

Studio delle condizioni di instabilità del versante meridionale del Vulcano Irazu (Costa Rica, America Centrale)

Mario Floris¹, Nadia Pavanelli², Bruno Capaccioni³, Gianluigi Tonelli⁴, Orlando Vaselli⁵, Eliecer Duarte⁷

¹Istituto di Geologia Applicata, Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”; email: mario.floris@uniroma1.it

²Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze; autore corrispondente: nadia.pavanelli@geo.unifi.it; Via la Pira 4, 50100 Firenze; Fax 055/284571)

³Istituto di Geochimica e Vulcanologia, Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”; email: b.capaccioni@uniurb.it

⁴Istituto di Geologia Applicata, Università degli Studi di Urbino “Carlo Bo”; email: g.ton@uniurb.it

⁵Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze e CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse; email: orlando.vaselli@geo.unifi.it

⁶Observatorio Volcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI-UNA), Heredia, Costa Rica email: eduarte@una.ac.cr

Slope instability on the southern flank of Irazu Volcano (Costa Rica, Central America)

ABSTRACT: During historic and prehistoric times the southern slope of Irazu Volcano (Costa Rica) has been affected by several mass movements. The stratigraphic record has revealed the presence of extensive debris flow and debris avalanche deposits. The last eruptive activity (1963-1965) was characterized by at least 40 lahars, one of which caused the death of 20 people and heavy damage to the city of Cartago. The lahar events were triggered by heavy rains with the initial involvement of the superficial ash cover. As the flows moved downstream, the detrital substratum of the Reventado River valley (made up by a 50 m thick debris avalanche deposit) was strongly affected. The aim of the first step of the research has been to provide useful data to reconstruct the triggering conditions of debris avalanche and lahars and to evaluate both their magnitude and mobility. For this purpose geological and volcanological investigations coupled with the physical-mechanical characterization of the material involved in the mass movement have been carried out. The rock samples collected from the detachment area of the avalanche are characterized by a sharp decrease of the compressive strength as a function of the degree of the hydrothermal alteration. The complete destruction of the silicate lattice acted by the hydrothermal fluids has produced amorphous silica, clay minerals and sulfates (gypsum, anhydrite). As the alteration degree increases, the compressibility modulus value decreases from those of rocks to those of loose material. As a consequence, the catastrophic failure probability of sectors of the volcanic edifices is enhanced with likely large-scale mass movements. Samples collected from deposits involved in small-scale events (lahars) were analyzed to determine density, grain size distribution and friction angle. These parameters will be used to perform a dynamic analysis of the 1963-65 events and will be processed to develop a forecasting model of these events.

Key terms: debris flow, debris avalanche, mass movements, volcanic terrain, Costa Rica

Termini chiave: debris flow, debris avalanche, movimenti di massa, terreni vulcanici, Costa Rica

Riassunto

Il versante meridionale del Vulcano Irazu (Costa Rica) è stato interessato, anche in tempi storici, da movimenti di massa di varia estensione e tipologia, come testimoniato dallo studio del record stratigrafico, caratterizzato dalla presenza di depositi di debris flow e debris avalanche. Durante l'ultima attività eruttiva (1963-65) si sono sviluppati numerosi lahar, molti dei quali hanno provocato ingenti danni alla città di Cartago ubicata a circa 15 km dal cratere principale. Scopo del lavoro è la ricostruzione delle condizioni che hanno determinato l'insorgere di tali fenomeni

e la stima della loro magnitudo (in termini di volumi coinvolti) e mobilità (runout), mediante un rilevamento geologico-vulcanologico ed una caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali coinvolti nei movimenti di versante. Per i debris avalanche è stato valutato il decremento delle caratteristiche di deformabilità delle rocce in funzione del loro grado di alterazione idrotermale. All'aumentare del grado di alterazione si assiste infatti ad un decremento esponenziale dei moduli di deformazione, passando da valori caratteristici delle rocce lapidee a quelli tipici di terre debolmente coesive. Nel caso dei debris flow sono stati raccolti dati utili per una successiva analisi dinamica dei

fenomeni del 1963-65. Tali eventi rappresentano il punto di partenza per implementare e calibrare un modello previsionale.

Introduzione

I movimenti di massa costituiscono un elemento fondamentale nell'evoluzione di un edificio vulcanico. Gli stratovulcani di composizione intermedia, costituiti da alternanze di materiali da lapidei a scarsamente coesivi fino a incoerenti e caratterizzati, quindi, da valori delle proprietà fisico-meccaniche estremamente variabili all'interno del record stratigrafico, sono comunemente soggetti a fenomeni gravitativi. Questi fenomeni possono svilupparsi a varie scale, dalle colate di fango o detrito, che interessano materiale superficiale non consolidato, ai collassi di fianco o di settore, che coinvolgono intere porzioni dell'edificio. Più in particolare, l'instabilità di terreni vulcanici in ambiente tropicale (Capra et al., 2003) è favorita dall'elevata quantità ed intensità delle precipitazioni e da una maggior alterazione dei materiali ad opera degli agenti atmosferici. In ambienti di questo tipo, i cedimenti che danno luogo a fenomeni franosi possono essere innescati da numerosi fattori, di cui il più comune costituito da eventi meteorologici di intensità eccezionale, e.g. Sarno, Italia (Zanchetta et al., 2004), Casita, Nicaragua (Kerle & Van Wyk de Vries, 2001), Teziutlan, Messico (Capra et al., 2003). Altri fattori sono rappresentati dall'attività sismica, e.g. Las Colinas, El Salvador (Konagai et al., 2004) e vulcanica, e.g. Nevado del Ruiz (Pierson et al., 1990). Il presente lavoro, focalizzato sul versante meridionale del Vulcano Irazu (Costa Rica) interessato, in tempi storici e preistorici, numerosi movimenti di massa a varia scala (Pavanelli et al., 2004) presenta i primi risultati di una ricerca finalizzata a ricostruire le condizioni che predispongono all'innescio dei fenomeni franosi, di stimare la loro magnitudo (espressa in termini di volumi coinvolti) e il loro *runout*. Tali elementi risultano essenziali per una valutazione delle condizioni di rischio nell'area ai piedi del versante, nella quale vivono più di 150000 abitanti. A tale scopo è stato effettuato un rilevamento geologico-vulcanologico a cui è stata associata una caratterizzazione geotecnica dei depositi coinvolti nei movimenti di versante.

Inquadramento dell'area di studio

Il Vulcano Irazu (3432 m slm) rappresenta l'edificio più meridionale della catena vulcanica quaternaria (Cordillera Central) nella quale è ubicata la maggior parte dei vulcani attivi del Costa Rica. Tale edificio costituisce in realtà parte di un massiccio vulcanico formato da due apparati principali (Irazu e Turrialba) e da numerosi centri secondari di emissione. L'ultima importante attività del vulcano Irazu, risalente al periodo 1963-65, è stata caratterizzata da violente eruzioni di tipo stromboliano e vulcaniano (Murata et al., 1966). Il cratere attivo, attualmente occupato da un lago craterico e sede di cospicue emissioni fumaroliche, si

trova ad una distanza di circa 25 km da San José e a soli 15 km dalla città di Cartago (Fig. 1).

Il clima del Costa Rica è caratterizzato dall'alternanza di una stagione secca (Gennaio-Marzo) e di una umida (Aprile-Dicembre) (Murata et al., 1966). Tuttavia, il versante pacifico (precipitazione annuale media: 2000 mm) è caratterizzato da una piovosità inferiore rispetto a quella del settore atlantico, il quale risulta interessato da frequenti perturbazioni caraibiche. In entrambi i versanti l'acqua meteorica tende ad essere prevalentemente dispersa per ruscellamento superficiale, per infiltrazione e per evapotraspirazione, tanto che nella stagione secca le portate dei corsi d'acqua minori sono praticamente nulle. Un elemento climatico fondamentale è inoltre costituito dal regime dei venti. Il Costa Rica si trova infatti all'interno della fascia degli alisei, venti costanti provenienti da NE, i quali sono responsabili della distribuzione areale dei prodotti piroclastici di caduta e che pertanto tendono principalmente ad accumularsi sul versante SW dell'apparato.

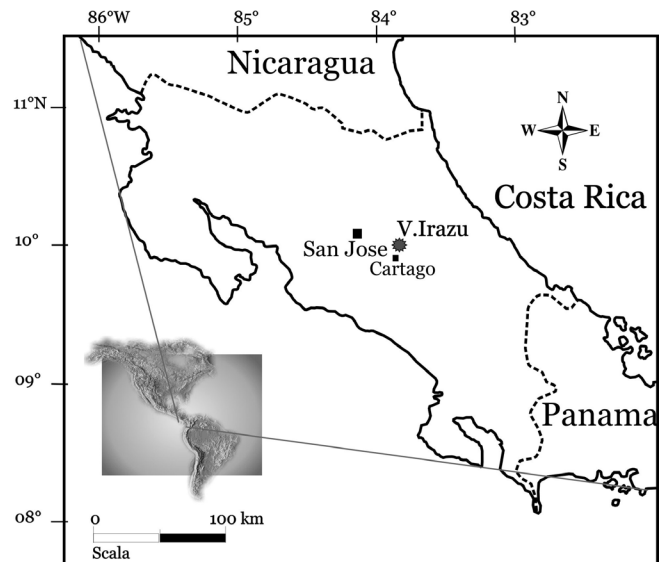


Fig. 1– Ubicazione dell'area di studio.
Location of the study area.

Geologia dell'area

L'area di studio è caratterizzata dalla netta prevalenza, in affioramento, di depositi di tipo vulcanoclastico (Fig. 2). Nella parte sommitale dell'edificio affiorano unicamente ceneri di caduta a vari gradi di alterazione che raggiungono spessori massimi di 6 m. Al tetto di questi materiali si è messo in posto il deposito relativo all'ultima eruzione, costituito da ceneri di colore grigio scuro-nero di composizione andesitica che raggiungono, nell'area studiata, spessori di circa 1 m. A tali depositi si affiancano sequenze di materiali epiclastici che, sulla base delle loro caratteristiche tessiturali e sedimentologiche, possono suddividersi in due classi: 1. legati ad eventi di lahar (storici

e preistorici); 2. legati a collassi di fianco dell'edificio (debris avalanche Reventado). La base di quest'ultimo deposito affiora unicamente lungo il letto del Rio Reventado, dove il debris avalanche è in contatto con le colate laviche basali. Laddove è stata riconosciuta la base del deposito, lo spessore raggiunge circa 50 m. L'area di origine del collasso di fianco è stata identificata in una nicchia di distacco della larghezza di circa 2.5 km aperta verso SW e situata a circa 1 km dal cratere attivo. Gli eventi di lahar del 1963-65, innescati da eventi meteorici di grande intensità (Alvarado & Schmincke, 1993), hanno coinvolto le ceneri appena depositate, prendendo successivamente in carico il materiale sciolto del deposito stesso di debris avalanche. Il lahar più devastante, avvenuto nel dicembre 1963, ha provocato 20 vittime e la distruzione di un'ampia zona della città di Cartago, costruita sul debris avalanche del Reventado la cui età è di 5930 ± 100 anni (Pavanelli et al., 2004).

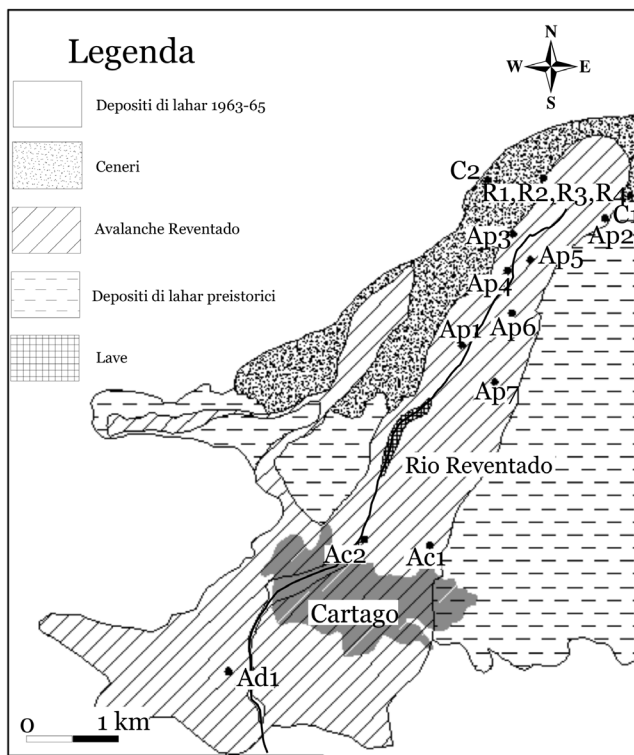


Fig. 2 – Mappa geologica semplificata dell'area di studio e ubicazione dei campioni utilizzati per la caratterizzazione geotecnica.
Simplified geological map of the study area and sampling sites for geotechnical characterization.

Proprietà fisiche e meccaniche dei materiali

Complessivamente, sono stati studiati 16 campioni, suddividendoli in tre distinti gruppi, in quanto rappresentano altrettanti aspetti dei terreni presenti nell'area: 1) materiale litico della corona di distacco (R1,

R2, R3 ed R4); 2) ceneri relative all'ultimo periodo eruttivo (C1 e C2); 3) matrice del deposito di avalanche (A) del Reventado (AP1, AP2, AP3, AP5, AP6, AP7, AC1, AC2, AD1) distinto, a sua volta, in tre porzioni: prossimale (P), centrale (C) e distale (D).

Considerando, sia per il materiale litico sia per quello sciolto, una composizione originaria andesitico-basaltica, caratteristica della quasi totalità dei prodotti di questo vulcano, i valori dei parametri fisico-meccanici dei campioni possono essere messi in relazione all'intensità del alterazione subita.

Tab. 1 – Principali parametri fisico-meccanici dei litotipi rocciosi. Γ_d) Peso dell'unità di volume; G_s) Peso specifico; n) Porosità; Σ_c) Resistenza alla compressione monoassiale.
Physic-mechanical properties of rock specimens. Γ_d) Unit weight G_s) Specific gravity n) Porosity Σ_c) uniaxial compressive strength value.

Campione	Γ_d (kN/m ³)	G_s	n (%)	Σ_c (MPa)	Σ_c (MPa) medio
R1	25,49	2,62	0,69	58,34 37,36	47,84
R2	17,06	2,31	24,6	28,72 42,54 23,23 30,49	31,27
R3	16,18	2,14	22,9	3,04 8,33 7,35	6,27
R4	15,10	2,16	28,7	2,55 1,08	1,86

I quattro campioni costituiti da roccia lapidea sono caratterizzati, anche all'esame macroscopico, da un diverso grado di alterazione. I campioni R1 ed R2 si presentano come rocce compatte di buona cementazione: R1 è caratterizzato da una struttura porfirica, con pasta di fondo scura in cui sono immersi fenocristalli eterogranulari di plagioclasti, le parti più alterate assumono una colorazione gialla-rossastra; R2 manifesta una struttura simile differenziandosi dal precedente per una matrice di colore variabile dal rosa al grigio, presumibilmente attribuibile ad un iniziale, generale, stadio di alterazione. Nei campioni R3 ed R4 la struttura porfirica è molto meno evidente, mentre l'aspetto è decisamente vacuolare con una cementazione molto debole a causa dell'intensa alterazione. Caratteristica comune a tutti i campioni è quella di mostrare piani di frattura irregolari, più accentuati in R3 ed R4, seppur non raggruppabili in vere e proprie famiglie di fratture. In Tab. 1 sono riportate le valutazioni volumetriche e le prove di compressione monoassiale. Dai dati ottenuti si nota, passando da R1 a R4, un decremento del peso di unità di volume e del peso specifico. Nel primo caso il decremento è notevole, con valori che variano tra 25,49 (R1) e 15,10 (R4) kN/m³, legati ad un aumento della porosità. Un simile

comportamento è osservabile anche per i valori di peso specifico (Gs). Nel caso della resistenza a compressione monoassiale, i valori più elevati sono relativi al campione R1, mentre quelli minimi si riferiscono al campione R4, il quale risulta essere composto da materiale più alterato rispetto agli altri e dotato di una ridotta coesione per cementazione riscontrabile in una notevole friabilità dell'insieme.

Tab. 2 – Principali parametri fisico-meccanici dei livelli a cenere. Gs) Peso specifico; $\phi'r$) Angolo d'attrito efficace residuo (materiale ricostituito).

Physic-mechanical properties of ash samples. Gs) Specific gravity $\phi'r$) Residual friction angle

Campione	Sabbia (%)	Limo (%)	Gs	$\phi'r$ (°)
C1	75	25	2.85	44
C2	78	22	2.75	45

I campioni C1 e C2 provengono dal livello di materiale di caduta relativo all'ultima attività eruttiva. Sono privi di elementi grossolani e sono costituiti da ceneri di colore grigio scuro. I valori di Gs, perfettamente riferibili a quelli medi di un'andesite basaltica, così come l'osservazione macroscopica e microscopica, che mettono in evidenza la presenza di cristalli e di frammenti vetrosi freschi, denotano il carattere pressoché inalterato del materiale. Da un punto di vista granulometrico, i campioni C1 e C2 sono riconducibili a sabbie limose (Tab. 2), in cui la frazione argillosa è praticamente assente.

Tab. 3 - Principali parametri fisico-meccanici dei materiali costituenti il deposito di debris avalanche. Gs) Peso specifico; $\phi'r$) Angolo d'attrito efficace residuo. (* per i provini sottoposti alla prova di taglio diretto CD è stato utilizzato il materiale passante al setaccio con luce maglia da 4.76 mm e successivamente ricostituito).

Physic-mechanical properties of debris avalanche matrix samples. Gs) Specific gravity $\phi'r$) Residual friction angle.

Campione	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)	Gs	$\phi'r$ (°) *
AP1	28	40	25	7	2.65	35
AP2	4	11		85	2.50	35
AP3	31	34	30	5	2.45	---
AP4	30	27	33	10	2.69	---
AP5	25	20	32	23	2.51	27
AP6	42	35		23	2.64	38
AP7	31	22		47	2.65	---
AC1	25	27		48	2.67	---
AC2	3	9		88	2.72	---
AD1	42	43	14	1	2.65	37

I campioni prelevati nel corpo dell' 'Avalanche Reventado' sono costituiti da materiale granulometricamente eterogeneo con elementi grossolani a

composizione basaltico-andesitica, a vari gradi di alterazione idrotermale, immersi in una matrice sabbioso-limosa a luoghi anche argillosa. I valori di Gs, compresi tra 2.72 e 2.45, sono leggermente inferiori a quelli del presunto materiale di origine e presentano una distribuzione casuale all'interno del deposito. Dalle analisi granulometriche si ricava che il materiale studiato è ben gradato, solamente la frazione argillosa è presente con contenuti inferiori al 10%, ad eccezione del campione AP5 (23%) (Tab. 3) cui compete anche il valore più basso di $\phi'r$.

Conclusioni

I dati ottenuti permettono di rilevare che, per quanto riguarda i materiali sciolti, le caratteristiche meccaniche dei campioni sono buone e non indicano una particolare propensione alla a fenomeni di instabilità. Quindi, i debris flows che coinvolgono tali materiali possono essere connessi con le condizioni idrologiche a carattere eccezionale che si verificano in concomitanza con le fasi parossistiche dell'attività vulcanica. Inoltre, una volta avvenuto il distacco, la grande disponibilità di materiale facilmente asportabile per "bulking" alimenta le colate di fango e detrito lungo il loro percorso.

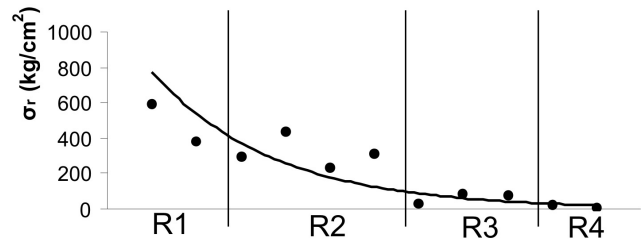


Fig. 3 - Andamento del valore di resistenza alla compressione semplice rispetto all'aumentare del grado di alterazione. *Trend of the unconfined compressive strength values vs increasing alteration degree.*

I campioni provenienti dalla matrice del deposito di avalanche del Reventado testimoniano, con le loro caratteristiche granulometriche e di densità, la natura estremamente eterogenea di questo deposito anche a piccola scala. Questa eterogeneità è osservabile anche alla scala dell'affioramento, dove localmente si notano dei domini chiaramente distinguibili dal resto del deposito per colore, struttura e distribuzione granulometrica. I dati ottenuti rappresentano il punto di partenza per la realizzazione di modellizzazioni dinamiche delle colate e, successivamente, la messa a punto di modelli previsionali a fini di protezione civile.

Per quanto invece riguarda i materiali rocciosi, dai parametri rilevati risulta evidente che l'effetto dell'idrotermalismo determina in essi una intensa alterazione con conseguente variazione di tutti i parametri

fisici: i minerali primari delle rocce, quali plagioclasti e pirosseni, ancora presenti in R1 (come evidenziato da indagini diffrattometriche) vengono gradualmente distrutti e sostituiti da silice amorfa, solfati e carbonati. Di conseguenza, al progredire dell'alterazione si assiste contestualmente ad un notevole scadimento delle caratteristiche meccaniche (Fig. 3), tanto da poter

classificare la maggior parte dei materiali lapidei analizzati tra le rocce tenere o le terre. I valori della resistenza a compressione monoassiale diminuiscono infatti nettamente all'aumentare del grado di alterazione, favorendo la possibilità di cedimenti catastrofici delle parti più interne dell'edificio.

Bibliografia

- Alvarado G.E. & Schmincke H.U. (1993). Stratigraphic and sedimentological aspects of the rain-triggered lahars of the 1963-1965 Irazu eruption, Costa Rica. *Zbl. Geol. Paläont.* 1/2, 513-530.
- Capra L., Lugo-Hubp J., Borselli L. (2003). Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlan (Mexico). *Eng. Geology* 69, 359-379.
- Kerle N., Van Wyk de Vries B. (2001). The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua - investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 105, 49-63.
- Konagai K., Johansson J., Mayorca P., Uzuoka R., Yamamoto T., Miyajima M., Pulido N., Sassa K., Fukuoka H., Duran F. (2004). Las Colinas landslide: rapid and long-traveling soil flow caused by the January 13, 2001, El Salvador earthquake. *GSA Special Paper* 375, 39-53.
- Murata K.J., Dondoli C. & Saenz R. (1966). The 1963-65 eruption of Irazu Volcano, Costa Rica. *Bull. Volcanol.* 29, 765-796.
- Pavanelli N., Capaccioni B., Sarocchi D., Calderoni G., Vaselli O., Tassi F., Duarte E. (2004). Geology and stability of the southern flank of Irazu Volcano, Costa Rica. *Acta Vulcanologica* 1-2, in stampa.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.C. and Borrero, C.A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow, and deposition of lahars. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 41, 17-66.
- Zanchetta G., Sulpizio R., Pareschi M. T., Leoni, Santacroce R. (2004). Characteristics of May 5-6, 1998 volcanoclastic debris flows in the Sarno area (Campania, southern Italy): relationships to structural damage and hazard zonation. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 133, 377-393.