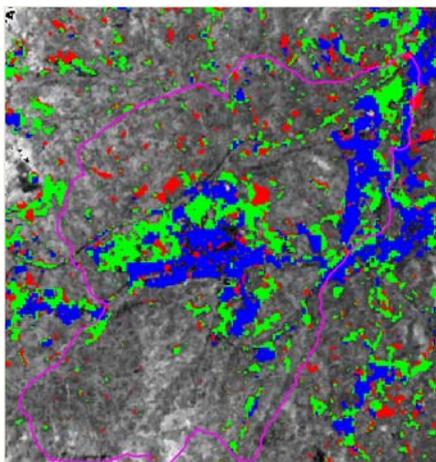


Figura 5 - Evoluzione dell'urbanizzato del Comune di Avellino, ricavata tramite analisi della serie storica Landsat MSS (blu-1975), TM (verde-1993) ed ETM (rosso-2000), con approccio SMA (Spectral Mixture Analysis). Sfondo: TM-B4 e confini comunali in viola

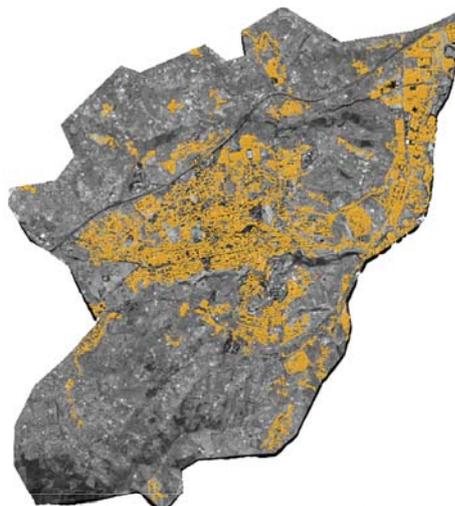
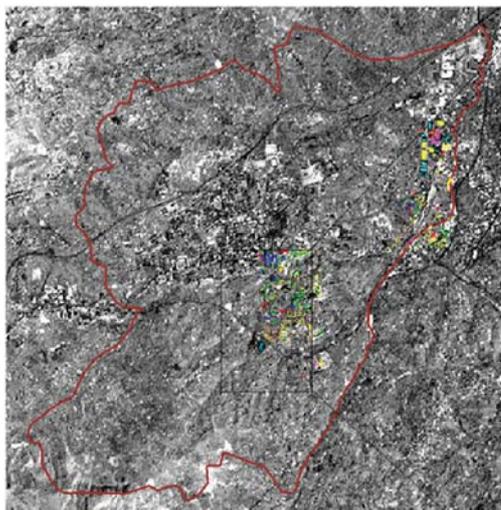


Figura 6 - Distribuzione dell'urbanizzato (in giallo) ottenuta per classificazione (ML) di dati QuickBird acquisiti nel Maggio 2006. Visualizzazione in sovrapposizione al canale pancromatico

Figura 7  
Stima della vulnerabilità dell'edificato



Ipotesi di stima della vulnerabilità ( $I_v$  = Indice di vulnerabilità) per l'edificato delle aree di test sulla base di altezza (n° piani) e tipologia (ricavata dall'epoca di costruzione) di ogni singolo edificio. Sfondi: Landsat ETM-Pan (2000) e QuickBird (2006)



		Numero piani			
		Medi	1-2	3-4-5	6+
Cemento Armato	Prima della classificazione sismica (<2000)	20	14	20	25
	Depo la classificazione sismica (>2000)	0	6	0	0