

LA PALEOFRANA DI PERU (CASTELSARDO - SS): CARATTERIZZAZIONE, LITOSTRATIGRAFIA E RAPPORTI CON ALTRI DEPOSITI CONTINENTALI QUATERNARI

THE PALEOLANDSLIDE AT PERU (CASTELSARDO - NORTH SARDINIA, ITALY): DEFINITION, LITOSTRATIGRAPHY AND RELATIONSHIPS TO OTHER CONTINENTAL QUATERNARY DEPOSITS

GIOVANNI TILOCCA^(*), ALESSANDRO FORCI^(**) & MARIA RITA LAI^(***)

^(*)Geologo libero professionista - Via Floris, 2 - 07100 Sassari (Italy) - Tel. +39 079 4361649 - 347 6841401 - e-mail: tilokka@yahoo.it

^(**)Geologo libero professionista - Via Cettigne, 30 - 09129 Cagliari (Italy) - Tel. +39 079 278168 - e-mail: forci.al@tiscali.it

^(***)Ente Acque della Sardegna - Via Mameli, 88 - 09123 Cagliari (Italy) - Tel. +39 070 6021.250 - e-mail: mrita.lai@enas.sardegna.it

RIASSUNTO

Il nord della Sardegna è caratterizzato da una serie di paleofrane che interessano diversi contesti litostratigrafici della successione miocenica. Queste ampie frane non sono mai state studiate e cartografate adeguatamente e i loro processi cinematici sono ancora scarsamente conosciuti. Nel presente studio vengono descritti i depositi di una paleofrana dell'area di Peru (Castelsardo, nord Sardegna). Il rilevamento e la mappatura delle sue caratteristiche litologiche e morfologiche sono stati eseguiti utilizzando i rilievi di campagna, la fotointerpretazione e i risultati dei sondaggi geognostici. Viene proposto quindi uno schema cinematico che spiega l'origine dei depositi. I rapporti stratigrafici tra i depositi di frana e i depositi eolici del Pleistocene superiore, visibili lungo la linea di costa in falesia dell'area di Peru, permettono di risalire alla datazione del fenomeno di instabilità e danno un nuovo impulso alla comprensione della geologia del Quaternario del nord Sardegna.

TERMINI CHIAVE: *paleofrana, Pleistocene superiore, frane complesse, tuffiti argillificati, nord Sardegna*

INTRODUZIONE

L'interesse destato dallo studio delle frane in Sardegna è stato, sino ad oggi, piuttosto scarso e discontinuo negli ambienti scientifici. Si è pregiudizialmente ritenuto che, stante l'assetto geomorfologico e quello geolitologico della regione, la loro incidenza territoriale fosse assai modesta, che avessero pericolosità bassa e che, quindi, dessero luogo a rischi ancor minori. Tale asserzione ha progressivamente contribuito a consolidare l'erronea convinzione che l'isola sia pressoché immune da dissesti idrogeologici. Recentemente il progetto I.F.F.I. (APAT-RAS, 2005), identificando 1523 casi di frana, ha evidenziato invece un'ampia casistica in cui risalta la prevalenza dei fenomeni di crollo.

In tale quadro ancor meno noti ed approfonditi risultano essere i non rari casi di fenomenologie di frane stabilizzate relict (*sensu* S.G.I-C.N.R., 1996), di grande sviluppo areale, le quali, se identificate, vengono indicate nella cartografia e nella letteratura geologica della Sardegna, col termine generico di "paleofrane" oppure, ancor più sommariamente, come "detriti di versante". Quest'ultima terminologia, in particolare, per quanto d'uso consolidato, non consente di comprendere per intero i connotati fenomenologici.

SUMMARY

Northern Sardinia (Italy) is characterized by a series of paleolandslides in different lithostratigraphic contexts of the Miocene succession. These large landslides have never been adequately studied and mapped and their kinematic processes are still insufficiently known. This study contains a description of the deposits of a paleolandslide in the Peru area (Castelsardo, North Sardinia). The surveying and mapping of its lithological and morphological characteristics were performed using in-the-field surveys, photointerpretation and the results of geognostic wells. A kinematic scheme explaining the origin of the deposits is then proposed. The stratigraphic relations between the landslide deposits and the eolian deposits of the Upper Pleistocene, visible along the coastline on the cliffs in the Peru area, allow us to date the phenomenon of instability and provide a new insight into the geology of the Quaternary in North Sardinia.

KEY WORDS: *paleolandslide, Upper Pleistocene, complex landslides, phyllosilicate-altered tuffites, North Sardinia*

INTRODUCTION

Interest in the study of landslides in Sardinia has up to now been rather scarce and discontinuous among scientists. It is widely believed that given the geomorphologic and geolithologic structure of the region, their influence on the land is fairly modest, that landslides have a low danger classification and that they represent even less of a risk. This belief has progressively contributed to consolidating the erroneous conviction that the island is practically immune from hydrogeologic hazard. Recently, the I.F.F.I. (APAT-RAS, 2005) project, on identifying 1523 cases of landslides, has instead revealed an ample range of cases in which there is a prevalence of rockfall phenomena.

Within this scenario, the not rare cases of stabilized relict landslides (*sensu* S.G.I-C.N.R., 1996) covering large areas are even less well known and studied. When identified, these phenomena are indicated on Sardinian geological maps and in literature under the generic name of "paleolandslides" or even more generically as "slope detritus". The latter term in particular, although its use has become consolidated, does not entirely explain the phenomenological connotations of the case.



Fig. 1 - Localizzazione dell'area in studio - Sardegna settentrionale
- Localization of the study area - North Sardinia



Il corpo di frana stabilizzato antico, oggetto del presente studio, è ubicato in prossimità della costa settentrionale della Sardegna, nella regione storica dell'Anglona in provincia di Sassari, al confine fra i comuni di Castelsardo e di Valledoria (Fig. 1), ed è stato per la prima volta descritto e perimetrato in seguito allo studio geologico e geomorfologico promosso dall'Ente Acque della Sardegna (EnAS) al fine di stabilire le cause dei dissesti dell'acquedotto "Coghinas I", attraverso il quale viene rifornita di acqua parte della Sardegna nord occidentale, sia per usi industriali che civili.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La successione litostratigrafica che caratterizza la serie miocenica, che costituisce il substrato dei depositi interessati dai dissesti, è già conosciuto da tempo con buon dettaglio (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1959, MAXIA & PECORINI, 1969; SPANO & ASUNIS, 1984), e costituisce il riempimento di un semi-graben che si è sviluppato in un regime tettonico prevalentemente distensivo a partire dall'Oligocene sup. - Aquitaniano (QUESNAY FOREST & QUESNAY FOREST, 1984; SOWERBUTTS, 2000).

Dal basso verso l'alto si distingue un complesso andesitico in duomi e colate, sormontato da una potente successione vulcano-sedimentaria di ambiente prevalentemente marino dell'Aquitano - Burdigaliano inf., costituita soprattutto da tufiti siltitiche e arenacee (*Molassa a Vaginella Auct.*) di almeno 300 m di spessore, in giacitura suborizzontale o con modesta immersione verso nord o nord-ovest, in cui si intercalano livelli conglomeratici grossolani e vulcanici rappresentati sia da lave andesitiche sia da ignimbriti. A questa unità, che verso est si appoggia direttamente sul basamento paleozoico, seguono, con una modesta discordanza angolare, ignimbriti del Burdigaliano a vario grado di saldatura, che mostrano spessori nell'ordine dei 30 m e che vengono a loro volta sormontate da depositi carbonatici litorali fossiliferi del Burdigaliano sup. - Serravalliano, attraverso l'interposizione di modesti spessori di depositi conglomeratici a ciottoli di quarzo e delle sottostanti vulcaniti.

Seguono, infine, depositi continentali di età presumibilmente quaternaria scarsamente descritti in letteratura e che sono oggetto del presente studio.

The ancient stabilized landslide body considered in this study is located near Sardinian northern coast, in the historical region of Anglona in the province of Sassari, on the border between the municipalities of Castelsardo and Valledoria (Fig. 1); it is described and its perimeter defined for the first time following a geological and geomorphological study organized by the Ente Acque della Sardegna (EnAS) with the aim of establishing the causes of damage to the "Coghinas I" aqueduct by means of which a part of northwestern Sardinia is supplied with water for civil and industrial uses.

GEOLOGY

The lithographic succession characterizing the Miocene series which is the substratum of the deposits involved in the slope instability has been known for some time in good detail (SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA, 1959, MAXIA & PECORINI, 1969; SPANO & ASUNIS, 1984), and is the filling in of a semi-graben that developed in a prevalently distensive tectonics of the Upper Oligocene. - Aquitanian (QUESNAY FOREST & QUESNAY FOREST, 1984; SOWERBUTTS, 2000).

From bottom to top there is an andesitic complex of domes and flows, overlaid by a thick volcanic-sedimentary succession of a prevalently marine environment of the Aquitanian - Lower Burdigalian, composed mostly of tuffaceous sandstone and mudstone (*Molassa a Vaginella Auct.*) of at least 300 m in thickness in a sub-horizontal position or with a slight immersion towards the north or northwest, in which we find intervals of rough conglomeratic and volcanic levels represented both by andesitic and ignimbritic lavas. This unit, is followed by Burdigalian ignimbrites with a modest angular discordance with different amount of welding that show thicknesses on the order of 30 metres and which in turn are surmounted by litoral carbonatic fossil-bearing deposits of the Upper Burdigalian - Serravallian, through the interposition of modest thicknesses of conglomeratic deposits with quartz and volcanic pebbles. Finally, there are continental deposits presumably of the Quaternary scantily described in the literature and which are the subject of this study.

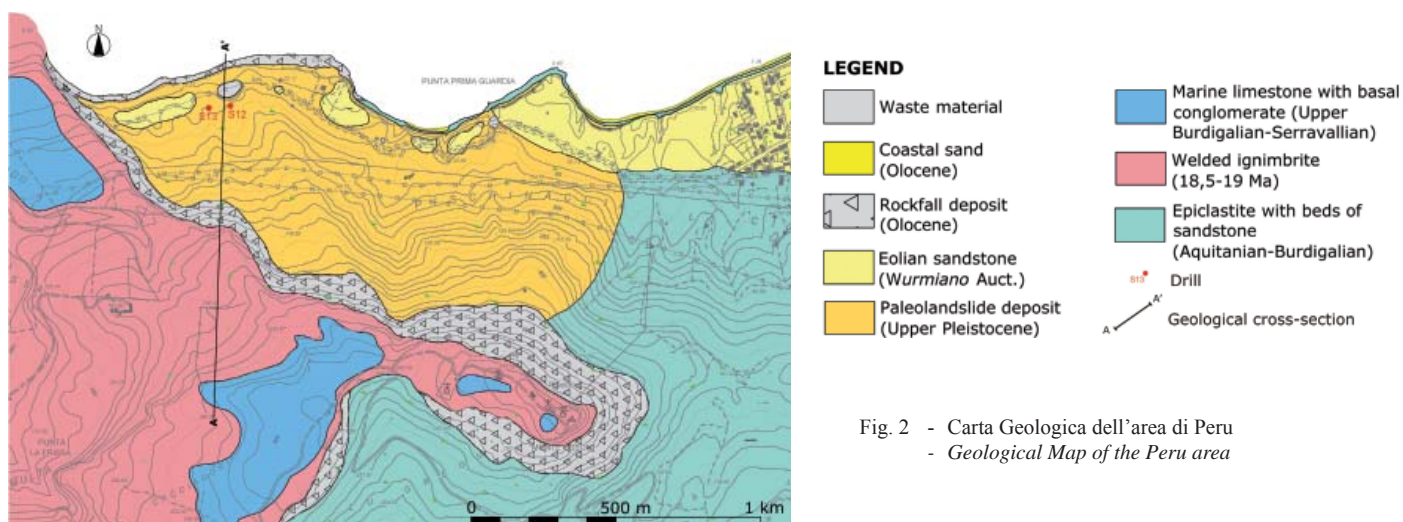


Fig. 2 - Carta Geologica dell'area di Peru
- Geological Map of the Peru area

ASSETTO GEOLOGICO LOCALE

Della successione vulcano-sedimentaria miocenica precedentemente descritta il termine più antico in affioramento nel settore di Peru è rappresentato dalle epiclastiti e vulcanoclastiti dell'Aquitania - Burdigaliano inf. sormontate dalle ignimbriti burdigaliane e dai sedimenti clastici e carbonatici del Burdigaliano sup.-Serravalliano che caratterizzano la sommità del rilievo di Monte Ossoni (Fig.2).

Lo studio finalizzato alla comprensione dei dissesti che hanno interessato l'acquedotto "Coghinas I" ha evidenziato come il versante di Peru sia contrassegnato, inoltre, dalla presenza di un corpo sedimentario relativamente potente e vasto, di origine continentale, qui interpretato come un melange di frana, sovrapposto alle epiclastiti e vulcanoclastiti dell'Aquitania che affiorano lungo la linea di costa a nord di Monte Ossoni.

LA PALEOFRANA DI PERU

Il rilevamento di campagna integrato dall'esecuzione dei sondaggi geognostici, che hanno raggiunto profondità massima di 33 m, ha permesso di stabilire come il deposito gravitativo si presenti privo di qualunque struttura ordinata e di ripetitività, con blocchi scompaginati di rocce litoidi o alterate, derivanti da vulcaniti e da tuffiti, all'interno di una massa detritica argillosa e ghiaiosa praticamente impermeabile. All'interno del deposito la disposizione delle sue componenti è del tutto caotica, il melange così definito, con litologie spesso pervasivamente argillificate, che generano prodotti dalle caratteristiche espandenti miste a blocchi sino a decametrici, inalterati, del litotipo originario, come visibile nella Fig. 3 e schematizzato nella sezione geologica (Fig. 4). Alcuni sondaggi hanno attraversato l'intero sviluppo del deposito superficiale raggiungendo la roccia in posto, costituita da epiclastiti lapidee, di colore dal verdastro all'azzurro (Fig. 5).

Il deposito sedimentario investigato, così particolare per potenza, estensione, forma e lineamenti litologici, deve ascriversi a quella casistica di fenomeni per lo più complessi, e mai adeguatamente precisati

LOCAL GEOLOGICAL SETTING

Of the Miocene volcanic-sedimentary succession just described, the oldest outcropping term in the Peru sector is represented by the Aquitanian - Lower Burdigalian epiclastites and volcanoclastites surmounted by the Burdigalian ignimbrites and clastic and carbonatic sediments of the Upper Burdigalian - Serravalliano that characterize the summit of Monte Ossoni (Fig. 2).

The study for the purpose of understanding the instability that damaged the Coghinas I aqueduct showed that the Peru slope is also marked by the presence of a relatively thick and extensive sedimentary body of continental origin, here interpreted as a landslide melange superimposed on the Aquitanian epiclastites and volcanoclastites that outcrop along the coastline to the north of Monte Ossoni.

THE PERU PALEOLANDSLIDE

The geological survey integrated with well logs data, which reached a maximum depth of 33 metres, allowed us to establish that the gravitational deposit is in no regular or repetitive order, with lithoid or weathered rocks in disarray originating from vulcanites and tuffites, supported in an impermeable clayey and gravelly matrix. Within the deposit the arrangement of its components is totally chaotic; the melange thus defined, with lithologies often pervasively phyllosilicate-altered, which generate expansive soils mixed with unweathered blocks up to tens of metres, of the original lithotype, as can be seen in Fig. 3 and schematized in the geological section (Fig. 4). Some drilling went through the entire development of the surface deposit and reached the bedrock composed of stony epiclastites varying in colour from greenish to light blue (Fig. 5).

This sedimentary deposit, quite unusual in thickness, extension, shape and lithological alignments, is to be assigned to cases of phenomena mostly complex and never suitably described in detail in Sardinia, which go under the generic name of "paleolandslides".



Fig. 3 - I depositi della paleofrana sovrastanti le arenarie eoliche del Pleistocene superiore, visibili lungo la falesia - *The paleo-landslide deposits above the aeolian sandstones of the Upper Pleistocene to be seen along the cliff*

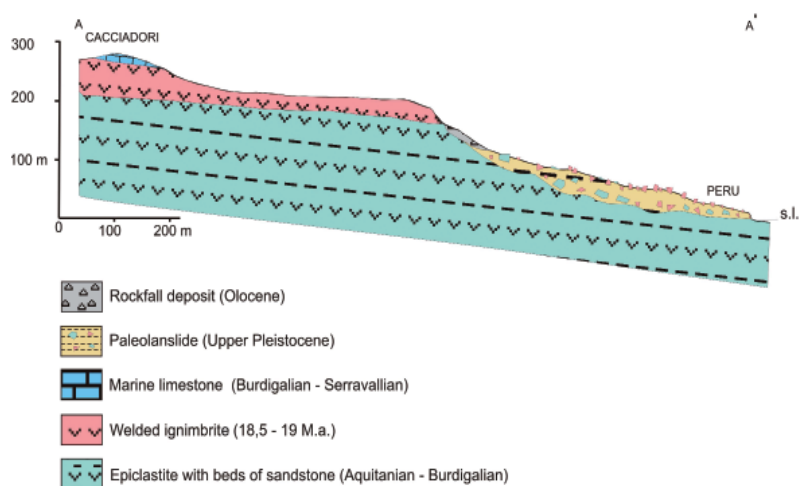


Fig. 4 - Sezione geologica lungo l'asse AA' - *Geological cross section along the AA' axis*

in Sardegna, che va sotto il nome generico di “paleofrana”. Volutamente e per comodità, nel corso della caratterizzazione si farà uso di questo termine e solo in conclusione si tenterà di pervenire ad ipotesi genetiche che possano giustificare una terminologia più definita. Esso si presta solo in parte ad una esaustiva sintesi dello stato di fatto, anche perché, del resto, è del tutto evidente che la situazione rilevata non testimonia tanto di un singolo od isolato fenomeno gravitativo, quanto di un corpo litologico risultante da una serie di processi protrattisi nel tempo.

EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA DEL VERSANTE DI PERU ED IPOTESI CINEMATICA

L'area dove si sviluppa la paleofrana occupa la parte bassa del versante che separa la cornice ignimbratica del M.te Ossoni-Campulandru dalla linea di costa (Fig. 6).

Per le sue caratteristiche si può definire una frana areale complessa relictta (S.G.I.-C.N.R., 1996), che si è sviluppata all'interno delle tufti dell'Aquitaniense, generata da scivolamenti retrogressivi multipli (con crolli associati), che evolvono in colate di roccia (rock flows; Bisci *et alii*, 1996; Carrara *et alii*, 1985; Varnes, 1978; Zischinsky, 1966). L'evoluzione del fenomeno è palesemente retrogressiva, in quanto il movimento del corpo di frana si è esteso in senso opposto a quello dello sviluppo delle superfici di rottura, coinvolgendo in maniera sostanzialmente passiva la coltre ignimbratica di tetto, la cui spinta fratturazione può avere comunque esercitato un ruolo non secondario nella formazione delle superfici di rottura nelle epiclastiti argillificate. Lo stile della frana, eventuale combinazione e ripetizione di più cinematiche all'interno dello stesso evento, è complesso in quanto descrivibile facendo riferimento ad almeno quattro tipi di movimento semplice: ribaltamento, crollo, scivolamento e colamento. Sussistono tuttavia gli elementi dello stile multiplo, ovvero la ripetizione dello stesso tipo di movimento con contatti fra nuove masse spostate e vecchie superfici di rottura subordinate.

For convenience, we have decided to use this term in characterization and only in the conclusions will we attempt to arrive at genetic hypotheses that may justify a better-defined terminology. It lends itself only in part to a complete synthesis of the state of fact, also because it is quite evident that the situation that emerged does not indicate a single or isolated gravitational phenomenon, but a lithological body resulting from a series of processes that took place over a long period of time.

GEOMORFOLOGICAL EVOLUTION OF THE PERU SLOPE AND KINEMATIC HYPOTHESIS

The investigated area is in the lower part of the slope that separates the ignimbric cliff of Monte Ossoni-Campulandru from the coastline (Fig. 6).

Owing to its characteristics, we are here dealing with a complex relict large landslide (S.G.I.-C.N.R., 1996), which developed within the Aquitanian tuffites and which was generated by multiple retrogressive slides (with associated rockfalls), which evolved into rock flows (Bisci *et alii*, 1996; Carrara *et alii*, 1985, Varnes, 1978; Zischinsky, 1966). The evolution of the phenomenon is clearly retrogressive since the movement of the landslide body extends in the direction opposite to that of the rupture surface, thus involving in a substantially passive way the roof ignimbric nappe; its rupture thrust may in any case have played a not secondary role in the formation of the rupture surfaces in the altered epiclastites. The style of the landslide, and the possible combination and repetition of several kinematics within the same event, is complex in that it can be described by referring to at least four types of simple movements: toppling, rockfall, sliding and flowing. However, there are elements of the multiple style, that is, the repetition of the same kind of movement with contact between new displaced masses and old subordinate rupture surfaces.

THE PALEOLANDSLIDE AT PERU (CASTELSARDO - NORTH SARDINIA, ITALY): DEFINITION, LITHOSTRATIGRAPHY AND RELATIONSHIPS TO OTHER CONTINENTAL QUATERNARY DEPOSITS

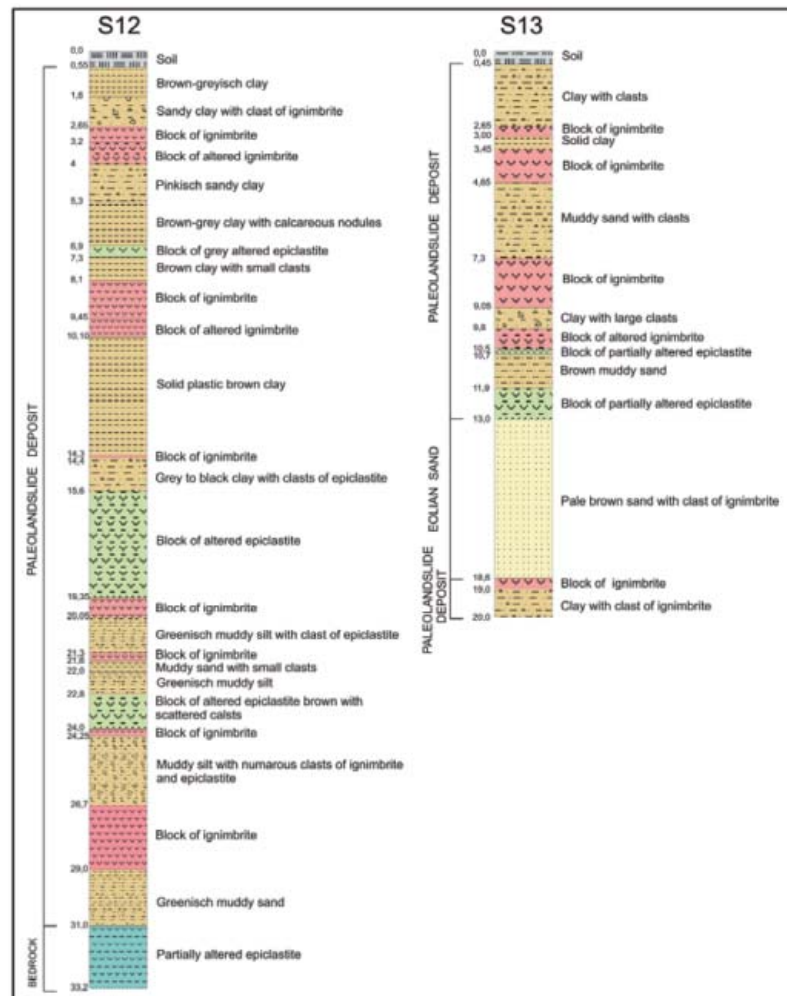


Fig. 5 - Stratigrafia dei Sondaggi S12 e S13
- Stratigraphy of probess S12 and S13

Fig. 6 - Panoramica della paleofrana vista da Monte Ossoni
- Overview of the paleo-landslide seen from Monte Ossoni



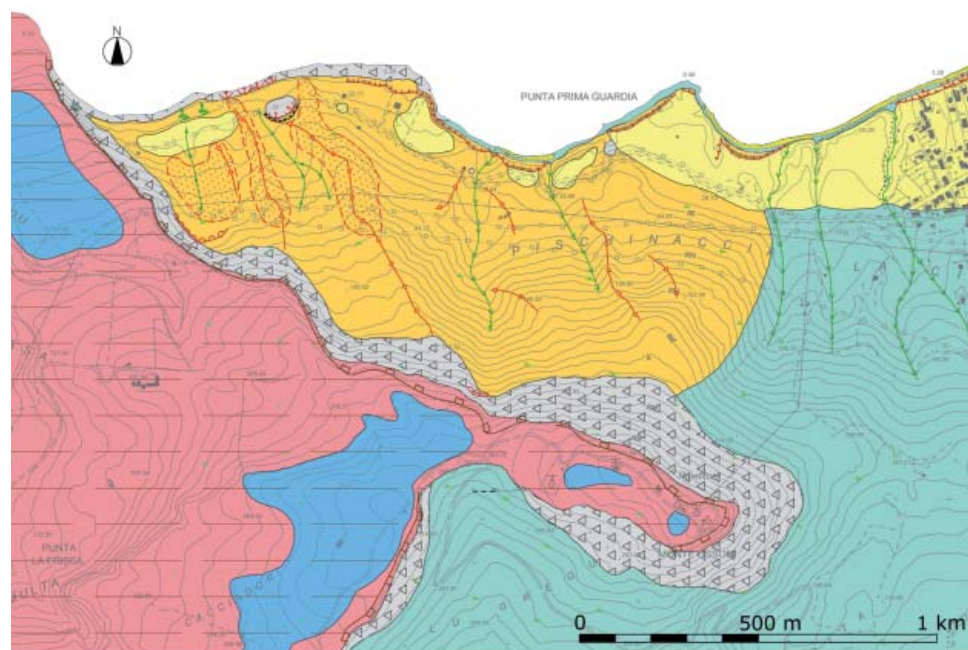


Fig. 7 - Carta Geomorfológica dell'area di Peru-La Ciaccia
- Geomorphological Map of the Peru-La Ciaccia area

Tale tipologia di fenomeno non trova alcun riscontro attuale nel territorio della Sardegna.

Infine, si sottolinea come, una volta definito il modello geologico, sia stato anche possibile individuare ulteriori localizzazioni di paleofrane all'esterno dell'area in studio e come ciò possa consentire di attribuire ad esse il rango di unità sedimentarie continentali pleistoceniche.

Sul terreno s'intuisce l'importanza di tale unità geologica sulla base, in primo luogo, dell'estensione (circa 2 km²), della sua giacitura e della continuità. Gli spessori riscontrati sono, inoltre, ben superiori a quelli valutabili alla scala dell'affioramento, peraltro variabili (8-10 m al max) in funzione dell'assetto morfologico. Infatti, va detto che la paleofrana è, a sua volta, paleosamente reincisa ed erosa in superficie in più settori da processi geomorfologici recenti ed attuali come osservabile lungo la falesia.

Un tentativo di comprensione dell'evoluzione geomorfologica del versante si può effettuare osservando la disposizione geometrica

At present, no other phenomenon of this type has been found in Sardinia.

Finally, once the geological model has been defined, even outside the study area further locations of paleolandslides have been identified, to which the rank of continental Pleistocene sedimentary unit may be correctly attributed.

In the field, one can see the importance of this geological unit, mainly on the basis of its extension (approximately two square kilometres), its attitude and continuity. Furthermore, the thicknesses found are far greater than those assessable at the scale of the outcrop, which varies (max. 8-10 metres) as a function of the morphological layout. Indeed, it must be said that the paleolandslide is in turn clearly dissected and eroded on the surface in different sectors by recent and actual geomorphological processes, as can be seen along the slope.

On observing the geometric layout of the small re-eroded val-

delle vallecole di reincisione (Fig. 7), notando come esse siano disposte con assetto planimetrico subparallelo, lievemente a ventaglio rispetto alla cornice ignimbratica residuale, risultando fra loro separate da alti morfologici che culminano con concentrazioni di blocchi prismatici di ignimbriti di varia dimensione.

L'assetto geomorfologico così individuato suggerisce l'ipotesi che ognuna di queste morfologie convesse del versante possa costituire la forma residua, rierosa e disgregata di ciascuno degli originari "fronti" di distacco per scivolamento, secondo superfici di taglio parallele a quello che doveva essere il fronte originario. Nel distacco ciascuno di tali "fronti", pur conservando una stratigrafia di massima conforme con quella originaria (tufti in basso, ignimbriti in alto), si disarticola al suo interno durante la cinematica di scivolamento via via evolvente in flusso, scomponendosi nei vari blocchi lapidei di fratturazione che, pur sconnettendosi fra loro e rispetto al substrato, flottano all'interno di una massa grossolanamente solidale. In tal senso le parti più profonde del melange di frana (in prevalenza cineritiche), dovrebbero essere quelle che, subendo maggiori deformazioni e cinematismo, tendono ad aumentare i comportamenti plastici; al contrario in superficie prevalgono tendenze più rigide a carico della massa a blocchi lapidei che si frantuma e disarticola fluendo.

In sostanza, sul piano dell'interpretazione geomorfologica, la frana, come detto, deve considerarsi generata inizialmente da scivolamenti retrogressivi multipli (con crolli associati), evolutisi in colate di roccia (rock flows). Pertanto l'attuale assetto del versante, con vallecole reincise e creste, va interpretato come il testimone residuale degli originari allineamenti di masse spostate lungo le scarpate, ancora in parziale contropendenza rispetto al versante stesso.

Sulla superficie del versante, in corrispondenza delle convessità morfologiche, si concentrano i trovanti di grandi dimensioni prodotti dai cinematismi agenti sulle ignimbriti. Di lato a queste concentrazioni e verso il basso, a partire da circa 20 m s.l.m., la paleofrana risulta interstratificata ad eolianiti attribuite in letteratura al Würmiano auct. (PECORINI, 1954; OROMBELLI *et alii*, 2005) o più propriamente al Pleistocene superiore come comune anche in altre parti dell'Isola (LECCA & CARBONI, 2007).

Oltre alla grande quantità di blocchi ignimbratici dispersi, di dimensioni metriche e plurimetriche, con pesi stimabili anche oltre le 10 tonnellate, il melange detritico con cui si presenta la paleofrana risulta ripetutamente segnato in superficie dalla presenza di interi segmenti (evidentemente anch'essi cunei o prismi di distacco ma di dimensioni lineari decametriche) costituiti da cineriti e piroclastiti cineritiche grigie, spesso contrassegnate da reticoli di piani di taglio, facenti parte dell'unità vulcanoclastica sottostante le ignimbriti sommitali. In affioramento la continuità di tali segmenti è tale, sovente, da poter trarre in inganno il rilevatore, potendo erroneamente attribuire tali specifici elementi al substrato in posto.

E' del tutto evidente, dunque, che questo specifico assetto del melange detritico a megablocchi deve trovare una spiegazione nella cinematica della frana e, quindi, la formulazione di una convincente ipo-

leys (Fig. 7), it can be seen that they are arranged in a subparallel planimetric pattern, slightly fan-like with respect to the residual ignimbric cliff, and are separated by high morphological plateaux culminating in concentrations of prismatic blocks of ignimbrites of different sizes.

Such a geomorphological structure suggests the hypothesis that each of these convex slope morphologies may represent the residual, re-eroded and broken form of each of the original "fronts" of detachment by sliding, following shear surfaces parallel to what must have been the original front. In the detachment, each of such "fronts", while maintaining a stratigraphy roughly conforming to the original one (tuftites below, ignimbrites above), becomes disarticulated on the inside during the sliding kinematics which in time becomes a flow, decomposing into the several fractured blocks of stone which, although separating one from the other and with respect to the substrate, float inside a coarsely integral mass. In this sense, the deepest levels of the landslide melange (prevalently ash tufts), should be the ones that tend to increase plastic behaviour since they undergo greater deformation and kinematism; on the contrary, at the surface more rigid tendencies prevail concerning the mass of stone blocks that break up and disarticulate as they flow.

Substantially, on the plane of geomorphological interpretation, the landslide is to be considered as generated initially by multiple retrogressive slides (with associated rockfalls) which evolved into rock flows. Therefore, the present slope structure, with small re-eroded valleys and crests, is to be interpreted as indicating the residue of the original alignments of masses displaced along the slopes, still in partial counterslope with respect to the slope itself.

On the surface of the slope, in correspondence to the morphological convexities, we have a concentration of the large erratic blocks produced by the kinematisms acting on the ignimbrites. Beside and below these concentrations, starting from about 20 metres a.s.l., the paleolandslide is interstratified with aeolianites assigned in the literature to the Würmian auct. (PECORINI, 1954; OROMBELLI *et alii*, 2005) or more properly to the Upper Pleistocene, as is common also elsewhere on the island (LECCA & CARBONI, 2007).

Besides the large numbers of dispersed ignimbric blocks having sizes from one metre to several metres, estimated as weighing more than 10 tonnes, the debris melange of the paleolandslide is repeatedly marked on the surface by the presence of entire segments (evidently detachment wedges or prisms with linear dimensions of tens of metres) composed of cinerites and grey cineritic pyroclastites, often characterized by grids of shear planes which are part of the volcano-clastic unit underlying the ignimbrites at the summit. In outcrops, the continuity of these segments is often such that it can mislead the surveyor, who may erroneously attribute these specific elements to the substratum bedrock.

It is thus quite evident that this specific arrangement of the debris melange with large blocks must find its explanation in landslide kinematics and therefore the formulation of a convincing genetic hy-

tesi genetica deve tener conto anche della loro consistente presenza.

In questo quadro e malgrado le re-incisioni, il contatto del corpo di frana col substrato terziario conservatosi in posto, ovvero non soggetto a movimento, lungo il versante non è rilevabile, in quanto le finestre erosive non sono tali da metterlo in evidenza. Esso è stato rilevato sul versante solo mediante i sondaggi che hanno raggiunto profondità maggiori di 20 m dal piano di campagna. Lo stesso contatto, tuttavia, si può rilevare alla base della falesia dove le tuftite si immergono al di sotto del livello del mare.

La ricostruzione del modello geomorfologico si completa ammettendo che:

- la cinematica gravitativa sia stata vergente verso nord-nord-est e che essa si sia determinata secondo differenziali cinematici più ampi (sviluppo dello spostamento totale sia in verticale che orizzontale) nel settore più settentrionale (subito ad est del promontorio di Campulandru);
- le superfici di rottura e di scivolamento principali debbano ritenersi ubicate all'interno dell'originaria massa delle tuftite;
- altre superfici di rottura abbiano interessato l'originario versante, dando luogo ad un profilo a gradoni in contropendenza, via via rimaneggiati nell'ambito della progressiva deformazione gravitativa per scivolamento e colamento;
- il processo gravitativo abbia assunto a livello superficiale i connotati di un lento colamento di detriti e blocchi di rocce (rock flows), nel quale l'originaria massa rocciosa in movimento (tuftite in basso) si sia alterata e deformata progressivamente in modo plastico, soprattutto nelle parti più basse, inducendo tuttavia deformazioni tendenzialmente più rigide, in alto. Ciò spiegherebbe la conservazione e la maggiore concentrazione nella parte alta del melange di blocchi di tuftite alterate e di ignimbriti lapidee.

Attualmente la paleofrana affiorante lungo tutto il versante, in assenza di turbamenti artificiali, deve considerarsi in uno stato di attività relitto (*sensu* S.G.I.-C.N.R., 1996), in quanto difficilmente le attuali condizioni di morfoclima sono quelle che ne hanno giustificato la messa in posto. Essa rientra, dunque, nel campo dei fenomeni di stabilizzazione di tipo naturale, in quanto le varie porzioni litologiche che la costituiscono sono colonizzate da macchia e non può quindi essere riattivata per cause naturali.

Le originarie superfici di rottura, sono da localizzare probabilmente all'interno dell'originaria piattaforma ignimbritica, di cui quella attuale (M.te Osoni-Campulandru) deve considerarsi una forma residuale a causa del progressivo arretramento della scarpata.

Riepilogando: lo stile della frana è complesso in quanto descrivibile facendo riferimento ad un'ipotesi di almeno quattro tipi di movimento (ribaltamento, crollo, scivolamento e colamento) ma sussistono anche elementi che fanno ipotizzare quello multiplo, con ripetizione dello stesso tipo di movimento con contatti fra nuove masse spostate e vecchie superfici di rottura subordinate.

Lo stadio è quello di un fenomeno gravitativo esaurito. Lungo tutto il declivio esaminato non sono stati rilevati segnali o indizi di movi-

pothesis must also take into account their consistent presence.

In this framework and despite the re-erosions, the contact of the landslide body with the Tertiary substratum, that is, not subject to movement, cannot be identified along the slope since the erosion windows are not such as to reveal it. It was found on the slope only by means of drills that reached depths of more than 20 metres from ground level. The same contact, however, can be seen at the base of the slope where the tuftites go beneath the surface of the sea.

The reconstruction of the geomorphological model is completed by admitting that:

- the gravitational kinematics tends towards the north-east and that it is determined by more ample kinematic differentials (development of total displacement, both vertical and horizontal) in the northernmost sector (immediately to the east of the Campulandru promontory);
- the main rupture and sliding surfaces must be considered as located inside the original mass of tuftites;
- other rupture surfaces involved the original slope, thus creating a countersloping terraced profile weathered within the framework of the progressive gravitational deformation caused by sliding and flowing;
- the gravitational process has assumed at the surface level the features of a slow debris flow and rock flow in which the original rocky mass in movement (tuftites below) has weathered and become deformed plastically, especially in the lower parts, while producing tendentially more rigid deformations above. This would explain the conservation and greater concentration in the higher part of the melange of weathered tuftite blocks and stony ignimbrites.

At present, throughout the slope, the paleolandslide, lacking artificial disturbances, is to be considered as being in a state of relict activity (as defined by the S.G.I.-C.N.R., 1996), since the present morphoclimatological conditions are hardly those that caused it. It thus falls in the field of natural stabilization phenomena since the several lithological portions that constitute it are colonized by Mediterranean bush and thus cannot be reactivated by natural causes.

The original rupture surfaces are probably located within the original ignimbritic platform, of which the present one (Mt. Osoni-Campulandru) is to be considered a residual form owing to the progressive retreat of the scarp.

Summing up: the style of the landslide is complex in that it can be described by referring to an hypothesis of at least four types of movements (toppling, rockfall, sliding and flowing); however, there are elements leading to the hypothesis of a multiple style, with a repetition of the same kind of movement with contacts between new displaced masses and old subordinate rupture surfaces.

The phase is that of an exhausted gravitational phenomenon. Along the entire slope examined, no signs of movement of any kind (cracks, fissures, dislocations) were seen, with the exception of:

- menti (crepe, fenditure, dislocazioni) di alcun tipo, fatta eccezione per:
- la stretta area di riferimento delle indagini geognostiche, le cui fenomenologie locali attengono a ragioni del tutto diverse e, soprattutto, assai differite rispetto a quelle che hanno generato il fenomeno di massa antico e sono da ritenersi connesse direttamente con le sollecitazioni di natura artificiale recate sul sito dalle modellazioni di origine antropica;
 - la falesia sul fronte marittimo, soggetta a fenomeni di arretramento legati agli effetti dell'esposizione marittima e al ruscellamento originato da piogge intense.

Per quanto attiene alla velocità complessiva del fenomeno è evidente che essa non può che essere attribuita in via ipotetica, resta il fatto comunque che gli elementi litologici e geomorfologici a disposizione suggeriscono, escludendo i crolli, successioni di fenomeni di tipo molto lento o anche estremamente lento.

CONCLUSIONI

Nella Sardegna settentrionale l'area corrispondente ai bacini miocenici del Logudoro e dell'Anglona offre un quadro di problematiche a carattere gravitativo piuttosto ampio, sia per ragioni strettamente geo-litologiche che d'ordine stratigrafico e geomorfologico.

In essa l'elemento comune e caratterizzante è la presenza di un substrato vulcanico calco-alkalino fratturato e dislocato, con associati prodotti epiclastici di origine continentale o marina. In questo contesto i processi di alterazione (non di rado con generazione di argille espandenti), determinatisi a partire da più favorevoli condizioni paleoclimatiche al contorno e gli effetti morfodinamici innescati dalle variazioni eustatiche, hanno agito quanto meno come condizione predisponente ai processi di franamento oggi rilevabili. Ad essi possono aggiungersi in via ipotetica, anche quelli di un'attività tettonica non ancora sufficientemente documentata, che parrebbe testimoniata dalla residua debole attività sismica attuale.

I risultati dell'indagine geologica, geomorfologica e geognostica hanno consentito di perimetrare un grande corpo di frana dell'area di Peru, di redigerne la litostratigrafia e di pervenire alla sua modellizzazione geologica e geomorfologica.

I depositi di frana, con spessori nell'ordine delle decine di metri, (circa 30 m nel S12), in ogni caso variabili lungo il versante, litologicamente sono costituiti da un melange di blocchi sino a decametrici di ignimbriti saldate e di tufti a vario grado di alterazione, inglobati in matrice argillosa ed argilloso-sabbiosa a tratti assai plastica e con evidenti tendenze ad espandere.

La paleofrana è distinguibile come frana relitta complessa, generata da scivolamenti retrogressivi multipli con crolli associati su substrato in tufti dell'Aquitano. Tali scivolamenti si sono evoluti nello spazio in colate di detrito e roccia (rock flows). La distribuzione del fenomeno è palesemente retrogressiva, in quanto il movimento del corpo di frana si è esteso in senso opposto a quello dello sviluppo progressivo delle superfici di rottura (da localizzare in primo luogo all'interno dell'originaria piattaforma ignimbritica).

- the narrow area of reference of the geognostic investigations, the local phenomena of which can be attributed to completely different reasons and, most of all, are quite removed in time from those that generated the ancient mass phenomenon and are to be considered as directly connected with stresses of an artificial nature caused by anthropic shaping;
- the cliff on the maritime front, subjected to retreat phenomena owing to the effects of exposure to the sea and runoff water from intense rainfall.

As concerns the overall velocity of the phenomenon, it is evident that it must be hypothetically established; however, the fact remains that the lithological and geomorphological elements available suggest, excluding rock falls, successions of phenomena of a very slow or extremely slow nature.

CONCLUSIONS

In North Sardinia the area corresponding to the Miocene basins of the Logudoro and Anglona regions offers an overview of problems of a rather ample gravitational nature, both for strictly geolithological and stratigraphic and geomorphological reasons.

In it the common and characterizing element is the presence of a fractured and displaced volcanic, calco-alkaline substratum with associated epiclastic products of continental or marine origin. In this context the weathering processes (not rarely with generation of expanding clays) that originated from more favourable paleoclimatic conditions acted at least as the condition leading to the landslide processes we can see today. To them we can hypothetically add those of tectonic activity that has not as yet been sufficiently documented and which would appear to be indicated by the present residual weak seismic activity.

The results of the geological, geomorphological, geognostic and geotechnical investigations have made it possible to locate the boundaries of the entire landslide body of the Peru area, to illustrate its lithostratigraphy and arrive at its geological and geomorphological modelling.

The landslide deposits are composed of a melange of blocks up to tens of metres of welded ignimbrites and tuffites, weathered to different extents, enclosed in a clayey and clayey-sandy matrix, sometimes quite plastic and with an evident tendency to expand; they have thicknesses on the order of tens of metres (about 30 m in S12), but variable along the slope.

The paleolandslide is distinguishable as a complex relict areal landslide generated by multiple retrogressive slides with associated rockfalls on a substratum of Aquitanian tuffites. Such slides have evolved in space as debris flows and rock flows. The distribution of the phenomenon is clearly retrogressive since the movement of the landslide body has extended in the direction opposite to that of the progressive development of the rupture surfaces (localized mostly inside the original ignimbritic platform). The

Lo stile della frana è complesso in quanto descrivibile facendo riferimento ad almeno quattro tipi di movimento in sequenza: ribaltamento, crollo, scivolamento e colamento; sussistono ad ogni modo gli elementi dello stile multiplo, ovvero la ripetizione dello stesso tipo di movimento con contatti fra nuove masse spostate e vecchie superfici di rottura subordinate.

Si tratta dunque di una frana stabilizzatasi naturalmente lungo un versante nel quale, sulla base delle verifiche, non sussistono più condizioni funzionali ai movimenti, salvo quelli a carattere superficiale innescati da acque di ruscellamento incanalate, da scalzamento ondoso in falesia o da tagli artificiali. Essa costituisce dunque una condizione di pericolo geologico che in assenza di adeguate contromisure ed approcci progettuali, può risultare predisponente all'innescio di instabilità locali.

Sulla base dello studio geologico e dell'indagine geognostica si deve escludere che il versante costituito dalla formazione denominata Paleofrana di Peru sia al momento interessato da movimenti di massa profondi: esso deve quindi ritenersi stabile.

Fenomeni legati all'azione del ruscellamento da un lato e della dinamica ondosa dall'altro interessano al momento il fronte della paleofrana esposto in falesia. Il settore dove si sono verificati i dissesti dell'acquedotto "Coghinas I" è interessato da rotture del terreno connesse con comportamenti geotecnici delle masse argillose rimaneggiate dai lavori conseguenti agli interventi di realizzazione della condotta ma non ai fenomeni di instabilità del versante.

Sul piano più strettamente geologico è stato possibile risalire all'età di messa in posto della paleofrana in quanto all'interno di essa si trovano intrastratificate unità deposizionali di origine eolica che vengono attribuite al Pleistocene superiore, ben rappresentate nel settore ed in altre parti costiere dell'isola. Questo elemento costituisce sicuramente un dato scientifico originale e di interesse stratigrafico poiché, aprendo nuove opportunità nell'approccio allo studio dei corpi continentali in termini litostratigrafici, ne sottolinea l'importanza per la piena comprensione dell'evoluzione geologica del Quaternario della Sardegna.

OPERE CITATE / REFERENCES

- APAT - RAS (2005) - *Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi In Italia)* - Regione Sardegna, Assessorato della Difesa dell'Ambiente.
- BISCI C, DRAMIS F. & SORRISO-VALVO M. (1996)- *Rock Flow (Sackung)*. In: *Rock flow (Sackung)*. In: R. DIKAU, D. BRUNSDEN, L. SCHROTT & M.-L. IBSEN (eds.): *Landslide Recognition*, Wiley, 150-160.
- CARRARA A., D'ELIA B. & SEMENZA E. (1987)- *Classificazione e nomenclatura dei fenomeni franosi*. *Geol. Appl. Idrogeol.*, **20**: 223-243.
- LECCA L. & CARBONI S. (2007)- *The Tyrrhenian section of San Giovanni di Sinis (Sardinia): Stratigraphic record of an irregular single high stand*. *Rivista Ital. di Paleont. e Stratigr.*, **113**: 509-523.
- MAXIA C. & PECORINI G. (1969) - *La zona di Castelsardo: la meno incompleta serie miocenica della Sardegna*. *Giorn. Geol.*, **35**: 345-357.
- MONTIGNY R., EDEL J.B. & THUIZAT R. (1981) - *Oligo-Miocene rotation of Sardinia: K/Ar ages and palaeomagnetic data of Tertiary volcanics*. *Earth Planet. Sci. Letters*, **54**: 261-271.
- MORETTI A. (1937) - *Osservazioni sul Terziario dell'Anglona nord-orientale (Sardegna)*. *Boll. R. Uff. Geol. d'It.*, **62**: 1-25.
- PECORINI G. (1954)- *Le dune fossili della Nurra di Alghero*. *Rend. Accad. Naz. Lincei*, **16**: 735-741.
- ODIN G.S., ASSORGIA A., BARCA S., PORCU A., SPANO C., HERNANDEZ J. & COSCA M. (1994) - *Ar/Ar geochronology of a Burdigalian tuff from central-northern Sardinia*. *Giorn. di Geol.*: **56**(1): 185-197, Bologna.
- OROMBELLI G, RAVAZZI C. & CITA M.B. (2005)- *Osservazioni sul significato dei termini LGM (UGM), Tardoglaciale e postglaciale in ambito globale, italiano e alpino. Il Quaternario - Italian Journal of Quaternary Sciences*, **18**: 147-155.

style of the landslide is complex in that it can be described by referring to a sequence of at least four kinds of movement: toppling, rockfalls, sliding and flowing. However, there are elements of the multiple style, that is, the repetition of the same kind of movement with contacts between new displaced masses and old subordinate rupture surfaces.

We are thus dealing with a landslide that became stabilized along a slope in which, on the basis of investigations carried out, there are no longer conditions functional to movement, except for those of a superficial nature caused by channelled runoff water, by wave erosion of the cliff or artificial cuts. It thus represents a condition of geological hazard which, unless proper countermeasures are planned and taken, may lead to local instability.

Based on the geological survey and the geognostic investigation carried out, it can be excluded that the slope consisting of the formation known as the Peru Paleolandslide is at present subject to mass movements in depth: it must therefore be considered stable.

Phenomena connected with the action of runoff water on the one hand and wave dynamics on the other now involve the front of the paleolandslide exposed in the cliff. The sector in which damage to the Coghinas I aqueduct occurred is influenced by ruptures of the terrain connected with geotechnical behaviours of the clayey soils rearranged by works for the construction of the aqueduct but not with slope instability phenomena.

On the strictly geological plane, it was possible to date the movement of the paleolandslide since inside it one finds intrastratified depositional units of aeolian origin attributed to the Upper Pleistocene which are well represented in the sector and other coastal areas of Sardinia. This element surely constitutes an original scientific datum and one of stratigraphic interest since, on opening up new opportunities in the approach to the study of continental bodies in lithostratigraphic terms, it underscores its importance in acquiring full knowledge of the geological evolution of the Quaternary in Sardinia.

THE PALEOLANDSLIDE AT PERU (CASTELSARDO - NORTH SARDINIA, ITALY): DEFINITION, LITHOSTRATIGRAPHY AND RELATIONSHIPS TO OTHER CONTINENTAL QUATERNARY DEPOSITS

- QUESNAY FOREST C. & QUESNAY FOREST F. (1984) - *Etude sedimentologique et structurale de la bordure orientale du fosse oligo-miocene sarde*. Ecol. Nat. Sup. Pétrol. Mot. I.F.P., 118 pp., Paris.
- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1959)- *Carta Geologica d'Italia, Foglio 180 "Sassari"*. I.P.Z.S., Roma
- S. G. I. - C.N.R. (1996) - *Guida al censimento dei fenomeni franosi e alla loro archiviazione*. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato, 81 pp.
- SOWERBUTTS A. - *Sedimentation and volcanism linked to multiphase rifting in an oligo-Miocene intra-arc basin, Anglona, Sardinia*. Geol. Mag., 2000, 395-418.
- SPANO C. & ASUNIS M.I. (1984) - *Ricerche biostratigrafiche nel settore di Castelsardo (Sardegna settentrionale)*. Boll. Soc. Sarda Sc. Nat.: **23**: 45-74, Sassari.
- TILOCCA G. (1989) - *I bacini continentali miocenici della Sardegna settentrionale con particolare riguardo alle loro facies fito-vulcano-clastiche e carbonatico-silicee (Logudoro-Nurra-Anglona-Gallura)*. Tesi di Dottorato inedita, 273 pp.
- VARNES D.J. (1978)- *Slope movements types and processes*. In: SCHUSTER R.L. & KRIZEK R.J. Ed., *Landslides, analysis and control*. Transportation Research Board Sp. Rep. n. **176**, Nat. Acad. of Sciences, 11-33.
- ZISCHINSKY U. (1966) - *On the deformations of high slopes*. Proc. 1st Congress of the Int. Soc. Rock Mech., **2**: 179-185.

Received March 2009 - Accepted September 2009