

Modellizzazioni GIS tridimensionali e integrazione di fonti per la gestione dei rischi geodinamici

Cristiano Pesaresi ^(a), Diego Gallinelli ^(b), Davide Pavia ^(c)

^(a) Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, cristiano.pesaresi@uniroma1.it

^(b) Università degli Studi Roma Tre, Via Ostiense 234, d.gallinelli@os.uniroma3.it

^(c) Sapienza Università di Roma, Piazzale Aldo Moro 5, davide.pavia@uniroma1.it

Il presente lavoro – caratterizzato dall'uso integrato di ArcGIS Desktop e relative estensioni (ArcGIS 3D Analyst e ArcGIS Spatial Analyst) e ArcGIS Pro – focalizza l'attenzione sull'utilizzo dei modelli tridimensionali in ambiente GIS per l'analisi dei territori soggetti a eventi di geodinamica endogena¹.

Mediante integrazione di fonti multiple cartografiche e satellitari, grazie all'uso combinato di dati raster e vettoriali e tramite apposite funzionalità e tecniche di estrusione, si è perseguito l'obiettivo di produrre molteplici applicazioni, incentrate sulle province di L'Aquila e Napoli, come supporto per la gestione dei rischi sismici e vulcanici, nel pre e post evento. Tali applicazioni hanno permesso di restituire rappresentazioni tridimensionali delle componenti fisico-morfologiche e antropiche, attraverso le quali ottenere e generare una serie di informazioni *ad hoc*.

Nel caso di L'Aquila, colpita dal terremoto del 6 aprile 2009 (MI 5,8; Mw 6,3), si è pervenuti a una modellizzazione 3D volta a raffigurare e a quantificare gli edifici per esito di agibilità e per periodo di costruzione, fornendo input su possibili fattori di debolezza strutturale riscontrabili in altre zone d'Italia e cercando di valutare l'esistenza di una relazione diretta tra fasi temporali di edificazione e livello di danneggiamento. Sembra, infatti, che in Italia eventi di magnitudo intorno a 6 determinino indistintamente sul territorio conseguenze nefaste, amplificate rispetto all'energia sprigionata da motivi connessi con la scarsa qualità dei materiali e con la non osservanza di appropriati criteri edificatori². In un precedente lavoro era stato, del resto, evidenziato che: "Quello di L'Aquila è, [...], solo un altro dei tristi episodi verificatisi a seguito di un evento sismico, ma in assenza di rigorose e sistematiche linee di intervento, volte a far rispettare le normative vigenti tese alla verifica e all'adeguamento sismico dell'esistente e alla messa in atto di apposite norme tecniche per rendere più robuste le nuove abitazioni, non sarà certo l'ultimo" (Pesaresi, Nebbia, 2010, p. 33). E tale eventualità si è puntualmente ripetuta il 24 agosto 2016 quando un terremoto di magnitudo (locale e momento) 6,0 – con epicentro presso Accumoli, in provincia di Rieti – ha colpito il Centro Italia³, con coinvolgimento delle province di Perugia, Ascoli Piceno, L'Aquila e Teramo, provocando ~300 vittime e rovinosi

¹ Tale ricerca si contestualizza nell'ambito dei due progetti "GIS4RISKS. Synergic use of GIS applications for analysing volcanic and seismic risks in the pre and post event" e "3D and 4D Simulations for Landscape Reconstruction and Damage Scenarios. GIS Pilot Applications". C. Pesaresi ha scritto il paragrafo introduttivo; D. Gallinelli il secondo; D. Pavia il terzo.

² Relativamente ai danni prodotti dal terremoto di L'Aquila 2009 e all'impatto sul territorio si vedano ad esempio: Ciranna, Vaquero Piñeiro, 2011; Reggiani, 2011; Calderoni et al., 2012; Pesaresi, Gallinelli, in corso di stampa.

³ <http://terremoti.ingv.it/it/ultimi-eventi/1001-evento-sismico-tra-le-province-di-rieti-e-ascoli-p-m-6-0-24-agosto.html>; http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/terremoto_centro_italia_2016.wp.

danni, accresciutisi successivamente con i terremoti del 26 (ML e Mw 5,9) e del 30 ottobre (ML 6,1 e Mw 6,5) e poi del 18 gennaio 2017 (con alcuni eventi di magnitudo superiore a 5)⁴. Il terremoto di L'Aquila – che ha sconvolto altri 56 comuni, provocando oltre 300 vittime – ha, dunque, rappresentato un evento di grande importanza per la ricerca e la pianificazione territoriale, poiché attorno a esso possono ruotare riflessioni e spunti per ricavare dati e linee di indirizzo con cui opporsi al perpetuarsi di disastrosi livelli di danneggiamento.

Per l'area di Napoli (Città metropolitana) si è giunti a una modellizzazione 3D per destinazione d'uso degli edifici e all'analisi diacronica della densità edilizia, in modo da simulare scenari socio-economici di danno legati a potenziali attività eruttive⁵. Tale area, contrassegnata dai fuochi dei Campi Flegrei e del complesso Somma-Vesuvio, che conferiscono al paesaggio connotati di grande suggestione e attrattività, si contraddistingue a livello europeo per gli elevatissimi valori di rischio vulcanico legati a una esorbitante pressione antropica e a una capillare saturazione degli spazi, per la continua e vertiginosa crescita delle superfici artificiali⁶. Pertanto, valori così alti di esposizione si traducono – a ogni registrazione di eventi sismici, anche di bassa magnitudo – in diffusi allarmismi sul possibile movimento delle masse magmatiche che, in caso di effettiva riattivazione dei meccanismi eruttivi di tipo esplosivo, si tradurrebbe in una catastrofe sociale su vasto raggio. A fronte di una costante e diversificata attività di monitoraggio (dei parametri sismici, geodetici, magnetici, geochimici ecc.), la rilevazione di eventuali anomalie tende a scuotere sensibilmente e a intaccare quella corteccia percettiva che in condizioni di normalità sembra sopita, in quanto il concomitante verificarsi di più segni precursori (ad esempio accentuazione dell'attività sismica e deformazioni-sollevamenti del suolo) fa scattare delicati e complessi meccanismi interpretativi e decisionali⁷. Da qui deriva l'esigenza di produrre numerose elaborazioni da mosaicare e sovrapporre per far emergere elementi di fragilità e criticità, proporre possibili procedimenti da mettere in atto, redigere condivise linee guida cui attenersi per una più confacente utilizzazione degli spazi e in circostanze di allarme.

Obiettivo comune, sia nel caso di L'Aquila, sia per l'area di Napoli, è stata la definizione di procedure operative fatte di step sequenziali che possano essere replicate in altri contesti anche nell'ottica di pervenire a quadri conoscitivi omogenei e comparabili. Perseguendo questa prospettiva, le modellizzazioni GIS tridimensionali hanno permesso di ricavare, relazionare e raffigurare con efficacia estetico-comunicativa dati provenienti da varie fonti, raccordati in un ambiente armonico di rappresentazione e analisi geospaziale e multitemporale.

Modellizzazioni GIS 3D per analisi successive al terremoto di L'Aquila 2009

Il primo step della ricerca – condotta su una vasta porzione del comune di L'Aquila (quasi 27 kmq) – è consistito nel ricostruire nel dettaglio l'evoluzione

⁴ Per approfondimenti sulle sequenze registrate e su relativi modelli interpretativi cfr. ad esempio: Bonini et al., 2016; Cheloni et al., 2017; Chiaraluce et al., 2017.

⁵ Come ulteriori lavori cfr.: Pesaresi, Pavia, 2017, 2018.

⁶ Si vedano: Petrosino et al., 2004; Pesaresi et al., 2008; Pesaresi, Scandone, 2013.

⁷ Ne sono stati esempi eloquenti i fenomeni bradisismici avvenuti nel 1970-1972 e nel 1982-1985 ai Campi Flegrei (Gasparini, 2013; Luongo, 2013; Martini, 2013).

urbanistica del territorio servendosi di fonti plurime: la tavoletta dell'Istituto Geografico Militare del 1955 "L'Aquila, F.º. 139, II S.E."; 8 tavole del Piano Regolatore Generale del 1975⁸; ortofoto ad alta risoluzione disponibili sul sito del Geoportale Nazionale del 1988 e 1994 in bianco e nero e del 2000, 2006 e 2012 a colori; la *basemap* "Imagery", presente in ArcMap come servizio di visualizzazione, costituita da un mosaico di ortofoto di recente acquisizione e per questo servita come riferimento successivo al 2012.

L'analisi delle fonti cartografiche (appositamente georeferenziate) e delle ortofoto di periodi adiacenti ha permesso di individuare, mediante sovrapposizione di differenti strati informativi, il periodo nel quale le strutture presenti sul territorio sono state costruite. È seguita, poi, la digitalizzazione degli edifici per creare dei poligoni che ricalcassero la forma degli stessi, per un censimento totale di quasi 6.000 strutture. Ogni poligono è stato inserito in una delle 8 classi definite per suddividere il periodo di studio, che va da prima del 1955 a dopo il 2012⁹.

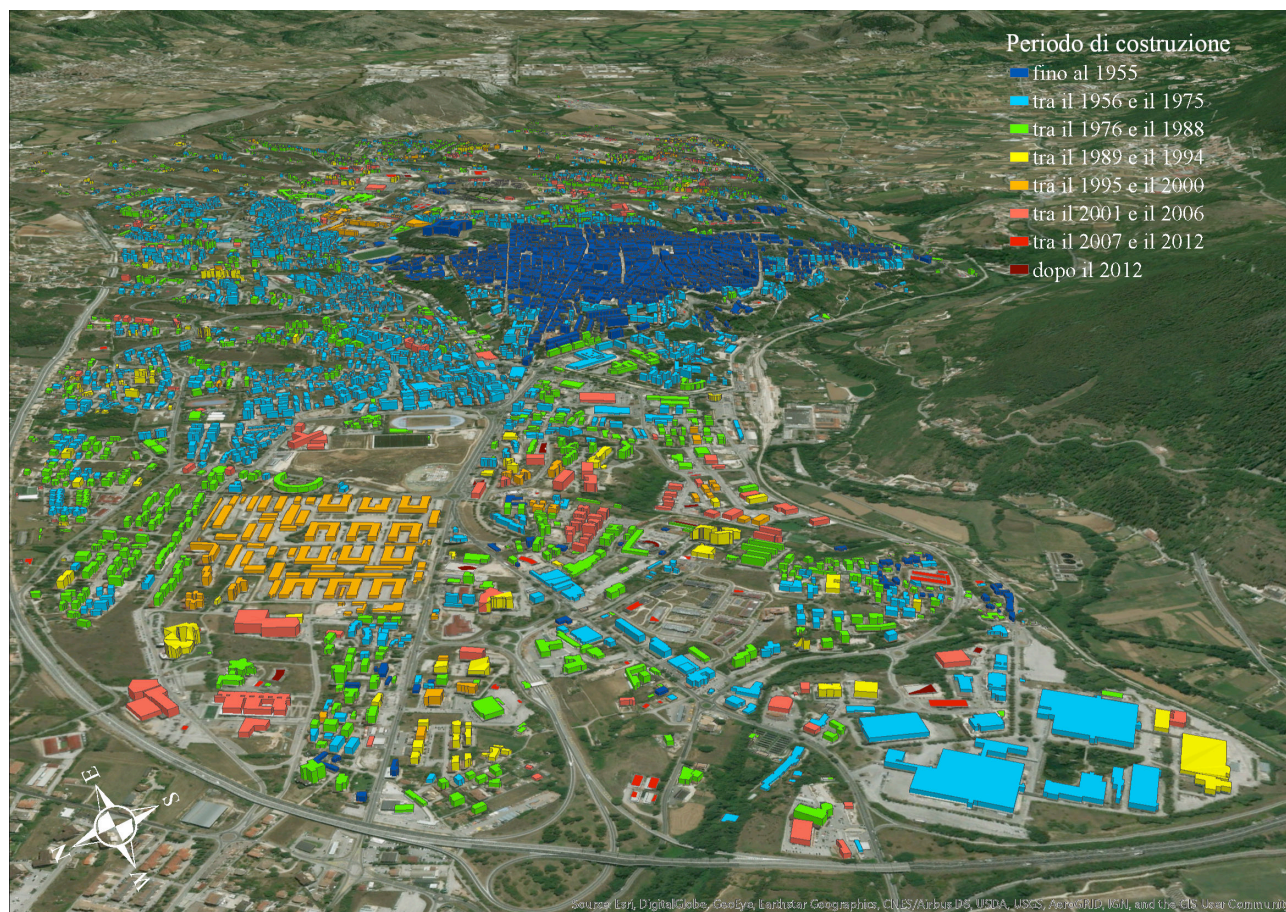


Figura 1 – Processo edificatorio in 3D, per periodi di costruzione, a L'Aquila. Elaborazione originale.

L'elaborazione finale (fig. 1) ha delineato, quindi, le differenti fasi di sviluppo del comune di L'Aquila ed evidenzia le tendenze edificatorie che si sono succedute nel corso dei decenni. Dalla cartografia prodotta si evince come l'edificazione inizialmente confinata nel centro storico ("fino al 1955", con il 26% dei mq costruiti rispetto ai mq totali) e, successivamente, sviluppatasi per lo più

⁸ Le tavole del PRG sono state fornite dal servizio urbanistica del comune di L'Aquila.

⁹ Cfr.: Pesaresi, Gallinelli, in corso di stampa.

intorno allo stesso ("dal 1956 al 1975", con il 29% dei mq totali), da metà degli anni '70 sia stata "poco omogenea". Gli edifici appartenenti alle classi di edificazione, infatti, si distribuiscono sul territorio in maniera "sparsa". Più concentrate in una determinata area, invece, sono alcune costruzioni realizzate a seguito del sisma del 2009, situate prevalentemente nella zona sud-est.

Nella seconda fase ci si è serviti della CTRN del 2005 (disponibile come dato *open source* sul sito del Geoportale della Regione Abruzzo) per il calcolo dell'altezza degli edifici e la loro relativa estrusione per la visualizzazione in 3D. La tabella attributi della CTRN possiede, infatti, due campi relativi alla quota di gronda e di piede delle strutture e dalla differenza dei due valori è stato derivato il nuovo campo "altezza".

Questo dato, relativo appunto all'altezza degli edifici, è stato fondamentale sia per conferire tridimensionalità all'elaborato, riuscendo a ottenere una resa scenica più realistica, sia per analizzare quantitativamente i mc edificati per ogni periodo di edificazione¹⁰. L'estrusione delle strutture precedentemente editate permette di comprendere in maniera più analitica l'evoluzione edilizia e favorisce una lettura immediata del fenomeno. Viene dato risalto anche al contesto geografico di L'Aquila, situata in un'estesa conca tra rilievi. Si nota, inoltre, come il centro storico sia stato costruito su un'altura e come la trama dell'edificato sia nettamente più densa in confronto all'area circostante.

Il terzo step è stato finalizzato ad acquisire e rielaborare i dati forniti dalla Protezione Civile (in formato *.shp*) riguardanti gli esiti di agibilità¹¹ per valutare eventuali relazioni dirette tra periodo di edificazione e danni riportati dalle strutture. Attraverso attività di *data cleaning* e *query* sono state selezionate le costruzioni in situazione di criticità più evidente, tanto da essere inserite nelle classi definite inagibili, ossia di classe E (edifici inagibili per rischio strutturale, non strutturale o geotecnico) e di classe F (edifici inagibili per grave rischio esterno). A questo punto sono stati enucleati quei poligoni precedentemente editati per la ricostruzione delle fasi di edificazione e coincidenti con i poligoni della Protezione Civile rientranti nelle classi di agibilità E e F, in modo da visualizzare solamente le strutture inagibili ripartite per periodi di edificazione (fig. 2). Confrontando la figura 1 con la figura 2 è possibile osservare gli ingenti danni causati dal terremoto del 2009 soprattutto nel centro storico e relativamente al periodo di costruzione "1956-1975".

La creazione di scenari 3D porta a notevoli vantaggi e conferisce all'analisi caratteri di maggiore esaustività. Per esempio, considerando sia gli aspetti morfologici sia la variabile legata al volume degli edifici, la tridimensionalità: permette di stimare la reale portata dei danni e di valutare i costi legati alla ricostruzione (Daniyal, 2012); consente di isolare le strutture di una certa altezza, che sono più suscettibili alle scosse sismiche e quindi di effettuare analisi di prevenzione (Yalciner, 2007); offre ambienti di simulazione fortemente realistici perché viene enfatizzato l'aspetto fisico del territorio che, invece, rimane ovviamente schiacciato nella prospettiva 2D (Luo et al., 2011).

¹⁰ Il calcolo dei mc non è stato possibile per le classi "2007-2012" e "dopo il 2012" poiché non disponendo di una CTRN aggiornata agli ultimi anni le misure calcolate arrivano fino al 2005.

¹¹ I rilievi sono stati eseguiti dal Dipartimento Comando e Controllo della Protezione Civile nelle fasi successive al sisma per quantificare e censire gli edifici maggiormente colpiti.

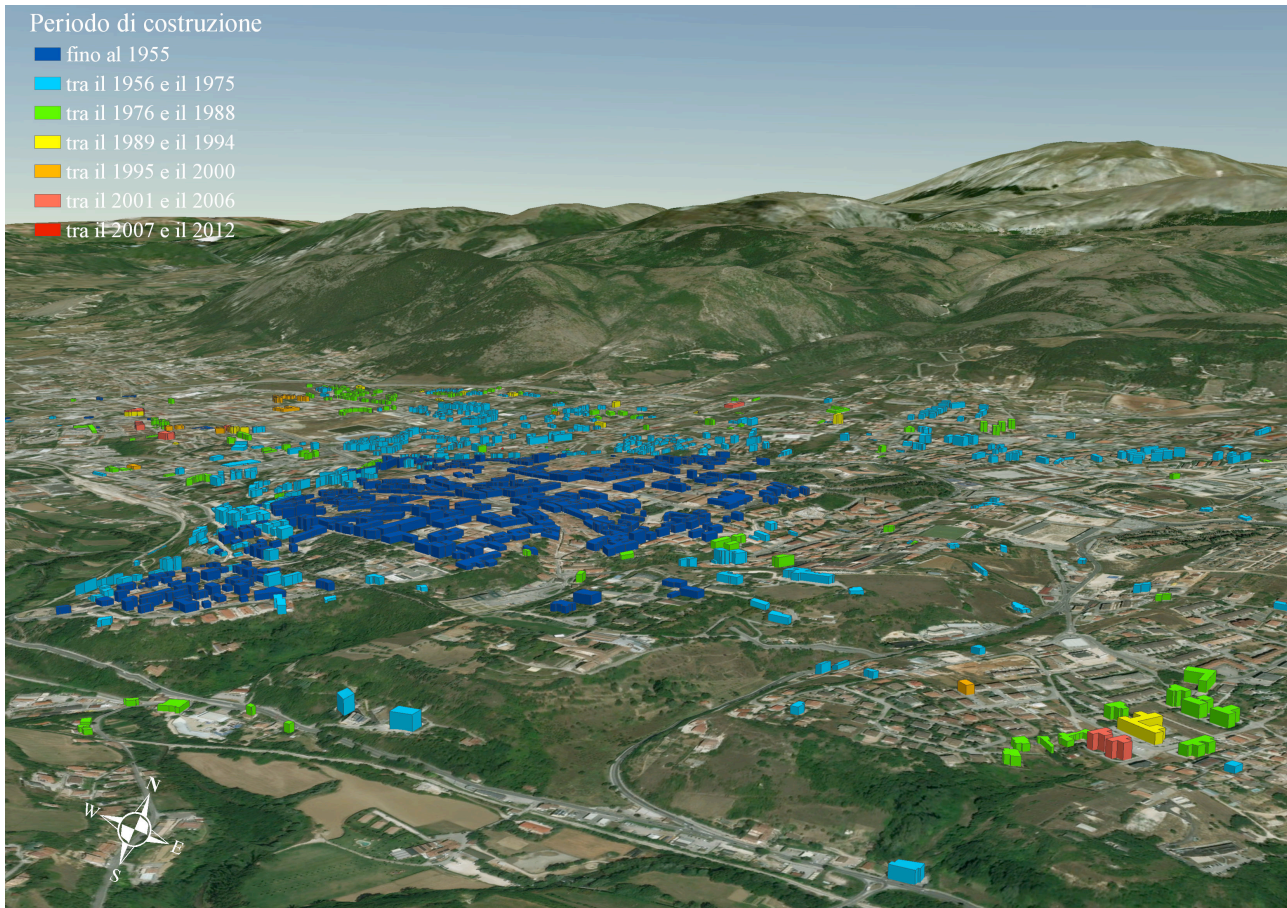


Figura 2 – Costruzioni inagibili (classi E e F) in 3D, per periodi di costruzione, a L'Aquila. Elaborazione originale.

Modellizzazioni GIS 3D per scenari di danno preventivi nell'area di Napoli

Per supportare la predisposizione delle fasi precedenti all'emergenza vulcanica ed effettuare stime di danno preventive, la ricerca ha condotto alla realizzazione di scene tridimensionali dell'area di Napoli, dedotte dall'integrazione di diverse banche dati in grado di fornire informazioni di carattere quantitativo e qualitativo sugli elementi naturali e antropici del contesto d'indagine¹².

Oltre alle carte storiche¹³, da cui derivare l'andamento evolutivo della densità edilizia, è stata utilizzata la CTR vettoriale del 1998 (la più recente disponibile al momento dello studio), suddivisa in 402 file (.dwg) di circa 10 kmq, il DSM della provincia di Napoli, prodotto da rilievi Lidar (volo 2009-2012), e il DTM di 10 metri (Tarquini et al., 2007, 2012). A garanzia di una migliore integrità e gestione delle sue caratteristiche, il materiale utilizzato è stato raccolto e mosaicato in un *ESRI File Geodatabase*; durante questa fase migratoria, condotta in serie tramite processi Python, le immagini e i vettori sono stati proiettati in un comune sistema di coordinate lineare.

¹² Cfr. pure: Pesaresi, Pavia, 2017, 2018.

¹³ Per la ricostruzione della densità edilizia del XIX secolo sono stati utilizzati 7 dei 15 fogli della "Carta Topografica ed Idrografica dei contorni di Napoli Levata per ordine di S.M. Ferdinando I: Re del Regno delle due Sicilie dagli ufficiali dello Stato Maggiore e dagli ingegneri topografi negli anni 1817. 1818. 1819."; per quella del XX secolo, 27 tavolette dell'IGM.

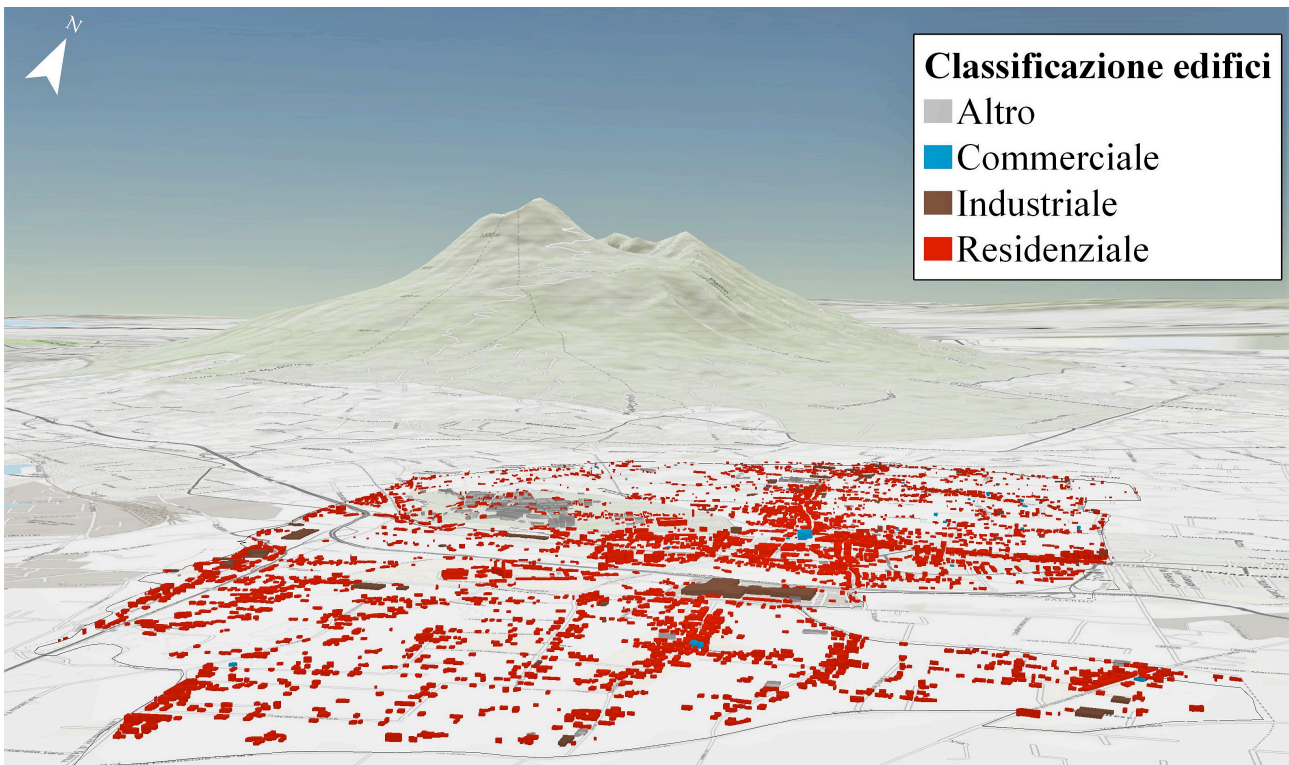


Figura 3 – Rappresentazione in 3D degli edifici di Pompei per destinazione d’uso. Elaborazione originale.

Altezza e volume dell’edificato derivano dalla combinazione tra le immagini e i vettori: se infatti i due modelli digitali hanno un riferimento intrinseco alla quota delle celle, i poligoni della CTR sono sprovvisti di attributi relativi all’asse Z; considerando il dato come la differenza di quota tra il DSM e il DTM, si è proceduto vettorializzando le due immagini in punti quotati, uniti successivamente ai poligoni coincidenti. Il dato vettoriale è stato successivamente sovrapposto alla *basemap* “Topographic” ed estruso in una scena di ArcGIS Pro, prima di essere tematizzato tramite i valori di destinazione d’uso principali (“Residenziale”, “Commerciale”, “Industriale”, “Altro”).

Il risultato, qui prodotto per i comuni di Pompei e Boscoreale a titolo esemplificativo (figg. 3 e 4), è uno spaccato plastico dell’area di studio, capace di comunicare efficacemente il posizionamento e la composizione della vasta gamma di strutture (localizzate alle falde del complesso Somma-Vesuvio) che creano condizioni di forte compressione e congestione edilizia e accrescono sensibilmente i valori di rischio vulcanico. Alla modellazione del paesaggio derivante dalle superfici, in grado di coinvolgere l’osservatore in uno scenario realistico e completamente navigabile, si aggiungono le informazioni offerte dai vettori sulle singole entità presenti, restituendone gli attributi e tematizzandone le geometrie. Nell’ambito di uno scenario d’emergenza, tali strumenti trovano applicazione nei processi decisionali e nella programmazione strategica – scelta dei punti di raccolta della popolazione, censimento delle aree a rischio ecc. – e nella valutazione dei danni (ad esempio la quantificazione dei volumi interessati dall’evento per destinazione d’uso). Oltre a una più incisiva resa grafica dell’area interessata, un simile scenario si presta all’uso di una serie di funzioni atte a

quantificare zone d'ombra, esposizione solare, traiettorie di visibilità. Si tratta di vantaggi che spiegano la propensione a coadiuvare la visione olistica dei GIS con il dettaglio "atomico" dei BIM (Fosu et al., 2015), specie nell'ambito: della pianificazione strategica e delle *smart cities* (Yamamura et al., 2017), dove una rilettura funzionale dell'urbanizzato rappresenterebbe un utile fattore in termini di prevenzione, decongestionamento, reazione e resilienza; della ricerca geografico-archeologica (Landeschi, 2018), in quanto il valore dei beni e dei reperti, in termini monetari e sociali, è spesso trascurato nelle stime di danno e nelle analisi delle possibili perdite attese.

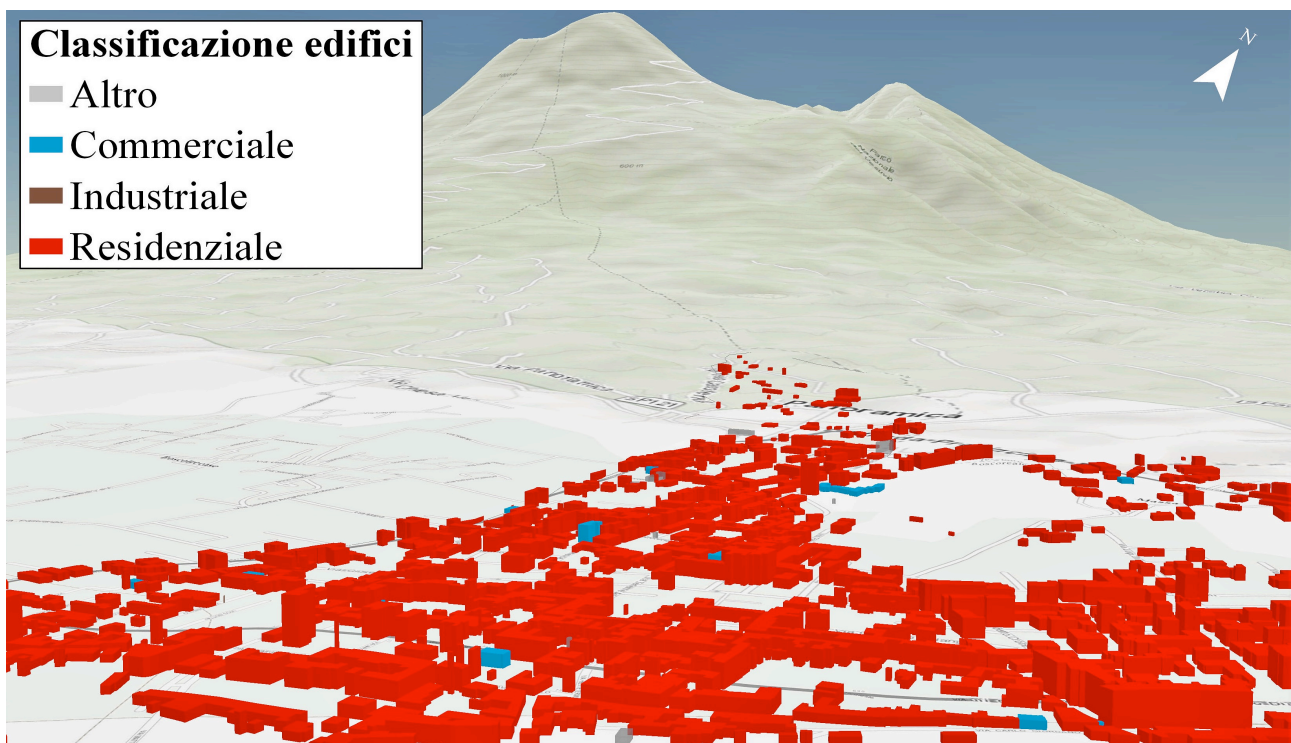


Figura 4 – Rappresentazione in 3D degli edifici di Boscoreale (particolare) per destinazione d'uso. Elaborazione originale.

Bibliografia

- Bonini L. et al. (2016), "Imaging the tectonic framework of the 24 August 2016, Amatrice (central Italy) earthquake sequence: new roles for old players?", *Annals of Geophysics*, 59, 10.
- Calderoni B., Ghersi A., Lenza P. (2012), "Lo scenario di danneggiamento delle costruzioni dell'Aquila a seguito del terremoto del 2009", in Pesaresi C. (a cura di), *L'Aquila e il cratere sismico. Le cause e le conseguenze del terremoto (6 aprile 2009) in chiave applicativa e interdisciplinare*, *Semestrale di Studi e Ricerche di Geografia*, 1: 49-67.
- Cheloni D. et al. (2017), "Geodetic model of the 2016 Central Italy earthquake sequence inferred from InSAR and GPS data", *Geophysical Research Letters*, 44: 6778-6787.
- Chiaraluce L. et al. (2017), "The 2016 Central Italy seismic sequence: A first look at the mainshocks, aftershocks and source models", *Seismological Research Letters*, 88, 3: 757-771.

- Ciranna S., Vaquero Piñeiro M. (a cura di) (2011), *L'Aquila oltre i terremoti. Costruzioni e ricostruzioni della città*, Città & Storia, 1.
- Daniyal A. (2012), "Post-Earthquake Damage Assessment using 3D-GIS Modeling", *33rd Canadian Symposium on Remote Sensing*, 11-14 June 2012, Ottawa: 1-8.
- Fosu R., Suprabhas K., Rathore Z., Cory C. (2015), "Integration of Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information Systems (GIS): a literature review and future needs", *Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference, Eindhoven*: 196-204.
- Gasparini P. (2013), "Il bradisismo del 1970", *Ambiente Rischio Comunicazione*, 5: 31-35.
- Landeschi G. (2018), "Rethinking GIS, three-dimensionality and space perception in archaeology", *World Archaeology*: 1-16.
- Luo C., Zhu Q., Pang B., Wang J. (2011), "Research of 3d GIS based on OpenGL_ES for Earthquake Engineering", *Systems Engineering Procedia*, 1: 93-98.
- Luongo G. (2013), "Il bradisismo degli anni Ottanta", *Ambiente Rischio Comunicazione*, 5: 36-45.
- Martini M. (2013), "L'attività recente dei Campi Flegrei", *Ambiente Rischio Comunicazione*, 5: 7-12.
- Pesaresi C., Gallinelli D., "GIS4RISKS: periodo di edificazione 'verso' esiti di agibilità a L'Aquila (2009), ricostruendo le fasi dell'evoluzione urbanistica", in corso di stampa.
- Pesaresi C., Marta M., Palagiano C., Scandone R. (2008), "The evaluation of 'social risk' due to volcanic eruptions of Vesuvius", *Natural Hazards*, 47: 229-243.
- Pesaresi C., Nebbia F. (2010), "L'Aquila e Onna, un anno dopo il terremoto del 6 aprile 2009", *geografia*, 3-4: 32-51.
- Pesaresi C., Pavia D. (2017), *Tra Vesuvio e Campi Flegrei, dal XIX secolo a oggi. Modellizzazione cartografica in ambiente GIS*, Nuova Cultura, Roma.
- Pesaresi C., Pavia D. (2018), "Multiphase procedure for landscape reconstruction and their evolution analysis. GIS modelling for areas exposed to high volcanic risk", *Journal of Research and Didactics in Geography (J-READING)*, 1, 7: 17-41.
- Pesaresi C., Scandone R. (2013), "Nuovi scenari di rischio nell'area vesuviana", in Paratore E., Morri R. (a cura di), *Studi in onore di Cosimo Palagiano, Semestrare di Studi e Ricerche di Geografia*, 1: 225-241.
- Petrosino P. et al. (2004), "Volcanic risk and evolution of the territorial system in the volcanic areas of Campania", *Acta Vulcanologica*, 16, 1-2: 163-178.
- Reggiani A.M. (2011), "Il patrimonio ferito dell'Aquila", *ROMVLA*, 10: 307-342.
- Tarquini S. et al. (2007), "TINITALY/01: a new Triangular Irregular Network of Italy", *Annals of Geophysics*, 50: 407-425.
- Tarquini S. et al. (2012), "Release of a 10-m-resolution DEM for the Italian territory: Comparison with global-coverage DEMs and anaglyph mode exploration via the web", *Computers & Geosciences*, 38: 168-170.
- Yalciner O. (2007), "Urban Information Systems for Earthquake-Resistant Cities", in ESRI (a cura di), *GIS for Earthquakes. GIS Best Practices*, Redlands: 11-14.
- Yamamura S., Fan L., Suzuki Y. (2017), "Assessment of urban energy performance through integration of BIM and GIS for smart city planning", *Procedia Engineering*, 180: 1462-1472.