

USO DI TECNICHE GIS NELLA VALUTAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DI FRANA NELLA VALLE DEL SERCHIO (LU)

Paolo Roberto FEDERICI* - Alberto PUCCINELLI* - Elena CANTARELLI* -
Nicola CASAROSA* - Giacomo D'AMATO AVANZI* - Francesco FALASCHI* -
Roberto GIANNECCHINI* - Alberto POCHINI* - Adriano RIBOLINI* -
Marco BOTTAI** - Nicola SALVATI**

(*)Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa (Italy)

(**)Dipartimento di Statistica e Matematica Applicata all'Economia, Università di Pisa (Italy)
falaschi@dst.unipi.it

Riassunto

La valle del fiume Serchio (LU) presenta complesse problematiche connesse con l'instabilità dei versanti. Infatti, le particolari caratteristiche geologico-strutturali, geomorfologiche, meteorologiche e sismiche della regione causano un'alta densità di dissesto. Molteplici movimenti franosi e ampie zone con elevata suscettibilità ai dissesti determinano un'alta pericolosità di frana, a cui sono esposti i centri abitati, le infrastrutture, le aree produttive e agricole, con gravi danni economici e sociali. Questo studio sperimentale è finalizzato alla valutazione della suscettibilità di frana attraverso lo studio geologico, geomorfologico, litologico-tecnico, statistico e l'uso di tecniche GIS. Tale ricerca ricade in un più ampio progetto promosso dalla Regione Toscana e dall'APAT - Servizio Geologico Nazionale con lo scopo di definire la pericolosità di frana all'interno dell'area del foglio 250 - Castelnuovo di Garfagnana (scala 1: 50.000).

Abstract

The Serchio River basin (Tuscany) presents a high landslide susceptibility, due to geological, geomorphological setting, meteorological, and seismic conditions. Heavy rainfalls often cause many landslides, involving villages, infrastructures and crops. The proposed experimental method is aimed at evaluating the landslide hazard with a multidisciplinary approach. Geological, geomorphological and lithotechnical survey, multivariate statistical analysis and GIS technique were performed. This method falls in a research project promoted by Tuscany Region and APAT-Italian Geological Survey, aimed at defining the landslide hazard in the area of the map n. 250 - Castelnuovo di Garfagnana (1:50,000 scale).

Inquadramento geologico e geomorfologico

Nella valle del Serchio affiorano molte unità tettoniche dell'Appennino Settentrionale: le unità metamorfiche delle Alpi Apuane, la Falda Toscana e le Unità Subliguri e Liguri (Unità Canetolo, Unità Ottone, Unità Gottero) (Puccinelli et al., in stampa).

Strutturazione e deformazione tettonica di queste unità sono il prodotto di una complessa storia evolutiva polifasata, che schematicamente può essere ricondotta a due periodi principali. Dal Cretaceo sup. al Miocene sup. si ha uno stile eminentemente compressivo, responsabile dell'impilamento e della messa in posto di unità tettoniche provenienti da domini paleogeografici diversi (da ovest verso est: Dominio Ligure, Dominio Subligure, Dominio Toscano). Dal Miocene sup. al Pliocene inf. la tettonica di tipo distensivo dà luogo alla formazione di depressioni tettoniche, nelle quali sedimentano potenti successioni fluvio-lacustri villafranchiane.

Nell'area di studio (Fig. 1), che ha un'estensione di circa 14 Km², affiora la Falda Toscana, rappresentata da alcuni dei termini superiori della successione: Maiolica (calcarei stratificati), Scaglia toscana (in prevalenza argilliti con intercalazioni calcaree o marnose), Calcareniti di Montegrossi (calcareniti e calcari stratificati), Macigno (arenarie con interstrati pelitici). Su tali formazioni giacciono, in discordanza angolare e assetto sub-orizzontale i depositi fluvio-lacustri del bacino di Barga-Castelnuovo di Garfagnana (in prevalenza sabbie e sabbie argillose, ghiaie e conglomerati) e le alluvioni terrazzate del Serchio, costituite in genere da ghiaie e conglomerati a prevalenti elementi di Macigno; la struttura è intersecata da sistemi di faglie dirette con direzione NW-SE, che hanno formato la depressione in cui si è imposta la stessa valle del Serchio (Puccinelli et al., in stampa).

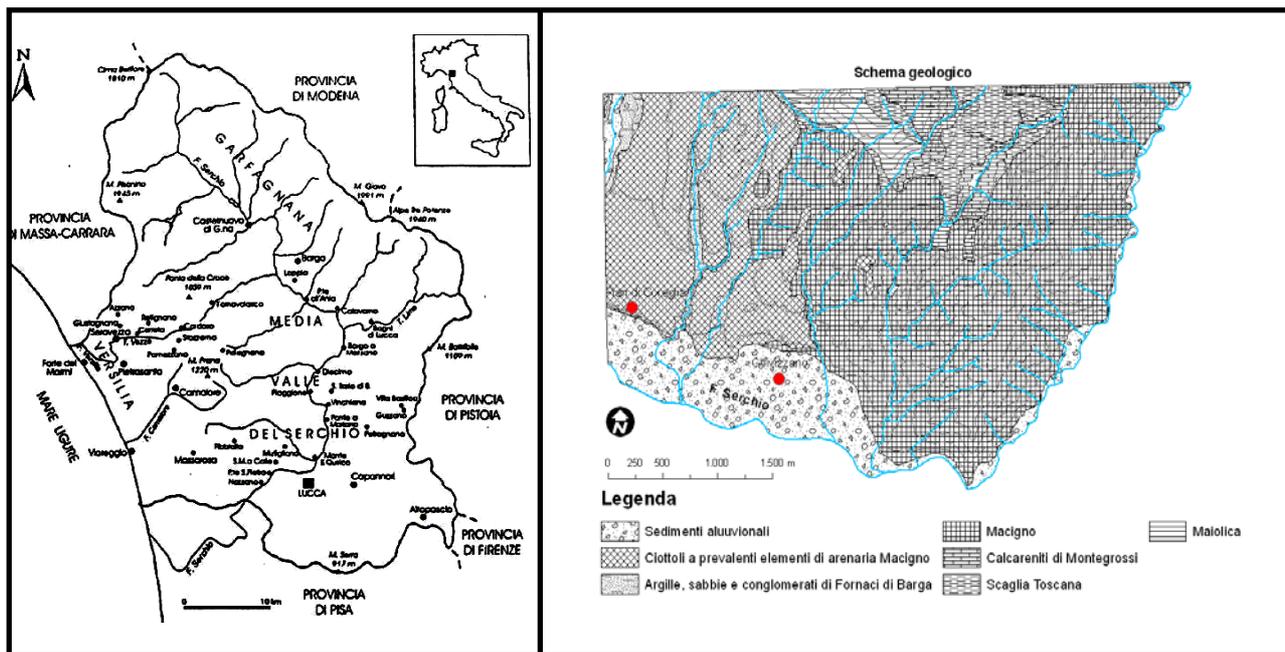


Figura 1 - Inquadramento geografico e geologico dell'area in esame

La morfologia riflette molto le caratteristiche litostrutturali: aspra con versanti acclivi in corrispondenza delle rocce calcaree, maggiormente resistenti; più dolce e arrotondata dove affiorano i litotipi argillitici o argillosi; caratteristiche intermedie dove affiora l'arenaria Macigno; ampie zone pianeggianti dove si trovano i depositi alluvionali terrazzati.

Come accennato, sono molto diffuse le frane, soprattutto nelle formazioni pelitiche, come la Scaglia toscana, nelle coltri detritiche che ammantano molti versanti, nelle aree in cui il Macigno si presenta fortemente alterato, nelle zone più fratturate presso le faglie. Riguardo alla tipologia di movimento, sono molto frequenti i fenomeni di scorrimento, colamento, le colate detritiche e i crolli (Cruden & Varnes, 1996; Nardi et al., 1987, 2000; D'Amato Avanzi et al., 2000; D'Amato Avanzi et al., 2002; Puccinelli et al., in stampa). Infine, l'area di studio si presenta in gran parte con vaste coperture boschive e sistemi culturali estesi, mentre le aree industriali o urbanizzate sono presenti in aree limitate.

Metodologia di lavoro

La zonazione dei versanti in base alla suscettibilità di frana è stata sviluppata in fasi successive: attraverso il rilevamento geomorfologico sono stati individuati e cartografati i dissesti, i principali processi morfogenetici e le forme connessi con l'instabilità ed è stata realizzata una carta inventario dei fenomeni franosi. Lo studio litologico-tecnico ha permesso di analizzare le principali caratteristiche delle rocce e delle coperture mediante indagini geomeccaniche e geotecniche di campagna, che hanno permesso di ottenere la carta litologico-tecnica. È stata riportata la

distribuzione spaziale dei fattori dell'instabilità su carte tra loro sovrapponibili, in modo da poter valutare in ogni punto il concentrarsi dei diversi fattori predisponenti al dissesto. L'analisi spaziale delle carte tematiche relativamente alla distribuzione areale dei dissesti ha permesso di stabilire delle relazioni tra i vari fattori di instabilità ed il verificarsi dei dissesti.

Infine, l'analisi statistica dei dati (analisi condizionale e multivariata) insieme all'utilizzo di tecniche GIS ha permesso di analizzare in modo approfondito tali relazioni, fornendo valutazioni quantitative e con un più alto grado di oggettività, nonché la suddivisione del territorio in domini con diverso grado di pericolosità (*hazard zoning*) (Carrara, Guzzetti, 1999). Dapprima è stato applicato il metodo dell'analisi condizionale, con cui i fattori dell'instabilità sono stati valutati in modo univariato, attraverso il confronto con la distribuzione dei dissesti (Reichenbach et al., 2002). Successivamente è stata applicata l'analisi multivariata (regressione logistica) ed è stato possibile valutare quantitativamente l'influenza di ciascun fattore confrontandolo con tutti gli altri, stabilendone le reciproche strutture di relazione e giungendo alla definizione di un modello. (Amanti et al., 1992; Carrara, 1983; Carrara et al., 1990, 1991, 1995; Clerici, Dall'Olio, 1995).

Analisi statistica dei dati

L'analisi condizionale si basa sul Teorema di Bayes, secondo cui la frequenza di frana per ogni unità di mappa è assimilabile alla probabilità del verificarsi della frana stessa (Morgan, 1968). Secondo quest'ultimo, ciascuna Frequenza o Densità di Dissesto mostra la probabilità di accadimento di un evento futuro. L'analisi condizionale è stata applicata unitamente alla classificazione dell'area in Unità di Condizioni Uniche (UCU), ovvero domini omogenei rappresentati da porzioni di territorio che contengono un set di parametri tale da poter differenziare tale area, attraverso confini ben definiti, dalle unità adiacenti (Hansen, 1984).

In una prima fase sono stati considerati quei fattori che risultano maggiormente correlati con la distribuzione dei dissesti (acclività ed esposizione dei versanti, caratteristiche litologico-tecniche, uso del suolo, lineamenti tettonici, reticolo idrografico). Successivamente, sono stati scelti quelli più adatti alle caratteristiche del territorio in esame e si è proceduto con la realizzazione dei diversi livelli informativi relativi ai fattori considerati.

Tutti i livelli informativi sono stati quindi analizzati attraverso l'analisi spaziale in ambiente GIS in funzione della carta inventario dei fenomeni franosi. A tale scopo è stato utilizzato un parametro fondamentale dell'analisi condizionale, la Densità di Dissesto: essa esprime la percentuale di *pixel* in frana rispetto al numero di *pixel* rappresentativi di una classe in cui il parametro considerato è stato suddiviso.

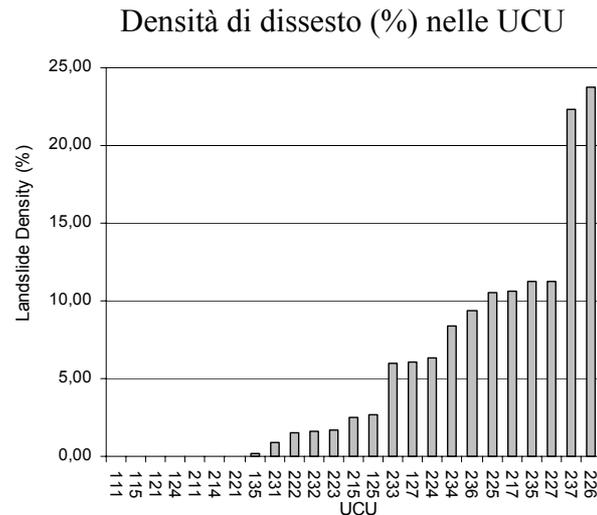
Sulla base di quest'analisi ogni piano informativo è stato riclassificato, attraverso l'attribuzione di codici unici alle classi dei fattori di predisposizione (Fig. 2a). Successivamente, la sovrapposizione (*overlay*) dei livelli informativi codificati unitamente all'algebra di mappa (*map algebra*, somma attraverso le funzioni del *map calculator*) ha permesso di individuare le Unità di Condizioni Uniche (UCU), che esprimono tutte le possibili combinazioni esistenti tra le classi dei piani informativi codificati.

La carta delle Unità di Condizioni Uniche è stata quindi confrontata attraverso l'analisi spaziale con la carta inventario dei fenomeni franosi, per il calcolo della Densità di Dissesto caratterizzante ciascuna UCU (Fig. 2b). Come accennato, questo valore rappresenta la Frequenza di frana di ogni UCU e, secondo il Teorema di Bayes, è assimilabile alla probabilità del verificarsi delle frane stesse (Morgan, 1968). Secondo quest'ultimo, ciascuna Frequenza o Densità di Dissesto mostra la probabilità di accadimento di un evento futuro a tempo "infinito".

Sulla base della Densità di Dissesto calcolata per ogni UCU, il territorio è stato suddiviso in 5 classi di pericolosità (molto bassa, bassa, media, alta, molto alta) (Figura 3), sia utilizzando metodi di classificazione automatici, mediante algoritmi definiti, sia intervenendo manualmente.

Fattori	Descrizione	Codice
Caratteristiche litologiche	Sedimenti alluvionali	1
	Ciottoli a prevalenti elementi di arenaria Macigno	2
	Argille, sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga	3
	Macigno	4
	Calcareniti di Montegrossi	5
	Scaglia Toscana	6
	Maiolica	7
Uso del suolo	Urbano, industriale e commerciale	10
	Sistemi colturali	20
	Boschi	30
Distanza dai corsi d'acqua	>350m	100
	0-350m	200

- a -



- b -

Figura 2 - a) Codifica dei layer relativi ai fattori predisponenti; b) Densità di dissesto nelle UCU

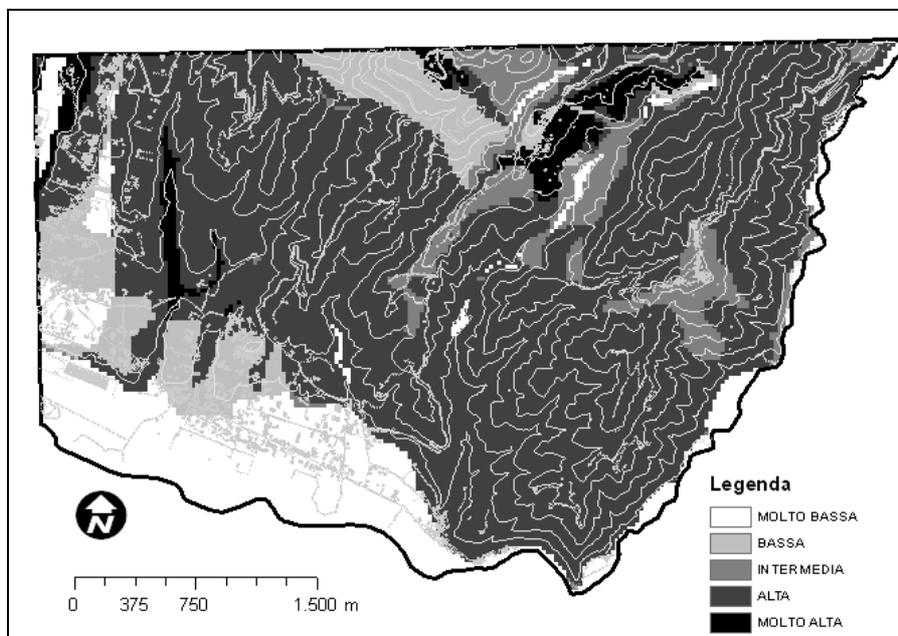


Figura 3 - Carta della pericolosità di frana (analisi condizionale)

Per quanto riguarda l'analisi multivariata dei dati, è stato considerato un modello di regressione logistica appartenente alla famiglia dei GLM (*Generalized Linear Model*).

La struttura dei GLM comprende tre aspetti fondamentali:

1) componente casuale: Y_i , $i = 1, \dots, n$ variabili casuali indipendenti, ognuna con distribuzione appartenente alla famiglia esponenziale;

2) componente sistematica: $p < n$ variabili esplicative x_{i1}, \dots, x_{ip} , di natura quantitativa o qualitativa, che producono un valore teorico η_i (predittore lineare) $\eta_i = \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij}$ dove β_j indica i parametri da

stimare a partire dai dati;

3) funzione legame: costituisce il legame tra la componente casuale e quella sistematica; la funzione legame è definita con $g(\mu_i) = \eta_i$ tale che $g^{-1}(\eta_i) = \mu_i$.

Nel caso di studio, il modello lineare generalizzato è stato applicato per l'analisi di dati binari. Questa particolare tipologia di dati si presenta ogni volta che per ciascuna unità osservata la

variabile risposta è dicotomica (0/1, presenza/assenza, vero/falso, ecc.). Si tratta quindi di studiare la probabilità che la variabile risposta assuma una modalità piuttosto che un'altra (ad esempio "1" – "unità instabile" - piuttosto che "0" – "unità stabile") in funzione di certi valori delle variabili esplicative X: $\Pr(Y = 1 | X = x)$ oppure $\Pr(Y = 0 | X = x)$. Il risultato è una funzione matematica che rende possibile la valutazione della capacità di un certo numero di variabili (i parametri scelti come fattori predisponenti al dissesto) di classificare gli elementi oggetto dell'analisi statistica (in questo caso le unità fondamentali di mappa) in classi o livelli di instabilità differenziati (Tab. 4 e Fig. 5).

Fattore	Descrizione	Variabile	Coeff	Std. Error	P>mod.z
Caratteristiche litologiche	Ciottoli a prevalenti elementi di arenaria Macigno	L6	1.79	0.588	0.00
	Argille, sabbie e conglomerati di Fornaci di Barga	L4	2.19	0.644	0.00
	Macigno	L7	1.72	0.058	0.00
	Calcareniti di Montegrossi	L2	1.40	0.646	0.00
	Scaglia Toscana	L1	1.95	0.059	0.00
	Maiolica	L3	0.85	0.764	0.00
Uso del suolo	Industriale e commerciale	LC2	1.31	0.219	0.00
	Sistemi colturali	LC3	0.56	0.048	0.00
	Sistemi colturali misti a elementi naturali	LC4	0.93	0.046	0.00
	Boschi di latifoglie	LC5	0.78	0.044	0.00
	Boschi	LC6	0.86	0.049	0.00
	Distanza dai corsi d'acqua	0-350m	DR2	0.75	0.048

Tabella - 4 Output relativo al software STATA

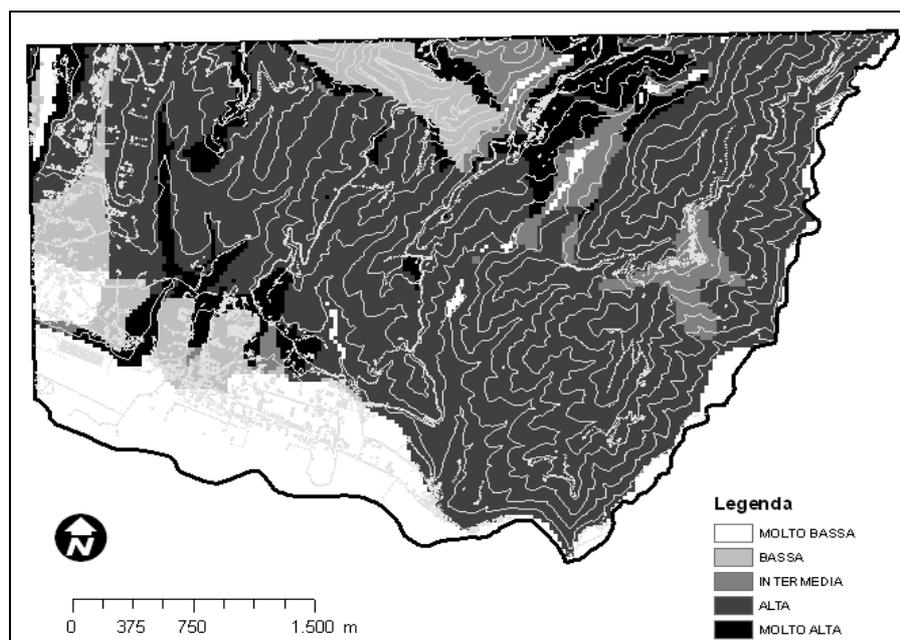


Figura - 5 Carta delle pericolosità di frana (regressione logistica)

Risultati e conclusioni

Il risultato finale di questo lavoro è rappresentato da un elaborato che permette di suddividere il territorio in esame in aree con diversa propensione al dissesto. Il processo che porta a questo risultato procede attraverso una valutazione statistica oggettiva dell'influenza dei vari fattori predisponenti nei confronti dei dissesti. Esso si evolve a partire da un metodo univariato e semi-quantitativo (analisi condizionale) in cui l'importanza dei singoli fattori nel causare fenomeni di dissesto viene valutata essenzialmente dal confronto con la distribuzione dei dissesti, verso un metodo multivariato quantitativo (analisi multivariata), che considera contemporaneamente una molteplicità di variabili, in modo da analizzarne le reciproche strutture di relazione e giungere alla definizione di un modello. Tale metodologia porta alla valutazione statistico-quantitativa dell'importanza o peso statistico dei parametri scelti come fattori predisponenti e della loro reciproca importanza relativa nell'indurre fenomeni di instabilità.

I risultati ottenuti dall'elaborazione congiunta di tutte le informazioni tramite l'analisi GIS e l'analisi statistica sono stati infine confrontati con la realtà geologica e geomorfologica del territorio indagato, allo scopo di verificare e perfezionare la metodologia utilizzata. Tale confronto ha evidenziato una buona congruenza tra le capacità predittive dei modelli utilizzati e la realtà del territorio analizzato. La sperimentazione naturalmente proseguirà, sia prendendo in esame aree con caratteristiche diverse, sia considerando altri parametri significativi per la valutazione della stabilità, come le precipitazioni, le sollecitazioni sismiche o ulteriori parametri fisico-meccanici. L'elaborazione oggettiva dei numerosi dati altamente significativi, fin qui raccolti e analizzati, ha consentito comunque di realizzare un prodotto di grande valenza applicativa nella valutazione del rischio e nella corretta gestione del territorio.

Riferimenti bibliografici

- Amanti M., Carrara A., Castaldo G., Colosimo P., Gisotti G., Govi M., Marchionna G., Nardi R., Panizza M., Pecci M., Vianello G. (1992), *Linee guida per la realizzazione di una cartografia della pericolosità geologica connessa ai fenomeni di instabilità dei versanti alla scala 1:50.000. Versione Preliminare*, Presidenza del Consiglio dei Ministri - Servizio Geologico, 53 pp.
- Carrara A. (1983) "Multivariate models for landslide hazard evaluation", *Math. Geol.*, 15: 403-426.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V. & Reichenbach P. (1990) "Geographical Information Systems and multivariate models in landslide hazard evaluation", in Cancelli A. ed., *Proc. Alps 90. 6th Int. Conf. & Field. Workshop on Landslides*, Milano: 17-28.
- Carrara A., Cardinali M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui V., Reichenbach P. (1991) "GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard", *Earth Surf. Processes and Landforms*, 16: 427-445.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F. & Reichenbach P. (1995) "GIS technology in mapping landslide hazard", in Carrara A., Guzzetti F. eds., *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer Publ., Dordrecht, the Netherlands: 135-175.
- Clerici A. & Dall'Olio N. (1995) "La realizzazione di una Carta della stabilità potenziale dei versanti mediante tecniche di analisi statistica multivariata e un sistema di informazione geografica", *Geol. Tec. e Amb.*, 4: 49-57.
- Cruden D.M., Varnes D.J. (1996), Landslide types and processes, in *Landslide: Investigation and Mitigation*, Spc. Rept. 247, Transp. Res. Board, Nat. Acad. of Sciences, Washington: 36-75.
- D'Amato Avanzi G., Puccinelli A. & Verani M. (2000) "Progress in methods in the studies on slope instability in north-western Tuscany (Italy)", *Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., Serie A*, 106 (1999): 125-133.
- D'Amato Avanzi G., Giannecchini R., Puccinelli A. (2002) "I movimenti franosi del novembre 2000 nella provincia di Lucca: osservazioni preliminari", *Atti Conv. Lincei*, 181: 365-377.
- Hansen A. (1984) *Landslide hazard analysis*, in Brunsden D., Prior D.B. eds.: *Slope Instability*. Wiley and Sons, 523-602.
- Morgan B.W. (1968) *An introduction to Bayesian statistical decision processes*, Prentice Hall, New York, 116 pp.
- Nardi R., Pochini A., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Trivellini M. (1986) "Valutazione del rischio da frana in Garfagnana e nella Media Valle del Serchio (Lucca)", *Boll. Soc. Geol. It.*, 104 (1985): 585-599.
- Nardi R., Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Baldacci F., Buti F., Caredio F., De Lucia P.L., Giannecchini R., Mazzanti G., Pellegrino G., Trivellini M. (2000) *Carta della franosità del bacino del F. Serchio (scala 1:10.000)*, 13 Tavv., Tip. SELCA, Firenze.
- Puccinelli A., D'Amato Avanzi G., Perilli N. (in stampa) "Carta Geologica d'Italia a scala 1:50.000", *Note illustrative del Foglio 250 Castelnuovo di Garfagnana. APAT-Servizio Geologico*.
- Reichenbach P., Carrara A. & Guzzetti F. eds. (2002), *Assessing and Mapping Landslide Hazards and Risk*, Natural Hazards and Earth Systems Science, Spec. Issue, Vol. 2, 1-2: 82 pp.