COMPONENT T2

AZIONE T.2.3.4

METODOLOGIA COSTE ALTE

Unità operativa UNICA (Università di Cagliari)

Introduzione 4
1 QUADRO CONOSCITIVO 5
1.1 Quadro normativo 5
1.1.1 Quadro normativo italiano 5
1.1.1.1 Quadro Normativo Regionale 6
1.1.2 Quadro Normativo Francese 6
1.1.2.1 Corsica 6
1.2 Dati disponibili 6
1.2.1 Frane 7
1.2.1.1 IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) 7
1.2.1.2 PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico) 8
1.2.1.3 PAC (Programma Azione Coste Sardegna) 8
1.2.1.4 Alcune esperienze applicative 9
1.2.2 Dati ondametrici 9
1.2.3 Dati climatici 10
2 METODOLOGIE D'INDAGINE 11
2.1 Obbiettivi 12
2.2 Unità di studio 12
2.3 RILIEVI ED ELABORAZIONE DATI 13
2.3.1 PARTE EMERSA 13
2.3.1.1 Analisi Fotografica Multitemporale 13
2.3.1.2 Caratteristiche morfologiche delle superfici 14
2.3.1.3 Caratteristiche Geologico-Strutturali 16
2.3.1.4 Caratteristiche Geomorfologiche 17
2.3.1.5 Caratteristiche Geomeccaniche 22
2.3.1.6 Caratteristiche Geotecniche 24
2.3.1.7 Caratteristiche Idrogeologiche 24
2.3.1.8 Caratteristiche climatiche 27
2.3.2 PARTE SOMMERSA 28
2.3.2.1 Modello digitale del fondale: rilievi batimetrici 29
2.3.2.2 Rilievi batimetrici *singlebeam* 29
2.3.2.3 Il rilievo batimetrico multibeam 30
2.3.2.4 Rilievo *Side Scan Sonar* 30
2.3.3 Moto ondoso 33
3 GEODATABASE 35
3.1 Individuazione della piattaforma di archiviazione e pubblicazione dati 35

3.2 Il sistema Geonetwork 35
3.2.1 I metadati 36
3.2.2 Il database PostgreSQL 37
3.2.3 Implementazione delle funzionalità di GeoNetwork 38
3.2.4 Integrazione degli ambienti di archiviazione e pubblicazione dei database in un unico punto di accesso 39
4 VALUTAZIONE DELLA DINAMICA EVOLUTIVA 40
4.1 Analisi alla scala locale 41
4.1.1 Coste in arretramento 41
4.2 Analisi alla scala regionale (modelli di valutazione alla suscettività al dissesto) 44
4.2.1 Zonazione della suscettività, della pericolosità e del rischio da frana: generalità 45
4.2.2 Zonazione della suscettività da frana per le coste alte rocciose 46
4.2.2.1 Metodo semi-quantitativo (Del Rio & Gracia, 2009) 46
4.2.2.2 Metodologia probabilistica (Certainty factor) 47
4.2.2.3 Metodologia RES (Rock Engineering System) 49
4.2.2.4 Metodo basato su rilievi geologico-strutturali indiretti (De Vita et al., 2012) 52
5 PROPOSTA DEL PROTOCOLLO D'INDAGINE 53
5.1 Proposta di protocollo d'indagine alla scala locale 53
6 BIBLIOGRAFIA 56

Introduzione

Questo documento costituisce il prodotto finale della component T2.3 "Metodologia Costa alta" che, fotografando lo stato attuale delle conoscenze – incluse quelle più avanzate, indica quali sono gli elementi geologici, idrodinamici e climatici che è necessario acquisire per avere un quadro conoscitivo adeguato allo scopo di caratterizzare le coste alte rocciose in funzione della loro propensione all'instabilità. Viene dapprima fornito un quadro degli aspetti normativi che regolano la gestione di queste aree nelle regioni coinvolte nel progetto MAREGOT, quindi sono descritti i dati disponibili e le principali esperienze note riguardanti lo studio delle coste alte nell'ambito dell'area di intervento del progetto. Nel capitolo 2-"Metodologie d'indagine", viene fornito un quadro aggiornato dei principali metodi d'indagine che possono essere presi in considerazione quando si affronta questo tema di ricerca. In esso sono anche brevemente illustrate le modalità di acquisizione dei dati di base, come quelli topografici, anche con tecniche di analisi avanzate, che non sempre è possibile utilizzare nelle indagini, ma che si pensa possano essere di riferimento nel protocollo. Nel capitolo 3-Geodatabase viene illustrato il sistema di archiviazione dinamica ed interattivo dei dati acquisiti, da utilizzare non solo nella fase d'indagine ma anche in quella di monitoraggio. Nel capitolo 4-Valutazione dinamica viene descritta la metodologia di elaborazione dei dati raccolti, in particolare in funzione dell'analisi di stabilità e dell'analisi climatica, e soprattutto viene descritto il procedimento con cui i diversi elementi e le diverse metodologie con cui sono stati analizzati i fenomeni legati alla dinamica "terrestre" e quelli legati alla dinamica "marina" si integrano anche in funzione di un protocollo d'indagine. I metodi che possono essere applicati per una corretta valutazione della suscettività al dissesto sono descritti e discussi considerando sia gli aspetti alla scala dell'intervento pianificatorio (scala regionale), sia quelli per descrivere con la necessaria accuratezza come utilizzare i dati rilevati per la progettazione di interventi mirati sui dissesti (scala locale). Infine, nel capitolo 5-"Protocollo d'indagine" viene proposto il criterio con cui affrontare l'indagine sia ai fini pianificatori che dei singoli interventi, e costituisce la sintesi di quanto in precedenza discusso, indicando le scelte che si intende suggerire scegliendo tra le varie possibilità illustrate. È bene ricordare che solo al termine della successiva fase di applicazione diretta sul campo (component T3) si potrà redigere un protocollo d'indagine mirato alla definizione specifica delle modalità di analisi appropriate per i fenomeni di instabilità. In particolare, all'analisi sul sito sarà applicato un approccio *multiscaling*: 1) identificazione di tutte le situazioni di dissesto rilevabili nell'area pilota, distinguendone tipologia, livello di attività e generazione; 2) approfondimento sia morfostrutturale e idrogeologico di gran dettaglio che l'analisi geomeccanica e geotecnica sui dissesti tipologicamente più rappresentativi e/o a maggiormente attivi.

Per la selezione dei metodi che dovrebbero consentire il riconoscimento dei tratti di costa potenzialmente instabili e produrre una zonazione del pericolo idrogeologico, sarà necessario attendere i primi risultati della fase di applicazione che si svilupperà tra maggio 2018 e dicembre 2019 che permetterà di individuare i percorsi protocollari allo stesso tempo più efficaci in termini di prodotti ed efficienti in termini di economicità e fattibilità.

1 QUADRO CONOSCITIVO

1.1 QUADRO NORMATIVO

L'erosione costiera rappresenta un tema molto complesso da affrontare sia sotto il profilo tecnico che normativo. Una considerevole parte della popolazione mondiale vive lungo le coste dove sono concentrate anche le principali attività economiche; l'interazione dell'attività antropica con la dinamica costiera evidenzia l'esistenza di numerosi conflitti tra interessi pubblici, privati e l'erosione con la difesa costiera, non sempre gestiti da un quadro normativo adeguato. La pianificazione territoriale delle aree costiere è contraddistinta da una sovrapposizione di norme giuridiche nazionali, con competenze frammentate e mancanze di orientamento dovute al perseguimento di obiettivi tra loro contraddittori (Montebello, 2004).

Il quadro normativo internazionale manca di una disciplina uniforme nell'ambito dei diversi Stati dell'Unione Europea. Questa situazione è dovuta in gran parte all'assenza di una normativa comunitaria che favorisca l'integrazione di discipline differenziate, contemporaneamente la situazione generale è ulteriormente complicata dalla *governance* di competenze amministrative esistenti nei diversi Stati (Garzia, 2007). Gran parte delle convenzioni vigenti trattano di temi di carattere generale, all'interno dei quali l'erosione costiera riveste spesso un ruolo del tutto marginale (Convenzione di Barcellona 1976, Protocollo del 1996 alla Convenzione di Londra del 1972). Alcune direttive europee sono mirate all'individuazione degli ambienti marino costieri ai fini della conservazione, (Direttiva 92/43/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992, conservazione degli habitat naturali e seminaturali e della flora e della fauna selvatiche). Il Protocollo sulla Gestione Integrata delle Zone Costiere del Mediterraneo GIZC (in vigore dal 24 marzo 2011), ha l'obiettivo di promuovere un quadro comune per la gestione integrata delle zone costiere del Mediterraneo. Nell'ordinamento comunitario il tema dell'erosione costiera emerge in corrispondenza dei profili di tutela ambientale che coinvolgono alcune direttive (Direttiva 85/337/CE, Direttiva 97/11/CE, Direttive 2011/92/UE e 2014/52/UE). La politica comunitaria inerente alle zone costiere si sviluppa in modo organico nel Quinto e Sesto Programma d'Azione per l'Ambiente (2002-2012), in risposta ad una richiesta del Consiglio Europeo di definire una strategia globale per la GIZC.

Sulla base delle esperienze e dei risultati del programma dimostrativo sulla GIZC, l'Unione Europea ha poi adottato due documenti che costituiscono oggi i principali riferimenti dell'azione comunitaria in materia: la Comunicazione COM/2000/547 della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo sulla gestione integrata delle zone costiere e la Raccomandazione 2002/413/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio relativa all'attuazione della gestione integrata delle zone costiere in Europa. A seguito della Raccomandazione 2002/413/CE, la Commissione Europea ha adottato alcuni atti per la tutela dell'ambiente marino, a partire dalla Comunicazione della Commissione al Consiglio e al Parlamento Europeo del 24 ottobre 2005 "Strategia tematica per la protezione e la conservazione dell'ambiente marino "(COM/2005/504) e dalla proposta di Direttiva sulla strategia per l'ambiente marino.

Nel 2007 la Commissione Europea ha predisposto la "Valutazione della gestione integrata delle zone costiere in Europa" (COM/2007/308). La valutazione prende avvio dalle singole relazioni e contributi sulle strategie nazionali per promuovere la gestione integrata delle zone costiere inviate dagli Stati membri costieri.

Il quadro generale normativo vigente è completato da delle Direttive che disciplinano il problema della prevenzione dei rischi di erosione in area costiera (COM/2006/232, modifica alla Direttiva 2004/35/CE, Direttiva 2007/60/CE e Direttiva 2008/56/CE).

1.1.1 Quadro normativo italiano

l'Italia trasferisce le funzioni amministrative concernenti la gestione della fascia costiera dallo Stato centrale alle diverse autonomie locali. La prima Legge in materia di difesa delle spiagge è la n. 542 del 14 luglio 1907

(Legge per la difesa degli abitati dall'erosione marina) che, in alcune sue parti, può considerarsi tuttora applicata.

La Legge n.431 dell'8 agosto 1985 (Legge Galasso) prevede una generica individuazione della fascia costiera dei primi 300 m come bene da sottoporre a vincolo paesaggistico. Nel corso degli ultimi decenni, la difesa costiera è stata oggetto di un passaggio di competenze dalla Stato alle Regioni (Decreto del Presidente della Repubblica n. 616 del 24 luglio 1977, art. 69 comma 6); successivamente a Legge n. 183 del 18 maggio 1989 nell'art. 10 comma 7, attribuisce una piena responsabilità alle Regioni in materia di difesa costiera.

Successivamente il Decreto Legislativo n.112 del 31 marzo 1998, art. 89, comma 1, conferisce alle regioni tutte le funzioni relative alla programmazione, pianificazione e gestione integrata degli interventi di difesa delle coste e degli abitati costieri. La piena attuazione del Decreto Legislativo n.112 del 31 marzo 1998 consente di superare una situazione operativa complessa in quanto, anche dove era affermata la competenza regionale, rimaneva in ogni caso il parere vincolante di strutture dello Stato per l'esecuzione di lavori su proprietà demaniale marittima.

Con la Legge n. 179 del 31 luglio 2002, art. 21 (Disposizioni in materia ambientale) la competenza per gli interventi di tutela della fascia costiera è attribuita in maniera definitiva alle Regioni.

Il Decreto Legislativo n. 152 del 3 aprile 2006 (Norme in materia ambientale) all'art. 65, comma 3 lettera afferma che tra i contenuti del Piano di Bacino, rientrano anche le opere di protezione e consolidamento dei litorali marini che sottendono il distretto idrografico. L'art. 56 dello stesso decreto prevede anche le attività di programmazione, pianificazione e di attuazione relative alla difesa del suolo, protezione delle coste e degli abitati, dall'invasione e dall'erosione delle acque marine, il ripascimento degli arenili.

1.1.1.1 Quadro Normativo Regionale

Il quadro normativo regionale rispecchia in gran parte la situazione generale nazionale e internazionale, infatti esiste una certa eterogeneità dettata dai tratti normativi specifici e peculiari di ogni Regione. Alcune Regioni prevedono dei piani di gestione integrata delle aree costiere mirati alla pianificazione e alla programmazione di diversi interventi; altre Regioni hanno adottato delle Direttive di carattere tecnico e Direttive che disciplinano i procedimenti relativi all'approvazione degli interventi. Gran parte della normativa seguente è tratta dalla Tavola Nazionale sull'Erosione Costiera.

Il quadro normativo regionale per singola Regione è contenuto nell'allegato A

1.1.2 Quadro Normativo Francese

1.1.2.1 Corsica

PACA "Provence-Alpes-Côte d'Azur" Leroi, E., Bonnard, Ch., Fell, R., McInnes, R., 2005. 'Risk assessment and management'. State of the Art Paper No.6. Int. Conf. on Landslide risk mgt. Vancouver. Balkema

1.2 DATI DISPONIBILI

Il problema della stabilità delle coste rocciose, come ben evidenziato nel report T1.1.1 che riporta le esperienze esistenti e pregresse nel monitoraggio dell'instabilità delle coste alte, pur essendo sempre più oggetto di interesse da parte della componente tecnica della pubblica amministrazione, risulta essere affrontato solo in poche Regioni in modo sistematico, con una carenza di normative tecniche di pianificazione ed intervento che viene colmata con interventi puntuali in presenza di emergenze di protezione civile, incidendo in maniera superficiale sulla cronicità di una pericolosità idrogeologica da rischio frana. Questo ha prodotto prevalentemente dei cataloghi dei dissesti (vedi progetti IFFI o il PAC della Regione Sardegna) non completi e comunque non finalizzati alla descrizione di fenomeni di instabilità resi più complessi dall'azione della componente marina. La scarsa accuratezza, dovuta fondamentalmente ad un *gap* conoscitivo che questo progetto si propone in parte di colmare, comporta due situazioni estreme,

ambedue problematiche: i) la presenza di numerosi tratti di costa potenzialmente a pericolosità elevata ignorati negli strumenti pianificatori e ii) a volte un eccesso di limiti all'uso di tratti di costa che se studiati con più attenzione potrebbero essere soggetti a minori vincoli. In questo si nota una grossa differenza con il quadro internazionale, si pensa soprattutto ai paesi che hanno coste oceaniche (Inghilterra, Stati uniti, Giappone, Portogallo, ecc.) dove esistono studi ed esperienze pianificatorie basate su elementi tecnici scientifici più solidi. Questo maggiore avanzamento delle conoscenze e delle pratiche di pianificazione e gestione è probabilmente dovuto anche all'esasperato effetto di regressione che interessa quei tratti di costa, costituiti principalmente da rocce tenere fortemente erodibili con tassi di arretramento che arrivano facilmente a 1,5 m/anno (ad esempio vedi Castedo et al., 2012).

Di seguito sono descritti i dati disponibili sugli eventi franosi nell'ambito partenariale MAREGOT, per quanto noto allo stato attuale, ivi comprese alcune esperienze regionali descritte in pubblicazioni tecnico-scientifiche e rapporti tecnici, i dati del moto ondoso e quelli riguardanti il clima.

1.2.1 Frane

1.2.1.1 IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia)

L'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (Progetto IFFI) fornisce un quadro sulla distribuzione dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale e offre uno strumento conoscitivo di base per la valutazione della pericolosità da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale. I soggetti istituzionali coinvolti per l'attuazione del Progetto IFFI sono l'ISPRA - Dipartimento Difesa del Suolo/Servizio Geologico d'Italia e le Regioni e le Province Autonome d'Italia. Il Dipartimento, svolge una funzione di indirizzo e coordinamento delle attività e verifica la conformità dei dati cartografici e alfanumerici alle specifiche di progetto; le Regioni e le Province Autonome d'Italia effettuano la raccolta dei dati storici e d'archivio, la mappatura dei dissesti franosi, la validazione e l'informatizzazione dei dati. Il progetto è stato finanziato dal Comitato dei Ministri per la Difesa del Suolo ex legge 183/89 con 4,1 MIL. di Euro. Nella realizzazione del progetto sono inoltre coinvolte Università, il SINAnet (Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale) e società d'informatica specializzate in banche dati.

La metodologia adottata per realizzare l'inventario si basa sulla raccolta dei dati storici e d'archivio, sulla fotointerpretazione e sui rilievi sul terreno. Al fine di ottenere una omogeneità a livello nazionale, è stata predisposta la Scheda Frane IFFI sulla base di standard internazionali di classificazione e nomenclatura.

La Scheda Frane è articolata su tre livelli di approfondimento progressivo:

- 1° livello: contiene le informazioni di base (ubicazione, tipologia del movimento, stato di attività) ed è obbligatorio per ogni frana;
- 2° livello: raccoglie i parametri morfometria, geologia, litologia, uso del suolo, cause, data di attivazione;
- 3° livello: contiene informazioni su danni, indagini e interventi di sistemazione.

La Banca Dati è costituita da una cartografia informatizzata e dal relativo database alfanumerico e iconografico. La scala 1:10.000 è stata adottata per il rilevamento e la mappatura delle frane su gran parte del territorio nazionale; la scala 1:25.000 è stata impiegata in aree di alta montagna o scarsamente popolate.

Ogni fenomeno franoso è rappresentato da:

- un punto georeferenziato posto, per convenzione, in corrispondenza della quota più elevata del coronamento della frana;
- un poligono, quando la frana è cartografabile alla scala di rilevamento adottata;
- una linea quando i fenomeni franosi sono di forma molto allungata e presentano una larghezza non cartografabile.

L'inventario IFFI ha censito ad oggi 528.903 fenomeni franosi che interessano un'area di 22.176 km^2, pari al 7,3% del territorio nazionale. I dati sono aggiornati al 2014 per le Regioni Piemonte, Valle d'Aosta, Friuli Venezia Giulia, Liguria, Emilia Romagna, Basilicata, Sicilia e per la Provincia Autonoma di Bolzano. Per le restanti Regioni i dati sono aggiornati al 2007. I dati relativi alla Calabria risultano sottostimati rispetto alla reale situazione di dissesto poiché, a oggi, l'attività di censimento dei fenomeni franosi è stata concentrata prevalentemente nelle aree in cui sorgono centri abitati o interessate dalle principali infrastrutture lineari di comunicazione. Le tipologie di movimento più frequenti nell'inventario sono gli scivolamenti rotazionali/traslativi con il 30,6%, i colamenti lenti con il 15,3%, i colamenti rapidi con il 13,8% e i movimenti di tipo complesso con l'11,4%. L'inventario IFFI è stato impiegato da diverse Autorità di Bacino di rilievo nazionale, interregionale e regionale quale strumento conoscitivo di base per l'aggiornamento dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI). La cartografia online del Progetto IFFI si è dimostrata inoltre di grande utilità nella gestione delle emergenze idrogeologiche.

1.2.1.2 PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico)

Il Piano per l'Assetto Idrogeologico è uno strumento della politica di assetto territoriale delineata dalla legge 183/89, avviato in ogni Regione dalla pianificazione di bacino. Esso ne costituisce il primo stralcio tematico e funzionale. Il Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico, di seguito denominato Piano Stralcio o Piano o P.A.I., redatto ai sensi dell'art. 17, comma 6 ter, della L. 183/89, dell'art. 1, comma 1, del D.L. 180/98, convertito con modificazioni dalla L. 267/98, e dell'art. 1 bis del D.L. 279/2000, convertito con modificazioni dalla L. 365/2000, ha valore di Piano Territoriale di Settore ed è lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico-operativo mediante il quale sono pianificate e programmate le azioni, gli interventi e le norme d'uso riguardanti la difesa dal rischio idrogeologico del territorio. A seguito dell'entrata in vigore del testo unico sull'ambiente (D.lgs. 152/2006) la materia è regolata dagli artt. 67 e 68 dello stesso.

Le perimetrazioni individuate nell'ambito del P.A.I. delimitano le aree caratterizzate da elementi di pericolosità idrogeologica, dovute a instabilità di tipo geomorfologico o a problematiche di tipo idraulico, sulle quali si applicano le norme di salvaguardia contenute nelle Norme di Attuazione del Piano. Queste ultime si applicano anche alle aree a pericolosità idrogeologica le cui perimetrazioni derivano da studi di compatibilità geologica-geotecnica e idraulica, predisposti ai sensi dell'art.8 comma 2 delle suddette Norme di Attuazione, e rappresentate su strati informativi specifici.

Il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali integra ed approfondisce il P.A.I. in quanto è lo strumento per la delimitazione delle regioni fluviali funzionale a consentire, attraverso la programmazione di azioni (opere, vincoli, direttive), il conseguimento di un assetto fisico del corso d'acqua compatibile con la sicurezza idraulica, l'uso della risorsa idrica, l'uso del suolo (ai fini insediativi, agricoli ed industriali) e la salvaguardia delle componenti naturali ed ambientali.

1.2.1.3 PAC (Programma Azione Coste Sardegna)

È uno strumento atto ad individuare linee programmatiche per le aree costiere a maggiore criticità di dissesto ed erosione e indirizzi applicativi di gestione costiera integrata. A fronte di un ambito strategico per l'assetto ambientale ed economico, in particolare dei Paesi dell'area mediterranea, come quello costiero, la Commissione europea ha sollecitato la Regione Sardegna alla costituzione di uno strumento specifico di pianificazione e programmazione. L'elaborazione del Programma d'Azione Coste (PAC) ha evidenziato fin dalle prime battute la necessità di pervenire ad una impostazione metodologica di portata generale che affrontasse nelle sue diverse sfaccettature una materia complessa e delicata come quella della tutela e difesa costiera. Il PAC ha realizzato la classificazione delle aree costiere a maggiore criticità geomorfologico-ambientale e ha posto le basi affinché le problematiche della tutela, salvaguardia e difesa dei litorali vengano inquadrati all'interno di una impostazione complessiva di gestione costiera integrata, mediante interventi organici non solo di tipo strutturale ma anche con intento pianificatorio e gestionale. Il

PAC descrive e classifica le evidenze fenomenologiche di arretramento della linea di costa regionale connesse a processi erosivi di litorali sabbiosi e di dissesto franoso di tratti rocciosi. Da tali condizioni critiche scaturiscono implicazioni di natura ambientale, economica e di sicurezza pubblica, con l'ovvia considerazione che i fenomeni di arretramento della costa di per sé non possono e non devono essere classificati con la sola accezione negativa. Essi infatti rappresentano il risultato di tendenze evolutive generali che rientrano nelle dinamiche naturali dei sistemi fisici terrestri e che l'uomo, attraverso opere o utilizzi specifici, può localmente condizionare, modificandone la velocità di trasformazione o addirittura innescando i processi.

1.2.1.4 Alcune esperienze applicative

Di seguito vengono elencate alcune esperienze applicative che descrivono le modalità di approccio adottate allo studio dell'instabilità delle coste alte rocciose in ambito del partenariato, senza che questo debba essere inteso come un quadro esaustivo, bensì esclusivamente rappresentativo a grandi linee:

- Analisi stratigrafico-morfologica e censimento dei processi franosi in atto sulle coste alte nel settore costiero compreso tra Capo San Marco e Capo Marrargiu - Sardegna centro-occidentale (Carboni S., Tilocca G., Lecca L., 2010).
- Caratteristiche Geologico-Tecniche dei terreni dell'area urbana di Cagliari (Barrocu G., Crespellani T., Loi A., 1979).
- Unstable slopes monitoring by means of topographic surveys at Castelsardo, Sardinia, Italy. Eighth International Congress International Association for Engineering Geology and the Environment, Proceedings (Barbieri et al., 1998).
- I fenomeni d'instabilità nell'evoluzione della costa alta delle Cinque Terre - Liguria Orientale (Cevasco, 2007).
- La falesia delle «Acque Dolci» di Monte Argentario modellazione cinematica di caduta massi e progettazione delle opere di difesa (Paronuzzi et al., 1996).

1.2.2 Dati ondametrici

In Sardegna i dati ondametrici strumentali sono forniti dalle boe della Rete Ondametrica Nazionale (RON) già gestita dal Servizio Idrografico e Mareografico dell'APAT. Nel suo complesso, la RON comprende lungo la costa Sardegna le boe direzionali di Alghero con dati disponibili dal 01 luglio 1989 al 30 ottobre 2014, di Cagliari dal 06 febbraio 2007 al 31 dicembre 2014 e di Capo Comino dal 21 maggio 2002 al 12 settembre 2005 e dal 01 febbraio 2010 al 06 luglio 2011. I rilievi presentano ampi periodi di dati mancanti che contribuiscono a limitare la qualità della serie. Dalle serie temporali sono forniti i parametri sintetici di altezza d'onda significativa spettrale Hs (m), periodo di picco Tp (s), periodo medio Tm (s) e direzione media di propagazione Dm (°N) e parametri spettrali per banda di frequenza di densità di energia, direzione media di propagazione, dispersione direzionale, asimmetria e curtosi.

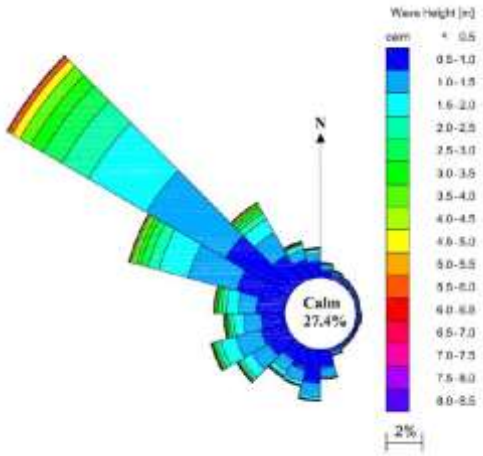


Figura 1 - Diagramma a rosa del clima ondametrico RON a largo di Alghero (Sulis & Annis, 2014).

Il clima ondoso al largo di Alghero può essere rappresentato in forma di tabella bivariata o diagramma a rosa (Figura 1) per altezza significativa (in classi di altezza pari a 0,5 m) e direzione di provenienza (su settori circolari di ampiezza pari a 15°) del moto ondoso (Sulis & Annis, 2014). A partire dai dati meteorologici (pressione atmosferica e vento) è possibile effettuare la ricostruzione del moto ondoso, utilizzando modelli matematici che a diverso livello di complessità simulano i processi di generazione delle onde. Tra i database disponibili per punti di ricostruzione al largo della Sardegna, si possono adottare alcuni applicativi come *Medatlas* (Medatlas, 2004) che utilizza un modello *WAve Model* (WAM) (Group, T. W., 1988) basato su stime di campi di vento generate da modelli meteorologici dell'*European Centre for Medium RangeWeatherForecasts* (ECMWF) di Reading (UK).

1.2.3 Dati climatici

La Sardegna ha iniziato un completo monitoraggio dei dati termici e pluviometrici a partire dal 1922, ad opera dell'Ente Idrografico, che installò una serie di stazioni meteorologiche per la rilevazione dei principali parametri atmosferici. La rete prosegue le sue rilevazioni affiancata alle stazioni dell'Aeronautica militare fino al 1995, anno in cui diviene operativo il **SAR** (Servizio-Agrometeorologico-Regionale), le cui funzioni sono simili a quelle dell'Ente Idrografico, che resterà comunque operativo. Le tecnologie utilizzate dal SAR sono notevolmente superiori e permettono un monitoraggio climatico a distanza e in tempo reale, oltre alla prima diffusione dei dati climatologici in rete a partire dalla fine degli anni 90. Dai primi anni 2000, con lo sviluppo delle tecnologie e la riduzione dei prezzi, è partita una diffusione dei rilevamenti amatoriali resi pubblici in rete.

L'Ente Idrografico è il più antico ente di monitoraggio climatico della Sardegna ed ha una storia piuttosto lunga, che parte dal 1922. I rilevamenti venivano curati da privati a cui veniva affidato un pluviografo e un termometro in capannina in legno. I dati rilevati da questo ente non godono però di una buona affidabilità. Analizzando gli annali idrografici si notano spesso serie di giorni con dati assenti o errati. Un'analisi basata su questo tipo di dati perciò dovrebbe essere eseguita tenendo conto dell'andamento climatico rilevato nelle stazioni vicine, per evitare il più possibile di incorrere in errori. Dal 2005 anche l'Ente Idrografico, che ha mantenuto operative molte stazioni storiche, si è dotato di una prima rete di stazioni meteo con trasmissione dei dati via radio direttamente alla centrale operativa, tuttavia questi non sono consultabili liberamente in rete.

L'Aeronautica Militare (AM) con le sue stazioni meteo effettua un affidabile monitoraggio di temperatura, vento, precipitazioni, pressione, umidità, relativo a circa 10 stazioni. I dati sono presenti in rete all'indirizzo dell'AM. La qualità dei dati è molto buona, data l'importanza delle osservazioni per il volo aereo e la previsione meteorologica. Tuttavia la scarsità di stazioni meteo, e la concentrazione di queste lungo le coste, non permette una completa comprensione del clima isolano.

Il SAR, che attualmente è stato inglobato nell'Agenzia regionale per l'ambiente (ARPAS) viene istituito nel 1990 dalla Regione, ma diviene operativo solo dal 1995. Conta attualmente più di una quarantina di stazioni agro meteorologiche, che oltre a valutare i classici dati di temperatura e precipitazioni, rilevano: vento, umidità del suolo e umidità atmosferica, temperatura del suolo, irraggiamento ed evapotraspirazione. La qualità dei dati è molto buona, di rado qualche stazione presenta il simbolo N.P. (non pervenuto) e l'ente assicura comunque che questi dati vengono recuperati in un secondo momento. Le stazioni trasmettono via radio alla sede centrale, dove vengono elaborati e archiviati. Le stazioni sono quasi tutte extraurbane.

2 METODOLOGIE D'INDAGINE

La morfologia costiera è generalmente correlata all'interazione di processi marini e gravitativi che agiscono sulle litologie affioranti, ma è impossibile definire con certezza in che misura percentuale come i fattori scatenanti influiscano nel sistema. I crolli che si verificano lungo la scogliera sono episodici, discontinui nel tempo e nello spazio, e si verificano soprattutto negli ammassi rocciosi molto fratturati in corrispondenza di grandi mareggiate (Andriani & Walsh, 2007; Paronuzzi, 2010; Budetta & Nappi, 2011; Martino & Mazzanti, 2014).

La dinamica dei versanti costieri comprende fenomeni di intensa erosione con movimenti in massa legati a frane, crolli, flussi di detrito e vari processi di dissesto. I fenomeni erosionali sono generati quasi esclusivamente dall'azione meccanica delle acque dilavanti (precipitazioni intense) e dall'interazione del moto ondoso con la falesia; questi processi, sono influenzati anche dalla degradazione fisica-meccanica delle rocce, dei depositi di crollo alla base della falesia, sui versanti e delle coltri eluvio-colluviali. I movimenti in massa sono costituiti dallo spostamento differenziale di masse rocciose o di materiali sciolti sotto l'azione della gravità e del moto ondoso. Per la loro forte incidenza morfologica, i movimenti franosi si possono ritenere gli agenti principali di modellazione dei versanti costieri. Le cause principali legate ai processi di dissesto si possono dividere in: predisponenti, che rendono il territorio più o meno sensibile all'innesco di certi fenomeni e determinanti, che provocano la rottura dello stato di equilibrio del versante/falesia. Le cause determinanti che vengono considerate sono legate alle precipitazioni intense e/o prolungate e all'erosione operata dal moto ondoso lungo la costa specialmente in corrispondenza di forti mareggiate. L'innesco di alcuni fenomeni di dissesto idrogeologico è legato, in alcuni casi, al superamento della soglia pluviometrica data da precipitazioni concentrate in un arco di tempo molto limitato. Ultimamente i repentini cambiamenti climatici hanno portato all'aumento dei fenomeni meteorologici estremi, che riversano enormi quantitativi di pioggia in poche ore con rapporti *rain/rate* elevatissimi prossimi anche ai 200 mm/h. Gli effetti sul territorio sono particolarmente deleteri ed esasperati soprattutto da una crescente espansione demografica e una insufficiente- quando non del tutto assente - pianificazione territoriale.

Le metodologie di studio dei processi di instabilità applicate all'ambito costiero spesso non affrontano, oppure lo fanno solo superficialmente, l'interazione esistente tra l'ambiente marino e quello terrestre. La componente data dal moto ondoso rappresenta un'azione preponderante e non trascurabile che necessita specifiche analisi e indagini mirate. I fenomeni di instabilità vengono studiati anche in questo ambiente finalizzando le analisi ai processi legati alla meccanica delle rocce (perlopiù nella parte emersa) e solo in pochi casi considerano l'interazione della costa col moto ondoso e soprattutto le dinamiche dell'ambiente sommerso. Invece, lo studio dei processi di instabilità e in generale di erosione delle coste alte deve essere basato su indagini integrate multidisciplinari che considerino gli ambienti emerso e sommerso in un unico sistema di dinamiche evolutive. L'analisi multidisciplinare si dovrà basare su indagini, sistemi di acquisizione, elaborazione ed interpretazione dei dati più idonei a seconda delle condizioni fisiografiche locali. Si dovranno prevedere pertanto l'attività di: rilevamento geologico (litologico, stratigrafico, strutturale, geomeccanico, geomorfologico, idrogeologico), elaborazione di dati (energia e interazione del moto ondoso, analisi meteo-climatiche, eustatismo, *Remote Sensing*, analisi di stabilità, fotointerpretazione, analisi geotecniche, modellizzazione, analisi fluidodinamica), restituzione cartografica e costituzione di un database in ambiente GIS.

Negli ultimi anni si sono sviluppate tecniche di indagine che, grazie anche all'apporto dato dalle nuove tecniche di Telerilevamento analizzano nel dettaglio le frane costiere sulle coste alte rocciose (Budetta et al., 2000; Fall et al., 2006; De Blasio & Mazzanti, 2010; De Vita et al., 2012; Budetta & De Luca, 2015; Ružić, et al. 2015; Budetta et al., 2016). Alcuni studi effettuati di recente valutano l'interazione del moto ondoso con la suscettività di frana, il tasso di erosione e la resistenza dell'ammasso roccioso (Budetta et al. 2000;

Trenhaile 2002; Kogure et al. 2006; Hall et al., 2008; Naylor & Stephenson, 2010; De Vita et al., 2012; Castedo et al, 2012; Castedo et al., 2013; Marques et al., 2013; Castedo et al., 2017). Questi studi prendono in considerazione una serie di fattori predisponenti, come le caratteristiche dell'onda, i tassi di erosione, la disposizione litologica e l'instabilità storica. Il rischio relativo viene valutato sulla base di metodi qualitativi (mappatura geomorfologica, approcci euristici, ecc.) o quantitativi (metodi statistici bivariati e multivariati, metodi deterministici, ecc.).

2.1 OBBIETTIVI

L'approccio metodologico proposto in questo documento prevede lo studio e l'analisi dei processi di dissesto idrogeologico che interessano e si sviluppano nelle coste alte rocciose. Attualmente non esistono dei protocolli d'indagine ben definiti, gli studi esistenti spesso non seguono delle metodologie uniformi, principalmente a causa della carenza di conoscenze e della complessità nella raccolta dei dati sui processi che generano l'erosione costiera (Sunamura, 1977; 1983; 1992). Uno degli aspetti più difficili da valutare è determinato dalla quantificazione del processo erosivo che spesso presenta caratteristiche eterogenee e variabili nel tempo. Attraverso un approccio multidisciplinare e multiscala, la metodologia contenuta in questo documento propone una serie di indagini dirette e indirette che identifichino i processi che generano i principali fenomeni erosivi nelle coste alte rocciose. L'analisi e l'elaborazione dei dati raccolti ha come scopo quello della valutazione dello stato di instabilità dei siti studiati e della comprensione dei processi in atto per proporre un protocollo applicabile nei settori costieri con diverse condizioni fisiografiche. A scala più ampia, i risultati delle indagini potranno essere utilizzati per proporre un modello di elaborazione della suscettività al dissesto e del rischio da frana attraverso una zonazione che individua le aree più fragili sulle quali programmare eventuali interventi di mitigazione del rischio.

2.2 UNITÀ DI STUDIO

Quando si ragiona sull'estensione dell'areale di studio, per la comprensione dell'evoluzione di una costa alta rocciosa, intendiamo quella porzione sufficientemente estesa per comprendere i processi che concorrono alla sua instabilità. La definizione di tale areale è legata alla necessità di estendere le osservazioni locali ad un ambito che permetta di capire i processi di erosione dell'intera unità fisiografica. Pertanto, si deve definire una scala "locale" riferita al dettaglio del fenomeno di instabilità, ed una "regionale" che comprende un territorio ben più vasto a cui applicare gli esiti degli studi dei fenomeni locali per poter identificare le aree a diversa suscettività.

Alla scala locale vengono individuati areali in base a specifiche caratteristiche litologiche, geomeccaniche, geomorfologiche, sedimentologiche e idrodinamiche i cui limiti possono essere costituiti da elementi morfologici naturali e da caratteristiche intrinseche che li contraddistinguono da aree contigue.

In base alla sua estensione, può essere suddivisa in unità e subunità minori in cui eseguire rilevamenti con una scala di dettaglio adeguata (da 1:1.000 a 1:2.000). L'individuazione di queste aree non è di facile attuazione, in quanto i versanti costieri sono costituiti dalla fusione di diversi ambienti (marino e terrestre) contraddistinti da morfologie, geometrie e litologie eterogenee.

Gli aspetti principali da valutare per l'individuazione delle unità di studio dovrebbero comprendere una moltitudine di caratteristiche e l'interazione tra le stesse che concorrono a influenzare il sistema di riferimento e di conseguenza l'instabilità potenziale; le principali sono riassunte in Tabella 2.1.

Tabella 2.1 – Principali caratteristiche da considerare per definire l'Unità di Studio

Caratteristiche	Tipologia
Litologiche	Litotipo, stratificazione, giacitura, ecc.
Strutturali	Faglie, pieghe, foliazione, clivaggio, giacitura, ecc.
Geomeccaniche	Fratturazione, resistenza a compressione, angolo di attrito, coesione, alterazione, ecc.
Geomorfologiche	Processi e morfologie di erosione, alterazione e dissoluzione, processi di crollo, ecc.
Morfologiche	Inclinazione del versante, altezza delle falesie, esposizione e orientazione del versante, ecc.
Idrogeologiche	Bacino idrografico, presenza di falda, permeabilità, ecc.
Idrodinamiche	Tasso d'erosione, interazioni del moto ondoso, ecc.
Idrologiche e climatiche	Precipitazioni, soglie pluviometriche, esposizione ai venti dominanti, mareggiate, ecc.
Instabilità generale	Presenza di processi attivi e quiescenti, elementi instabili (blocchi)
Altre caratteristiche	Presenza di copertura vegetale, presenza di opere di contenimento, ecc.

2.3 RILIEVI ED ELABORAZIONE DATI

L'acquisizione del dato rappresenta un aspetto fondamentale della metodologia, in linea di massima può essere sia di tipo diretto (sul campo: rilevamento geologico-strutturale e geomeccanico, ecc.) o indiretto (attraverso tecnologie avanzate come: fotogrammetria da UAV, rilievo *laser scanner*, interferometria differenziale SAR, ecc.).

Per completezza è bene esplicitare che in questo capitolo vengono descritti, sebbene sinteticamente, molteplici elementi che possono o devono essere rilevati quando si studia le coste alte rocciose, ma con differente approfondimento a seconda della scala di studio prescelta. Ad esempio, per quel che riguarda la definizione delle aree a diversa pericolosità idrogeologica ad ampia scala solo una piccola parte, definita nei capitoli seguenti, sarà utile a produrre una zonazione di rischio e pericolosità delle coste analizzate. Mentre un numero maggiore di osservazioni, rilievi ed analisi sarà necessario per studiare singole pareti con processi di instabilità in atto anche al fine di definire la possibilità e l'opportunità di pianificare interventi di messa in sicurezza e stabilizzazione. Si distinguono in questo capitolo i rilevamenti e le analisi che devono essere condotte nella parte emersa, nella parte subacquea e per il moto ondoso.

2.3.1 PARTE EMERSA

2.3.1.1 Analisi Fotografica Multitemporale

L'analisi delle foto aeree non è solo finalizzata ad individuare le caratteristiche principali dell'area di studio; infatti, l'analisi comparativa di foto storiche è fondamentale per rivelare la presenza e l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di dissesto e l'eventuale variazione della linea di costa. Le fotografie aeree storiche sono uno strumento fondamentale per lo studio del territorio: risultano particolarmente efficaci per valutare le trasformazioni avvenute in un determinato contesto geomorfologico e per l'individuazione dei processi di erosione e dissesto nel territorio indagato (Figura 2). Una vasta copertura fotografica e la relativa facilità di reperimento, rendono questa tecnica uno strumento utile e a basso costo nello studio preliminare del paesaggio. Esistono dei metodi di elaborazione delle immagini per mappare e monitorare l'attività di frana utilizzando immagini su cui eseguire un'analisi multitemporale (Hervás et al., 2003). Il Sistema Informativo Territoriale Regionale della Sardegna offre i dati cartografici attraverso servizi *standard* e l'analisi multitemporale può essere eseguita tramite l'utilizzo dei dati presenti nel Geoportale (Foto storiche) e dei servizi WMS e TMS (ortofoto e immagini satellitari). Il Sistema Informativo Territoriale Regionale della Sardegna offre i dati cartografici attraverso servizi *standard*.

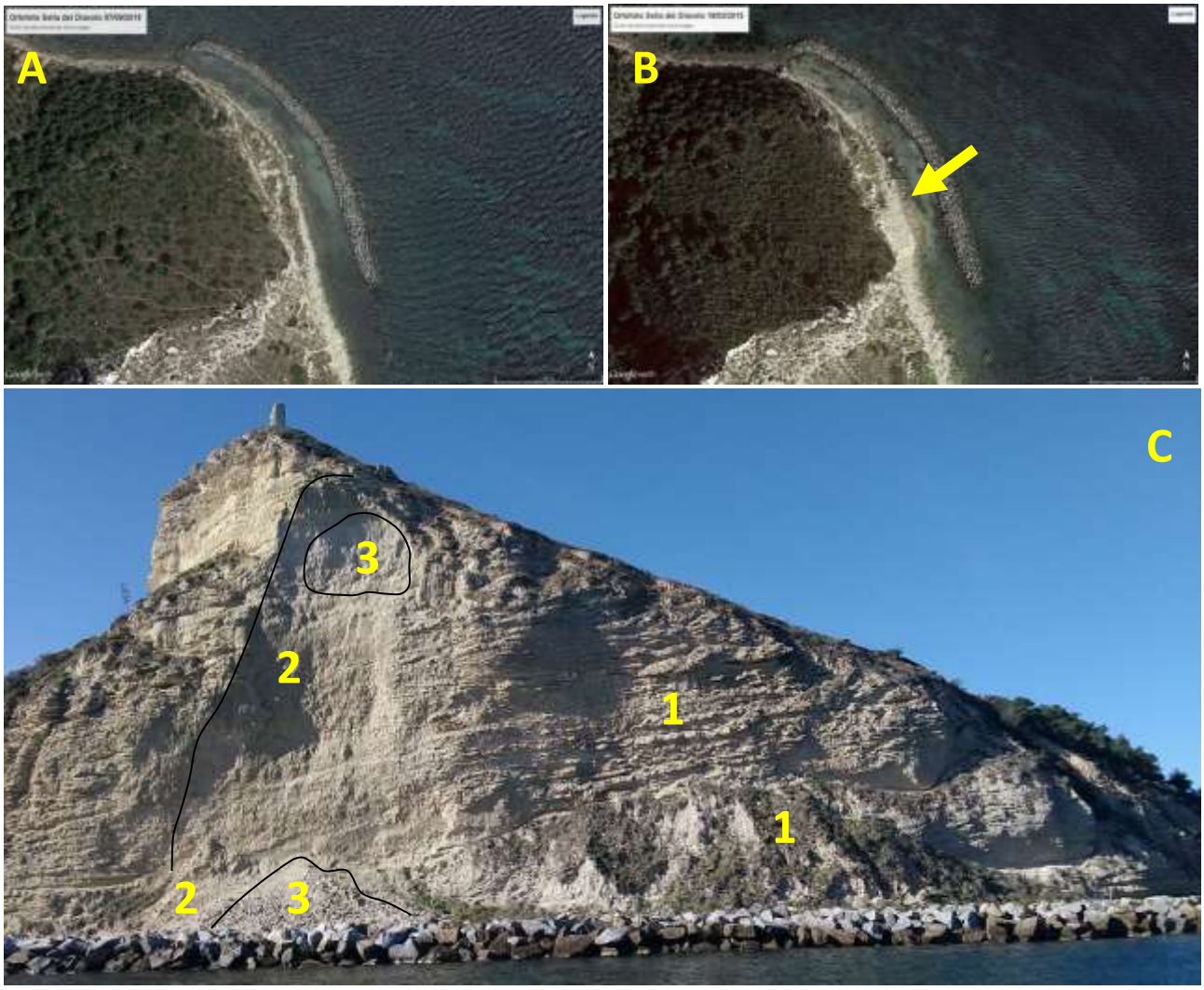


Figura 2 – Analisi multitemporale su base ortofoto dei processi gravitativi del promontorio della Sella del Diavolo ove si sono sviluppate frane di scivolamento lungo superfici sub planari di fratturazione e crollo presentano tempo di ricorrenza trentennali. A) Ortofoto 2015: i processi gravitativi sono quiescenti; il deposito di frana è correlabile con l'evento del 30 luglio del 1987. B) Ortofoto 2017: nuovi depositi di frana per riattivazione dei processi gravitativi (febbraio 2017). C) Depositi di frana di crollo in località Marina Piccola:1) nicchie di distacco alterate e deposito colonizzato dalla vegetazione evolutosi tra 1940 e 1950; 2) nicchia di distacco e deposito al piede della frana del 2 luglio 1987; 3) nicchia di distacco e deposito del 21 febbraio 2017.In primo piano la barriera di massi protettiva messa in opera successivamente all'evento del 1987.

2.3.1.2 Caratteristiche morfologiche delle superfici

La cartografia topografica permette di analizzare le forme del territorio nelle sue caratteristiche morfologiche e di uso da parte dell'uomo e costituisce la base di riferimento per la mappatura delle caratteristiche geologiche in senso ampio. Le superfici verticali, inclinate o molto inclinate non sono visibili dalle carte restituite da dati zenitali e pertanto devono essere rilevate con sistemi di misura posizionati in modo specifico. Inoltre queste aree spesso non sono completamente accessibili con rilievi diretti e necessitano quindi di sistemi di rilevamento remoti.

Le attuali tecnologie di rilevamento, soprattutto l'incremento nelle prestazioni dei sistemi di elaborazione di immagini, rendono disponibili dati che permettono la ricostruzione tridimensionale degli oggetti con un dettaglio molto elevato. L'aspetto più delicato, in questo ambito di rilevamento (pareti quasi verticali sul mare), è la scelta della piattaforma da cui rilevare i dati e su cui montare il sensore per l'acquisizione. Come verrà descritto e testato durante il progetto, l'utilizzo dei droni in questo contesto ambientale, sembra essere la proposta più idonea. Laddove sarà invece possibile verrà proposto anche un sistema di rilevamento da postazione fissa e da barca.

Di seguito vengono descritte le metodologie di indagine da telerilevamento più idonee per la ricostruzione delle pareti delle falesie e che, come detto sopra, supportano e integrano le attività di rilevamento diretto e di ricostruzione delle caratteristiche geologiche necessarie per comprendere i processi di evoluzione dei versanti.
Si fa presente che diverse altre tecniche vengono utilizzate per il monitoraggio di corpi in movimento, quali i metodi basati su dati GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) o ancora metodi di misure interferometriche a terra GBSAR *Interpherometry* (*Ground-Based Sayntetic Aperture Radar*). Queste ultime metodologie, che presuppongono rilievi non zenitali, possono essere utilizzate dove vengono riscontrati sistemi di instabilità (sia in forma di corpi di frana, che di ampliamenti di giunti) e pertanto hanno una applicabilità locale soprattutto in funzione delle attività di monitoraggio.

Il Telerilevamento è definibile come quell'insieme di tecniche, strumenti e mezzi interpretativi che permettono di estendere e migliorare le capacità percettive dell'occhio umano, fornendo all'osservatore informazioni qualitative e quantitative su oggetti posti a distanza e nell'ambiente che lo circonda (Dessena & Melis, 2006). Gli strumenti utilizzati per l'acquisizione (Figura 3) possono fornire misure singole di radianza, come radiometri o spettro-radiometri, o insiemi di misure di radianza (immagini digitali), come macchine fotografiche, termocamere o dispositivi a scansione. Tali sensori possono essere trasportati da satelliti, aerei e droni. I dati acquisiti vengono restituiti in forma di immagini, ossia matrici numeriche che riportano uno o più valori numerici per ogni *pixel*, che non rappresenta pertanto un oggetto ma è lo spazio dove una grandezza assume un certo valore. La risoluzione spaziale del sensore permette di ottenere immagini con diverso dettaglio e tanto più sofisticato è il sistema di telerilevamento quanto più il dettaglio sarà alto.

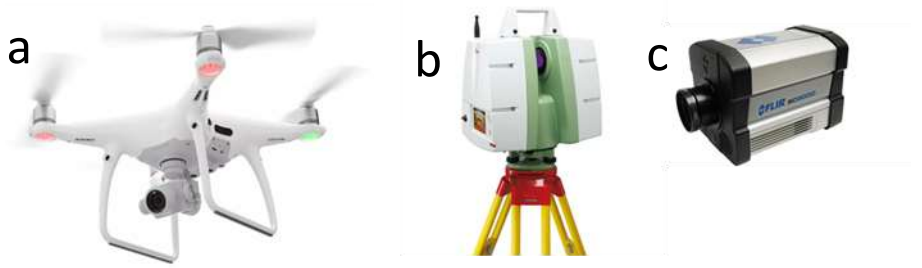


Figura 3 – Strumenti per il telerilevamento: a) Fotocamera su Drone; b) Laser Scanner; C) Termocamera.

In funzione delle grandezze da misurare possono essere utilizzati sensori capaci di rilevare le lunghezze d'onda caratteristiche per lo specifico riconoscimento degli oggetti. In particolare, in questo ambito i dati spettrali che consentono di caratterizzare dal punto di vista morfologico e geologico le pareti rocciose sono quelli del visibile in modalità passiva (fotogrammetria) e quelli che permettono con sensori attivi di utilizzare la risposta delle superfici come caratteristica per misurarne la dimensione e la posizione.
La Fotogrammetria digitale permette la restituzione di immagini orto-rettificate capaci di fornire una ricostruzione numerica dei valori di elevazione e visiva delle superfici investigate. Questa tecnica è utilizzata ampiamente per il rilevamento topografico, sviluppandosi principalmente nella forma della fotogrammetria aerea. Numerose esperienze sono state inoltre testate per il rilievo di fronti rocciosi sia utilizzando sensori montati su postazioni fisse sia da drone. Come per i dati laser scanner, descritti di seguito, anche nel campo della fotogrammetria digitale la potenza di calcolo e l'utilizzo di *software* dedicato, permettono di poter utilizzare una grande mole di informazioni, ovvero di fotogrammi ripresi da diversi punti di vista, che garantiscono la copertura completa del versante in rilevamento.

La tecnica *Laser Scanner* può offrire un dettaglio molto accurato, una certa velocità di esecuzione e a volte una minore potenza di calcolo rispetto alla restituzione fotogrammetrica. I sensori *laser scanner* consentono la restituzione di modelli tridimensionali delle superfici, permettendo di riconoscere la risposta dell'eventuale copertura vegetale e di poterla pertanto separare dai valori di elevazione del terreno. Questa caratteristica si esprime con la creazione dei DSM (modelli digitali della superficie) e con i DTM (modelli digitali del terreno). L'accuratezza e il valore di risoluzione del *pixel*, come per tutti i sensori, dipendono dalle caratteristiche tecniche dello strumento e dalle condizioni di acquisizione. I prodotti sono estremamente precisi e caratterizzati da un'elevata ricchezza e completezza descrittiva, tali da costituire uno strumento molto utilizzato nel campo dei rilievi geologici e del monitoraggio dei corpi di frana.

La termografia a infrarosso in ambito geologico viene utilizzata per studiare il comportamento termico degli ammassi rocciosi, con l'obiettivo di individuare ed analizzare eventuali nessi di causa/effetto tra anomalie termiche superficiali e fenomeni legati a specifiche variazioni di inerzia termica per condizioni di variabilità mineralogica o di contenuto d'acqua. In particolare, la termografia trova applicazioni per l'analisi di fronti rocciosi e falesie. Recenti casi di studio hanno dimostrato che, in abbinamento con altre tecniche di telerilevamento (Interferometria SAR Terrestre, Laser Scanner Terrestre e Fotogrammetria), è in grado di fornire informazioni utili per la mappatura delle zone maggiormente predisposte a fenomeni di crollo e, di conseguenza, per la zonazione delle priorità di intervento per la mitigazione del rischio. I risultati principali delle tecniche di TLR sono dati dalla modellizzazione 3D della parete rocciosa e dai Modelli Digitali del Terreno (DTM) (Mazzanti P. et al., 2015).

2.3.1.3 Caratteristiche Geologico-Strutturali

Le caratteristiche geologiche strutturali influenzano direttamente e indirettamente le condizioni di stabilità di un versante costiero e la sua evoluzione nel tempo. Le caratteristiche composizionali e genetiche delle rocce costituiscono un aspetto fondamentale nello sviluppo dei processi di dissesto di una determinata area, in quanto gran parte del loro comportamento meccanico (nello specifico la resistenza all'erosione, la possibile perdita di coesione, la minor o maggiore resistenza a fenomeni di alterazione, ecc.) varia a seconda dei litotipi. L'altra componente geologica, che contribuisce a definire il comportamento meccanico di un versante in roccia, è data dalla presenza di discontinuità (superfici di stratificazione, fratture, scistosità, ecc.) e dalle loro caratteristiche (Figura 4).

Un rilevamento di dettaglio è quindi necessario per una completa definizione delle caratteristiche geologico-strutturali dell'area in studio. Il riconoscimento dell'assetto stratigrafico-strutturale permette di distinguere all'interno del medesimo ammasso roccioso quali sono le aree maggiore instabilità, o potenzialmente più esposte all'instabilità. Il rilevamento può essere eseguito con le tecniche classiche di lavoro sul terreno ma, data anche la scarsa accessibilità delle falesie costiere, va sicuramente integrato con forme alternative di rilevamento da remoto, come quelle descritte nei paragrafi precedenti. Ovviamente rimane fondamentale l'interpretazione geologica dei dati che possono essere più facilmente acquisiti con sistemi anche semi-automatici di rilievo fotogrammetrico. Negli elaborati cartografici è importante fare una distinzione dei diversi litotipi all'interno delle formazioni affioranti, in modo da favorire la caratterizzazione geotecnica dell'area. Ugualmente importante è la distinzione degli elementi strutturali quali la stratificazione, faglie e fratture, scistosità in quanto utili per definire un modello geologico per le eventuali analisi di dettaglio (ad es. rilievi, idrogeologici, geomeccanici, geotecnici, ecc.).

Figura 4 – Analisi stratigrafica, geologica e strutturale della falesia della Sella del Diavolo (Cagliari). ADP: Arenarie di Pirri; CGIa: Lithofacies della Pietra Cantone; CGIb: Lithofacies del Tramezzario; CGIc: Lithofacies della Pietra Forte; A1: depositi di frana stabilizzati; S0: stratificazione. In nero i principali contatti stratigrafici; in rosso: principali fratture.

2.3.1.4 Caratteristiche Geomorfologiche

Sono diversi i processi e gli agenti che governano la morfogenesi in ambito costiero e che assumono un ruolo importante nell'influenzare la propensione all'instabilità di una falesia (Tabella 2.2). Si possono distinguere processi a breve termine legati all'esposizione agli eventi meteo marini estremi e processi a lungo termine legati alle variazioni eustatico-climatiche (Colantoni et al.,2004).

Tabella 2.2 –Sintesi dei processi di alterazione, degli agenti e della morfogenesi dei versanti.

Processi	Agenti	Dinamica di processo	Morfogenesi
Alterazione (*weathering*)	Precipitazioni Temperatura Vento Spray marino	Idratazione Termoclastismo Corrasione Aloclastismo	rigonfiamenti, morfosculture fratturazione, distacco di scaglie, morfosculture, tafoni alveoli
Dissoluzione	Acque di precipitazione, acque di risorgiva pens. acque di risorgiva sottomarina	Carsismo subaereo Carsismo selettivo Carsismo litorale (fascia di marea)	vaschette di dissoluzione morfosculture in parete solco di marea solco parietale
Bio-demolizione	Organismi sessili	Bio-dissoluzione Bio-erosione mecc.	alveoli supratidali solco di marea piattaforma litorale
Erosione	Acque di precipitazione Onde	Erosione areale Erosione lineare Erosione lineare accelerata Arretramento parietale Incisione intertidale Erosione di piede	aree denudate a erosione diffusa, canali, gully calanchi, nicchie retrogressive pareti retrogressive solco di marea solco parietale basale

Di questi processi e fenomeni complessi viene di seguito fornito un quadro sintetico che richiama quelli più rilevanti.

2.3.1.4.1 Weathering in ambiente di falesia

La degradazione meteorica è il processo di disgregazione delle rocce *in situ* senza il contributo del movimento, mentre l'erosione è legata alla dinamica dell'acqua (correnti e onde), del vento o del ghiaccio ecc. La degradazione comporta una modificazione nelle proprietà chimiche, mineralogiche e fisiche della roccia in risposta alle condizioni ambientali in cui si trova; a differenza dei processi metamorfici però avviene nell'intervallo di temperature tipico della superficie terrestre. Alcuni autori utilizzano anche il termine meteorizzazione o alterazione meteorica. La degradazione può essere suddivisa in degradazione chimica (*chemical weathering*) e degradazione fisica (*physical weathering*), sebbene in natura avvengono spesso simultaneamente (Fairbridge,1968). I processi di degradazione chimica che interessano la superficie delle rocce delle falesie sono rappresentati in prevalenza dalla dissoluzione (dis*solution* – ad esempio le rocce carbonatiche), dall'idratazione (*hydratation*- ad esempio litotipi a matrice argillosa) e dall'idrolisi (*hydrolisis* – ad esempio rocce granitiche e vulcaniche). L'entità del materiale asportato, per quanto di entità modesta, può essere monitorato attraverso tre chiodi inossidabili infissi nella superficie, in acciaio speciale o in titanio, su cui si poggiano i micrometri comparatori millesimali per il rilevamento (Furlani et al., 2010; Furlani et al., 2011). I processi di "consumazione" delle rocce carbonatiche sono in parte legati alla corrosione carsica, ma notevole è il contributo della bioerosione, sia da parte di microorganismi, alghe e batteri sia di macro organismi, in prevalenza spugne e lamellibranchi (Rovere et al., 2015).

2.3.1.4.2 Processi di arretramento delle falesie

Un ruolo importante, dal punto di vista morfologico, è rivestito dalla presenza e dalle caratteristiche della piattaforma di abrasione e da fenomeni di scalzamento alla base per formazione di diversi solchi formati per erosione meccanica e attività biologica.

2.3.1.4.2.1 Piattaforme di abrasione

L'evoluzione delle piattaforme di abrasione marina è dovuta in prevalenza ai processi erosivi meccanici connessi con l'attività del moto ondoso incidente, dove parte della energia cinetica dei frangenti viene trasferita ai depositi clastici presenti al piede di falesia.

Esiste una forte correlazione tra l'evoluzione delle piattaforme perilitorali in roccia (definite in base a quota, pendenza, continuità, integrità, quota e velocità di arretramento del margine interno) con l'esposizione alle direzioni degli eventi estremi (Chelli et al., 2010; Pappalardo et al., 2011).

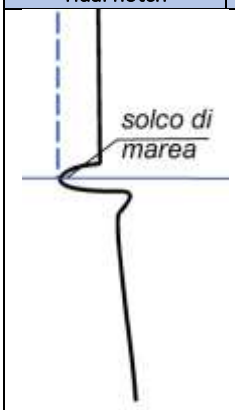
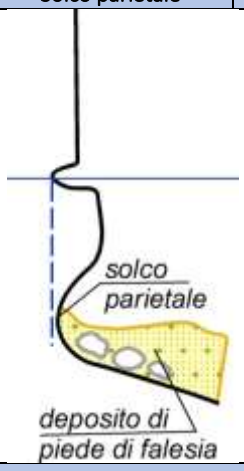
Le morfologie caratteristiche delle piattaforme di abrasione sono le marmitte di erosione, i canali e le docce di erosione, morfologie sempre legate al movimento dei depositi di piede di falesia; mentre sulle superfici in roccia sub orizzontali o debolmente inclinate della fascia intertidale e quelle supralitorali interagiscono i processi di bio-modellazione e bio-demolizione (Pappalardo et al., 2017). L'approfondimento del fondo e lo smantellamento delle marmitte di erosione sono dovuti a processi carsici accelerati, legati a sensibili variazioni di pH giorno/notte innescate dall'attività di comunità batteriche e algali che possono proliferare nelle acque di ristagno, sia in condizioni ipoaline che iperaline.

2.3.1.4.2.2 Solco di marea e di scalzamento

Un ruolo fondamentale nell'arretramento delle falesie è quello dovuto all'erosione alla loro base, per formazione di un solco di marea o di scalzamento (Tabella 2.3).

La genesi del solco di marea era considerata prevalentemente legata a processi di erosione meccanica commessi con l'impatto delle onde, da qui la denominazione solco di battente. In particolare la morfogenesi era attribuita ai processi di cavitazione, dovuti all'aria intrappolata nella massa d'acqua in rapido movimento caratteristica di un frangente, o processi di abrasione operati dai sedimenti presenti in sospensione (Carobene 1972; Pirazzoli, 1986). Successivamente la morfogenesi del solco fu attribuita alla prevalente attività bio-erosiva ad opera delle comunità litofaghe (Kelletat, 1997; Laborel et al., 1999; Pirazzoli & Evelpidou, 2013).

Tabella 2.3 - Ruolo del solco di marea e dei solchi di scalzamento alla base nell'instabilità costiera.

Tidal notch	Solco parietale	Piattaforma di abrasione	Solco di scalzamento alla base
			
Ambiente di evoluzione			
Intertidale	Subtidale	Supratidale	Supratidale
Agente			
Onde organismi acque dolci	Dinamica sedimentaria	Onde, frangenti	Frangenti (wave runup)
Processo morfogenetico			
Carsismo, bio-erosione	Abrasione Erosione meccanica	Abrasione Bio-modellamento	Erosione meccanica abrasione
Processi gravitativi indotti			
Crolli Scivolamenti	Crolli	Crolli Scivolamento	Ribaltamenti Crolli
● *Processi di arretramento bloccati da depositi di crollo o crollo-ribaltamento in situ (falesia morta)*			

Studi più recenti hanno confermato che la formazione del solco di marea (*tidal notch*) è poligenica e non sempre i diversi processi incidono con la stessa proporzione. Spesso lungo le coste calcaree, specie quelle che chiudono verso mare, è fortemente connessa con la presenza di acque dolci in "galleggiamento" sulle acque marine, in questo caso sia l'innesco dell'incisione che il maggiore approfondimento è dovuto a processi carsici o carsico-litorali. I processi di bio-modellamento sono spesso molto attivi ma è necessario tener presente il bilancio tra bio-erosione e fenomeni di bio-costruzione quali i terrazzi biocostruiti a vermetidi, gasteropodi sessili (*Dendropoma petraeum*) o i marciapiedi "*trotoir*" ad alghe rosse calcaree (*Lithophyllum byssoides L.; Lithophyllum incrustans*).

In alcuni tratti di costa alta, specie nelle aree particolarmente esposte agli eventi meteo marini estremi, è particolarmente efficace la demolizione conseguente all'acqua e all'aria "sparata" ad elevata velocità nelle diaclasi beanti.

Sulle pareti di piede di falesia sono attivi i processi carsici, in presenza di una risorgiva sottomarina di acqua dolce, ma dominano i processi di abrasione dei sedimenti rimobilizzati dalla dinamica del moto ondoso che porta alla evoluzione di un solco parietale che si differenzia per caratteri morfometrici dal solco di marea per ampiezza notevolmente più elevata e minore profondità mentre sulle superfici delle piattaforme basali a questi si aggiunge l'azione delle correnti trattive di fondo.

Il rilevamento morfometrico conferma che i solchi presentano ampiezza proporzionata con l'entità della oscillazione di marea.

L'energia dei processi erosivi in un'area a costa rocciosa alta o a falesia è condizionata anche dai *trend* di mobilità tettonica che l'area presenta; l'energia diminuisce e i processi tendono a rallentare se l'area

presenta un abbassamento tettonico attivo (subsidenza), mentre processi di erosione accelerata caratterizzano le aree in sollevamento tettonico (*uplift*).
I tassi di mobilità tettonica recente (Quaternaria) delle aree costiere si ottengono attraverso lo studio degli indicatori di paleo-livello marino, tra questi il più utilizzati sono gli indicatori sia erosionali che deposizionali dell'ultimo interglaciale (MIS 5; "Tirreniano" Autc.), e ruolo chiave riveste lo studio dei paleosolchi di marea (Ferranti et al., 2016).

2.3.1.4.3 Processi di erosione accelerata in area costiera

L'evoluzione di processi di erosione accelerata con modalità calanchiva, sia areale che canalizzata, può interessare litotipi debolmente cementati a media e bassa permeabilità; inizialmente si evolvono dei sistemi di canali ad andamento irregolare (*gullies*) che poi originano la morfologia a "calanchi"

2.3.1.4.4 DGPV e Paleofrane in area costiera

Lungo le coste alte possono evolversi sia mega-frane che deformazioni gravitative profonde, in genere controllate da faglie; se l'assetto stratigrafico è favorevole lungo le lineazioni tettoniche principali possono evolversi movimenti di espansioni laterali con superfici di scorrimento sia planare che rotazionale.
Forme simili possono essere rilevate anche in aree più stabili, come la Sardegna dove, lungo la costa nel settore di Acqua Sa Canna – Porto Paglia a Gonnesa (Carbonia) costituita da una serie di colate di flussi piroclastici riolitici più o meno saldati che poggia su terreni conglomeratici a matrice marnosa, si rileva una grande DGPV a scorrimento rotazionale evolutosi lungo faglie ad andamento NNE –SSW che dislocano i depositi del Quaternario (Buttau et al., 2011) (Figura 5). Come in molti casi analoghi il movimento gravitativo sembra essersi sviluppato in condizioni di livello marino più basso dell'attuale (*low stand*), l'evoluzione è quindi avvenuta in condizioni climatiche ed eustatiche diverse dalle attuali.
Altre manifestazioni di DGPV costiere solo rilevabili lungo la costa di Capo San Marco (Oristano), lungo la costa Alghero-Bosa e sul litorale di Castelsardo (Sassari).
Oltre alle deformazioni gravitative profonde, lungo le coste della Sardegna si sono conservate forme e depositi di paleofrana (Figura 6) nonostante un contesto con una mobilità tettonica relativamente modesta. Possono essere distinti i casi di movimenti gravitativi di scivolamento rotazionali o planari. In altri casi si rilevano grandi corpi deposizionali di frana, spesso cementati o debolmente cementati, la cui superficie sommitale è troncata dai processi di arretramento della ripa di erosione attuale; la base del corpo di frana si trovava quindi distante dalla linea di riva attuale, in piattaforma continentale interna attuale.
Si tratta di corpi deposizionali di sostituzione legati all'arretramento accelerato della paleo-falesia (spesso a controllo tettonico) in condizioni climatiche tali da incrementare notevolmente i processi di disgregazione fisica (clima Arido freddo; clima Arido caldo), che riprendono schemi evolutivi simili a quelli dei versanti di faglia.
L'evoluzione in condizioni climatiche ed eustatiche diverse dalle attuali identifica la paleo-frana, quindi ciò che si può oggi osservare è il lembo residuale sommitale di un corpo sedimentario in origine molto più esteso che la risalita del livello marino ha in buona parte demolito e posto in condizione di instabilità sia relativamente alla gravità che all'erosione.

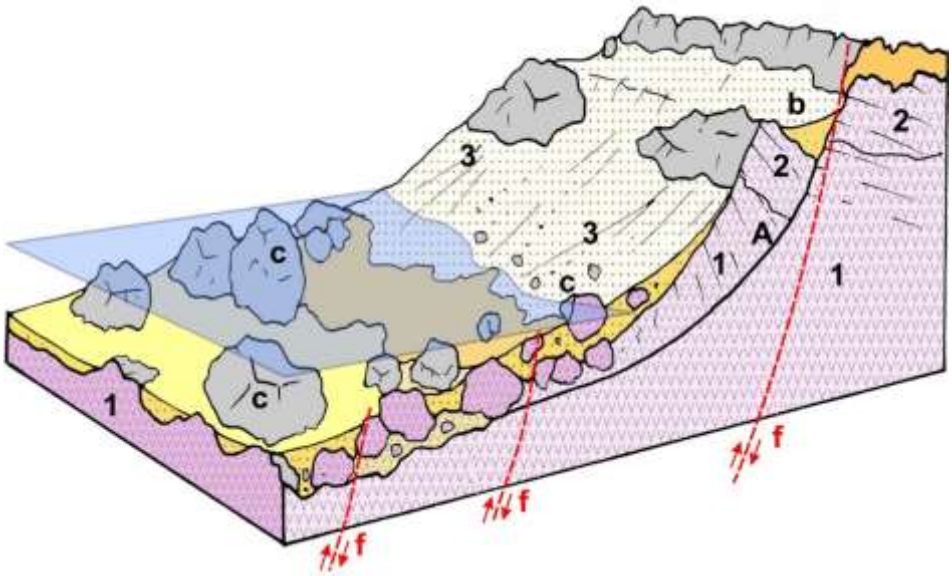


Figura 5 - Blocco diagramma schematico della DGPV a scorrimento rotazionale di Acqua sa Canna - Capo Altano: 1) Ghiaie in matrice marnosa (Form. Del Cixerri); 2) Vulcaniti acide, tufi e lave; 3) eolianiti e colluvi eolizzati; A) superficie di scorrimento rotazionale; b) trincea di distacco; c) depositi di crollo (Orrù & Ulzega, 1986).

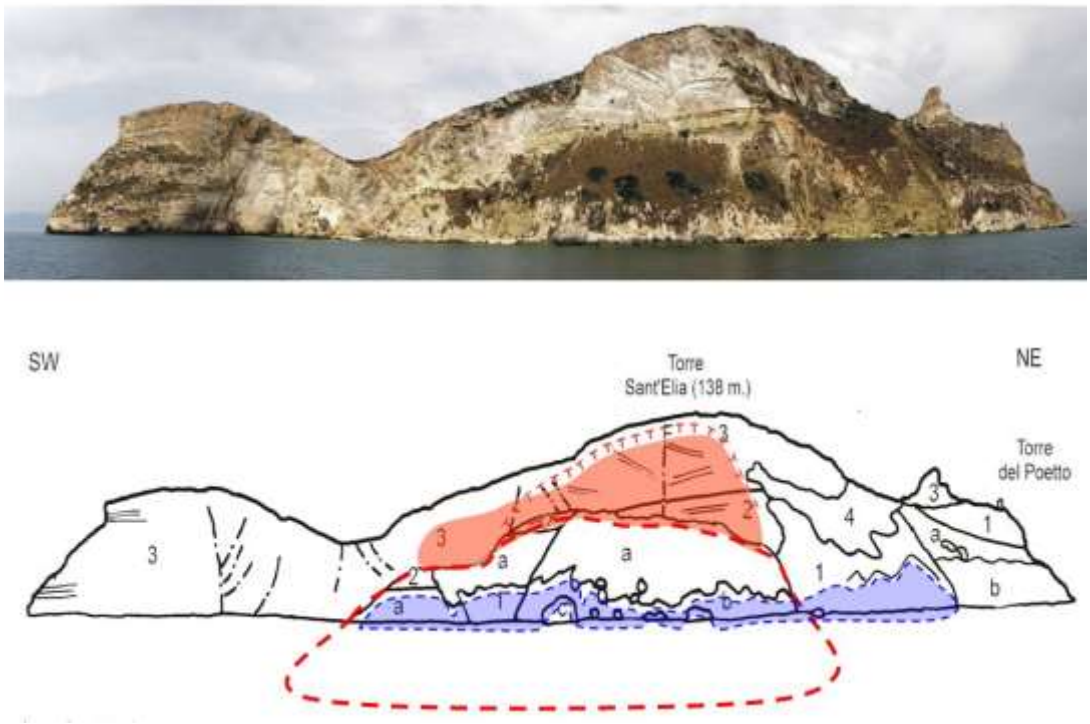


*Figura 6 - Paleofrana lungo la costa del promontorio della Sella del Diavolo (Cagliari); si distingue la paleo-falesia a controllo tettonica (**a**); il corpo di frana, versante deposizionale di sostituzione (**b**); la ripa di erosione in arretramento accelerato incisa dalla linea di riva attuale.*

I processi erosione litorale dei depositi di paleo frana posso presentare caratteri di arretramento accelerato (dinamiche di crollo o crollo ribaltamento) o portare, ove presenti, alla riattivazione di superfici di scivolamento preesistenti (dinamiche di scivolamento rotazionale o planare).

2.3.1.4.5 Cartografia Geomorfologica

Gli strumenti più efficaci per illustrare e comprendere la realtà fisica del territorio studiato sono rappresentati dalle carte geomorfologiche, documenti prodotti mediante rilevamenti diretti e sistematici effettuati sul terreno e su immagini telerilevate (fotografie aeree ed immagini satellitarie).

I dati, rilevati a scale diverse in rapporto alle finalità delle indagini, vengono riportati su basi topografiche o su ingrandimenti di immagini telerilevate (ortofotocarte, ortofotopiani, fotomosaici ecc.) in modo da mettere chiaramente in evidenza la loro distribuzione spaziale ed i loro rapporti reciproci.

L'analisi sinottica e integrata dei dati suddetti consente di delineare il quadro morfoevolutivo dell'area studiata e di formulare alcune ragionevoli previsioni sulle sue tendenze evolutive future.

Per questo ultimo motivo, oltre alla loro indiscutibile valenza scientifica, le carte geo-morfologiche assumono un ruolo importante in campo applicativo soprattutto per quanto riguarda la pianificazione del territorio, la mitigazione dei rischi naturali e la prevenzione di eventi calamitosi.

L'analisi geomorfologica applicata allo studio dei processi gravitativi in ambito costiero è finalizzata alla restituzione di carte geomorfologiche elaborate ad un dettaglio tale da permettere una rappresentazione fedele delle morfologie riconoscibili (sui versanti, lungo la costa ecc.) e la loro definizione sotto l'aspetto morfografico, morfometrico, morfogenetico, morfocronologico e morfodinamico. (Dramis & Bisci, 1998).

La rappresentazione dei processi segue procedure morfometriche codificate (IAEG *Commission on Landslides* 1990 - 2006) sia per le rappresentazioni planari che in sezione. Viene proposta una legenda geomorfologica che si ispira ai principi ed alle simbologie proposte nel Quaderno del Servizio Geologico Nazionale, serie III, volume 4 "Carta Geomorfologica d'Italia – 1:50000 Guida al Rilevamento" e in particolare allo schema di legenda per la carta geomorfologia della Regione Toscana.

La legenda che viene proposta (vedi Allegato C) mantiene un'impostazione basata sulle tradizionali suddivisioni in:

1. idrografia ed elementi meteo-marini
2. forme, processi e depositi di versante dovuti alla gravità
3. forme e depositi di origine carsica
4. forme e depositi di origine marina
5. prodotti dell'alterazione meteorica in situ
6. forme relitte, superfici di spianamento e forme associate talora di genesi complessa

Per le frane si è adottata una simbologia speciale che sia rappresentativa del tipo di movimento (4 classi) e dello stato di attività (4 classi) seguendo uno schema che discende dalla tradizionale classificazione di Varnes (1978).

2.3.1.5 Caratteristiche Geomeccaniche

Le caratteristiche geomeccaniche influenzano notevolmente la stabilità delle coste alte; gli ammassi rocciosi risultano per la maggior parte fratturati e pertanto largamente condizionati nel loro comportamento meccanico dalle discontinuità che isolano l'ammasso roccioso in volumi di roccia unitaria. Per prevedere e prevenire fenomeni gravitativi è essenziale quindi che sia la struttura dell'ammasso roccioso che la natura delle sue discontinuità siano attentamente analizzate. Le complessità geomorfologiche e la difficile accessibilità dei versanti in roccia rendono, in molti casi, difficile l'acquisizione sistematica dei parametri geomeccanici (raccomandazioni dell'I.S.R.M.) e di conseguenza la caratterizzazione dell'ammasso roccioso. Negli ultimi anni l'avvento di tecniche di telerilevamento, quali la fotogrammetria e il *Laser Scanner*, hanno aperto nuovi scenari nell'analisi geostrutturale grazie alla loro capacità di ricostruire modelli tridimensionali del versante con elevato dettaglio (Salvini et al., 2013; Francioni et al., 2014). In Tabella 2.4 sono riportati gli elementi ed i parametri essenziali nella definizione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi.

Tabella 2.4- Metodi e strumenti per il rilevamento geomeccanico dell'ammasso roccioso.

Oggetto	Metodi	Strumenti
Natura delle discontinuità (stratificazione, faglie, fratture, diaclasi, foliazione, clivaggio, giunti da raffreddamento)	Rilevamento Geomeccanico diretto, e indiretto (Fotogrammetria, Laser Scanner, Fotoanalisi, termografia a infrarosso)	Misure dirette sul campo (Sclerometro, ecc.) e indirette tramite Remote Sensing (UAV, Laser Scanner, stereovisori, fotocamere digitali e termocamere), Software modellazione 3D, ecc.
Geometria delle discontinuità (direzione, immersione inclinazione)		
Caratteristiche delle discontinuità: spaziatura, JRC, persistenza, apertura, ampiezza, riempimento, alterazione, condizioni idrauliche, resistenza a compressione delle pareti, alterazione, indice Ib & Jv.		
Proprietà fisiche: peso di volume, porosità, coefficiente di imbibizione, grado di compattezza	Analisi di laboratorio	Bilancia idrostatica, porosimetro, ecc.
Proprietà meccaniche: resistenza a compressione monoassiale, resistenza alla trazione, resistenza alla flessione, moduli di elasticità.		Point Load Test, compressione monoassiale, prove di taglio diretto e triassiale, Berlinese, Slake Durability Test, Tilt test, ecc.)

Tra questi, le proprietà fisiche (peso di volume, porosità, coefficiente di imbibizione, grado di compattezza, ecc.) sono importanti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche (resistenza a compressione uniassiale, resistenza alla trazione, moduli di elasticità, resistenza all'abrasione) e sulla loro variazione nel tempo causata dai processi di *weathering*, che in aree costiere sono particolarmente accelerate dallo *spray* salino.

Le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso variano in modo sistematico all'interno delle zone di alterazione. Nei graniti la perdita di resistenza delle rocce moderatamente alterate rispetto a quelle fresche è dell'80% e nelle argille è di circa il 75%, a causa dell'aumento delle microfratture. Le microfratture, i pori e i vuoti sono quindi i fattori dominanti che controllano la resistenza delle rocce più che non la mineralogia stessa (Gupta & Rao, 2000). Studi su basalti hanno dimostrato che la resistenza a compressione delle rocce misurata con lo sclerometro (martello di Schmidt), la velocità delle onde di compressione e il peso di volume diminuiscono con il grado di alterazione della roccia, mentre la porosità e l'assorbimento d'acqua aumentano (Gurocak & Kilic, 2005). Alcuni autori hanno proposto degli indici per valutare la suscettività delle rocce all'alterazione salina, specialmente in ambiente costiero, la cui sintesi è riportata in Tabella 2.5.

Tabella 2.5 - Indici per la valutazione della suscettibilità delle rocce all'alterazione

Alterazione	Indice	Riferimento bibliografico
Suscettibilità delle Rocce all'alterazione salina	n/St (MPa^{-1}), *dove: n=porosità, St= resistenza alla trazione*	Sunamura et al 2007
Indice di suscettibilità all'alterazione	WSI=P/St (MPa^{-1}), dove: *P=pressione totale di cristallizzazione, St= resistenza alla trazione*	Matsukura & Matsuoka 1996
Sali lisciviabili in acqua	Concentrazione in mg/l dei sali lisciviati in acqua	Cabria, 2015
Grado di alterazione	Rw=Dw/Te (mm/a), dove: *Dw =profondità della cavità, Te=tempo in anni di esposizione*	Cabria, 2015

2.3.1.6 Caratteristiche Geotecniche

Le coste alte rocciose sono costituite oltre che da falesie anche da versanti scoscesi che spesso giungono fino al mare, ricoperti da numerose tipologie di depositi recenti (depositi di versante, coltri eluvio-colluviali, depositi di frana, depositi antropici). Questi depositi, essendo in gran parte sciolti, possiedono delle caratteristiche geotecniche più simili alle terre che non agli ammassi rocciosi (depositi coerenti) e di conseguenza meritano una trattazione separata rispetto all'ammasso roccioso. I depositi di versante e le coltri eluvio colluviali spesso sono interessati da movimenti in massa causati dallo spostamento differenziale di materiali sciolti sotto l'azione della gravità. L'innesco dei processi di versante è legato principalmente a:

- fattori che sovraccaricano il pendio (aumento del contenuto d'acqua, peso della neve, depositi di crollo, riporti di terreno);
- fattori che riducono il supporto (scalzamento alla base da parte del moto ondoso, attività carsica, dissoluzione, erosione);
- fattori che causano pressioni laterali (rigonfiamento delle argille, deformazione, essicamento, congelamento dell'acqua nelle fessure, ecc.);
- fattori che esercitano sforzi di taglio transitori (attività sismica, crolli, ecc.);
- fattori intrinseci iniziali (natura dei materiali, giacitura degli strati, orientazione del pendio, ecc.);
- fattori esterni successivi (alterazione fisica e chimica dei materiali, variazioni contenuto d'acqua, ecc.).

Attraverso una serie di analisi geognostiche *in situ* e prove di laboratorio (Tabella 2.6) è possibile ottenere i parametri fondamentali che definiscono le caratteristiche geotecniche dei depositi, in particolare granulometria, Limiti di Atterberg, il peso di volume, il contenuto d'acqua, l'angolo di attrito, la coesione, ecc.).

Tabella 2.6 -Metodi e strumenti per la Caratterizzazione Geotecnica dei depositi incoerenti.

Oggetto	Metodi	Strumenti
Caratteristiche Geotecniche: Granulometria Limiti di Atterberg Proprietà indice (peso specifico, indice dei vuoti, ecc.) Contenuto d'acqua Attività delle argille Angolo di attrito Interno Coesione Coefficiente di permeabilità	Campionamenti Analisi Geotecniche in situ e in laboratorio	Prove penetrometriche *in situ*, Analisi granulometriche, Prova al blu di metilene, Prove di taglio diretto, residuo, Prove triassiali, Prove edometriche, ecc.

Sulla base delle tensioni locali che si prevede si sviluppino sui versanti e delle condizioni di drenaggio, i parametri di coesione e resistenza di attrito potranno essere determinati attraverso prove di taglio dirette e residue, per versanti interessati da instabilità delle coltri superficiali, o attraverso prove triassiali per la verifica dello *stress path* e della permeabilità dei terreni, quando sia prevista una superficie di scivolamento più profonda.

2.3.1.7 Caratteristiche Idrogeologiche

Le caratteristiche idrogeologiche condizionano sia direttamente che indirettamente la stabilità di un'area. Come noto in letteratura l'interazione dell'acquifero col substrato può influenzare l'alterazione delle rocce e dei versanti pregiudicandone la stabilità e le caratteristiche geotecniche (resistenza al taglio, angolo di attrito interno, alterazione, carsismo, ecc.). Le caratteristiche idrogeologiche principali sono date da: relazione tra bacino idrografico e idrogeologico, permeabilità, infiltrazione, geometria dell'acquifero,

direzione del flusso, coefficiente di permeabilità (Tabella 2.7). Spesso spazialmente il bacino idrogeologico con quello idrografico non coincidono, il deflusso delle acque superficiali con l'infiltrazione dipendono dalla stratigrafia e dalle caratteristiche geologiche del sottosuolo oltre che dalle condizioni morfologiche; per questo motivo risulta indispensabile stabilirne i limiti fisici. La permeabilità è sicuramente una delle caratteristiche più importanti da quantificare perché identifica il comportamento idrodinamico di un complesso idrogeologico. La permeabilità dipende direttamente dalle caratteristiche genetiche delle rocce e da una serie di fattori derivanti dalla loro storia geologica. Si possono distinguere due tipi principali di permeabilità: una permeabilità per porosità primaria e una permeabilità per fratturazione.

Tabella 2.7 - Caratteristiche idrogeologiche principali.

Oggetto	Metodi	Strumenti
Individuazione del bacino idrografico e idrogeologico	Rilievi geologici sul campo, rilievi idrogeologici	
Permeabilità	Prove di emungimento e analisi di laboratorio (Coefficiente di permeabilità, granulometria)	Pompe, capacimetri, flussimetri, piezometri, pressiometri, piezoconi, permeametri a carico variabile e costante
Infiltrazione	Metodi analitici (Horton, Philip, Kostiakov, Dvorak)	Misure dirette con infiltrometri,
Geometria dell'acquifero	Rilievi piezometrici, prospezioni geofisiche	Piezometri, freatimetri, prospezioni geoelettriche
Direzione del flusso dell'acquifero	Modellazione (Modflow), analisi delle isopiezometriche	Software, traccianti, piezometri
Individuazione delle sorgenti	Rilevamento, Termografia, analisi fisiche e chimico-fisiche lungo il solco di battente	Termocamere, sonde multiparametriche, ecc.

La porosità primaria è determinata in gran parte dalla composizione mineralogica della roccia; la porosità secondaria è data dai fattori legati alla storia geologica (fessurazione, fratturazione, stratificazione, scistosità, alterazione, Tabella 2.8). La permeabilità primaria può essere valutata speditivamente in situ attraverso una serie di osservazioni dirette considerando ad esempio i rapporti stratigrafici, la stratificazione, la presenza di percolazioni d'acqua o di eventuali sorgenti e risorgive correlabili con variazioni granulometriche. Le caratteristiche granulometriche possono essere determinate attraverso le analisi granulometriche di laboratorio). Negli ammassi rocciosi le modalità d'infiltrazione e circolazione idrica sono strettamente legate alla presenza di fratture, giunti, microfessure e diaclasi (Tabella 2.9). In linea generale gran parte degli affioramenti presentano un certo grado di fratturazione; essi possono essere considerati come un insieme di blocchi di roccia intatti e delimitati.

Tabella 2.8 - Fattori di caratterizzazione della permeabilità per porosità (Civita, 2005).

	Osservazioni, rilievi, misure, analisi	
Fattori di caratterizzazione	Terreno	Laboratorio
Litologia e caratteri petrografici	Conducibilità idraulica	Analisi mineralogiche
Caratteristiche granulometriche	Prelievo dei campioni	Analisi granulometriche
Diametro dei granuli	Test del contenitore	Analisi granulometriche
Grado di assortimento	Test del contenitore	Calcolo Coefficiente di uniformità
Porosità totale	Determinazione volumetrica	Picnometro e Porosimetro
Porosità efficace	Prove di emungimento	Calcolo della porosità efficace
Conducibilità idraulica	Prove di emungimento e d'infiltrazione (*Slug test*)	Calcolo del coefficiente di permeabilità K

Tabella 2.9 - Fattori di caratterizzazione della permeabilità per fratturazione (Civita, 2005).

	Osservazioni, rilievi, misure, analisi	
Fattori di caratterizzazione	**Telerilevamento, Termografia**	**Affioramento**
Litologia e caratteri petrografici	Posizione e georeferenziazione	Caratteristiche principali
Tipologia delle discontinuità		Giunti, diaclasi, stratificazione, scistosità, microfessurazione
Rilevamento delle discontinuità	Andamento, posizione e georeferenziazione delle lineazioni; Termografia (umidità)	Orientazione, immersione, estensione, apertura, riempimento, copertura di suoli
Sistemi e famiglie di discontinuità	Persistenza, frequenza (Rilievi Fotogrammetrici e *Laser Scanner*)	Frequenza interconnessione tra famiglie, persistenza, indice di fratturazione
Reticolo idrografico	Rilievo tipologia e zonazione	Punti di scomparsa
Conducibilità idraulica	-	Prove di emungimento d'infiltrazione (*Slug Test*), prove con traccianti
Funzione idrogeologica delle discontinuità	Distinzione delle discontinuità umide da quelle prive d'acqua	Andamento in funzione della topografia e della profondità

Per la valutazione delle modalità d'infiltrazione e circolazione idrica è necessario elaborare un modello concettuale che identifichi la geometria del serbatoio e delle discontinuità che ne condizionano il drenaggio. La geometria delle discontinuità in funzione della morfologia e acclività dei versanti condiziona l'infiltrazione e il flusso delle acque sotterranee. Uno degli aspetti fondamentali per comprendere il comportamento idrodinamico del sistema idrogeologico è legato alla geometria delle discontinuità in funzione della topografia. La posizione spaziale delle discontinuità in funzione della morfologia e dell'acclività dei versanti, condiziona notevolmente l'infiltrazione e il flusso delle acque sotterranee (Schoeller, 1974).

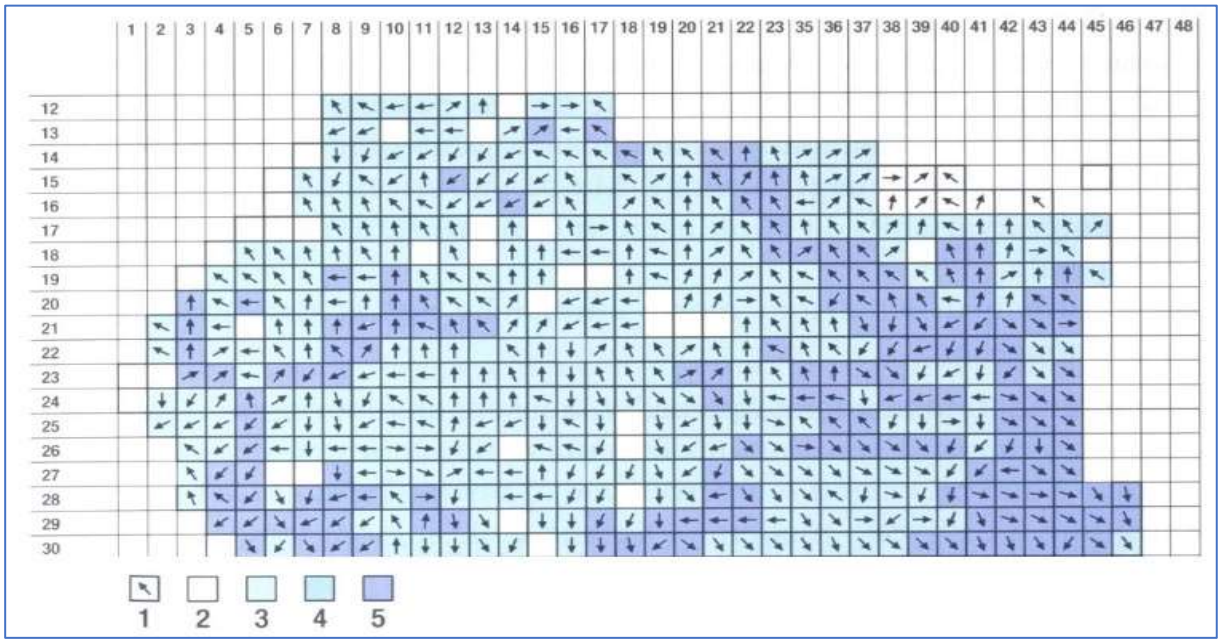


Figura 7 - Principali sistemi di fratture incrociati con l'acclività dei versanti (Civita, 2005). 1)Direzione preferenziale della fratturazione principale; 2) indice di fratturazione nullo; 3) basso; 4) medio; 5) elevato.

Secondo Schoeller (1974), le famiglie di discontinuità poste trasversalmente rispetto al pendio possiedono prevalente una funzione di intercettazione e infiltrazione sul deflusso superficiale (prevalentemente per le giaciture a reggipoggio e in misura minore per quelle a franapoggio); le famiglie invece che sono coassiali rispetto al pendio coprono principalmente un ruolo di trasporto. Attraverso l'utilizzo di una griglia a maglie quadrate è possibile sovrapporre il campo della fratturazione (distinguendo per ogni cella la fratturazione

prevalente), riportato su un supporto topografico adeguato (DTM). L'incrocio della morfologia ottenuta dal DTM con il campo delle fratture permette di discriminare la fratturazione secondo le sue funzioni idrogeologiche principali, ottenendo l'andamento delle direzioni potenziali del flusso sotterraneo (Figura 7). Questo metodo risulta utile soprattutto nella fase di studio preliminare in quanto mette in risalto le relazioni esistenti tra la fratturazione principale e il deflusso potenziale sotterraneo. La presenza di sorgenti con il loro regime, sono determinate dalle condizioni geologiche e morfologiche dell'acquifero. Le relazioni tra le caratteristiche geologiche e la presenza delle sorgenti possono dare informazioni sulle caratteristiche degli acquiferi in prossimità delle falesie e dei versanti costieri. La portata delle sorgenti subisce nel tempo variazioni che sono in diretta relazione con le precipitazioni che avvengono nel bacino che le alimenta e di conseguenza anche col livello piezometrico dell'acquifero.

2.3.1.8 Caratteristiche climatiche

Le analisi climatiche sono necessarie per la previsione di dissesti costieri innescati da mareggiate e precipitazioni intense. Anche le caratteristiche idrologiche possono fornire elementi utili per prevedere possibili scenari di rischio nel tempo derivati da eventi pluviometrici al di sopra della media. Il deflusso superficiale è regolato dall'acclività dei versanti e da parametri intrinsechi ed estrinsechi che caratterizzano il complesso acqua-roccia-terreno (precipitazioni, permeabilità, infiltrazione, bacino idrografico, copertura vegetale, ecc.). Come ampiamente riconosciuto in letteratura, le precipitazioni sono ritenute uno dei fattori di innesco dominanti nei processi di dissesto idrogeologico, in particolare per le colate detritiche. In corrispondenza di precipitazioni particolarmente intense, la quantità di deflusso superficiale elevato genera fenomeni di ruscellamento con trasporto di carico solido che possono degenerare in colate detritiche (*debris flow*), con elevate concentrazioni di materiale solido e che, per la velocità di propagazione e forza di impatto che li caratterizza, generalmente possiedono un'elevata capacità distruttiva e ricoprono una notevole importanza sull'evoluzione morfologica dei versanti. Fin dagli anni '80 diversi autori (tra cui Cannon & Ellen, 1985) hanno cercato di determinare delle soglie pluviometriche di innesco di validità locale da implementare nei sistemi di allerta. In questo contesto una "soglia pluviometrica" è definita come il valore minimo o massimo di un certo parametro (ad esempio l'intensità o la durata della precipitazione) in grado di innescare un cambiamento nelle condizioni di stabilità di un versante (White et al. 1996). La maggior parte delle soglie pluviometriche sono dedotte empiricamente, cioè sulla base dei dati storici a disposizione, e sono tracciate sul piano durata-intensità come inizialmente proposto da Caine (Caine, 1980; Moser & Hohensinn 1983; Cancelli & Nova, 1985; Wieczorek, 1987) costituendo il limite inferiore delle precipitazioni associate all'occorrenza di frane, in particolare scorrimenti superficiali e *debris flow*. Alcune tipologie di soglie pluviometriche considerano influente l'effetto della precipitazione antecedente (Crozier, 1999; Glade et al., 2000; Rahardjo, 2008) rispetto alla precipitazione critica di evento (intesa come quantità di pioggia caduta nel giorno di occorrenza della frana). L'influenza delle precipitazioni antecedenti sulla stabilità dei versanti, in particolare nei versanti costituiti da depositi sciolti (coltri eluvio-colluviali, depositi di frana, depositi di versante, suoli) è tuttora fonte di dibattito (Martelloni et al., 2012).

La determinazione di soglie pluviometriche attraverso un approccio probabilistico basato sulla statistica bayesiana sembra avere dato dei margini previsionali più attendibili rispetto ad altri approcci. L'approccio statistico bayesiano, rispetto a gran parte della letteratura esistente in materia di soglie pluviometriche (Guzzetti et al., 2007), prende in considerazione sia le precipitazioni che innescano i processi di dissesto (quindi la probabilità di avere un certo evento che generi una frana) che le precipitazioni non "innescanti" (quindi la probabilità a priori che si generi una frana senza precipitazioni). Le soglie pluviometriche possono rappresentare un importante strumento a supporto della previsione delle frane, nonostante ciò non indagano i processi fisici che stanno alla base della relazione precipitazione-innesco; infatti, come dati di *input* vengono considerate variabili di controllo caratteristiche dell'evento meteo (in particolare, durata e intensità). Gran parte dei modelli esistenti prendono in considerazione gli aspetti idrologici, idrogeologici,

morfologici e geotecnici del versante, tentando di riprodurre i fenomeni fisici che avvengono nel pendio e che ne determinano instabilità (Montgomery & Dietrich, 1994; Wilson & Wieczorek, 1995; Crosta, 1998; Crosta & Frattini, 2003; Crosta & Agliardi, 2003). Questi modelli sono generalmente composti dall'accoppiamento di due moduli: uno idrologico ed uno di analisi di stabilità. Mentre il calcolo della variazione del Fattore di Sicurezza è eseguito nella maggior parte dei casi attraverso il metodo dell'equilibrio limite sotto l'ipotesi di pendio infinito, i moduli idrologici presentano differenze sostanziali tra loro.

2.3.2 PARTE SOMMERSA

La definizione delle superfici sommerse e delle caratteristiche geologiche delle aree prospicienti le falesie costiere riveste un ruolo importante nella definizione dei processi che innescano la loro instabilità. Questo tipo di indagini non sono sicuramente logisticamente semplici, ma nondimeno data l'importanza che rivestono, deve essere considerata l'opportunità di utilizzare, o realizzare ex-novo, batimetrie costruite con il metodo *multibeam*. Abbinando un sistema *multibeam* e un *Laser scanner* su una stessa piattaforma è possibile eseguire rilievi plano-altimetrici di settori litorali, acquisendo contemporaneamente sia il settore emerso che sommerso (Figura 8)(Mitchell. et al., 2010). Sino ad ora questo tipo di configurazione è stato utilizzato per l'analisi delle opere di ingegneria marittima quali, banchine, moli frangiflutti o per effettuare rilievi finalizzati al ripascimento di spiagge, ecc. Tale applicazione ha il vantaggio di consentire il rilevamento di aree pericolose e inaccessibili quali possono essere gli ambiti di falesia; il *dataset* risultante consente, a seconda della strumentazione utilizzata, la restituzione di modelli digitali del terreno estremamente dettagliati e precisi.

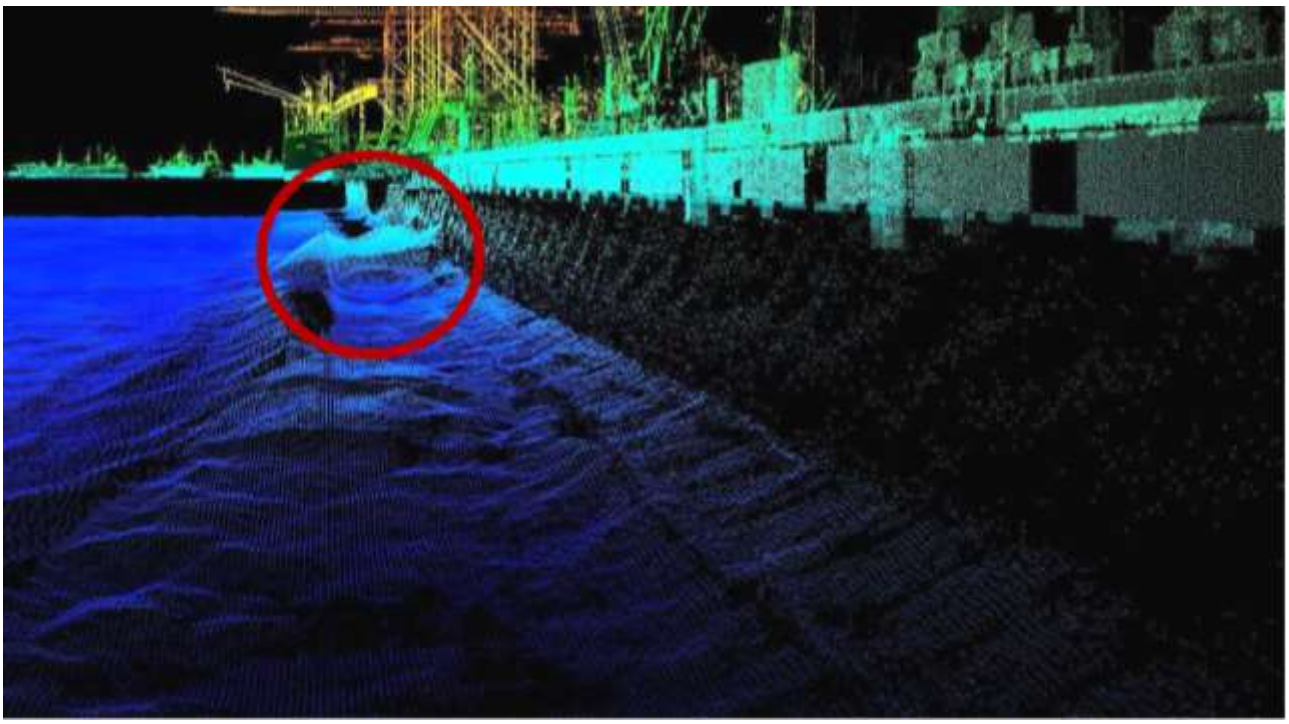


Figura 8 – Esempio di restituzione tridimensionale di dati acquisiti con sistema integrato Laser scanner/multibeam.

Nel 2000 i sistemi ALS (*airborne laser scanning*) furono introdotti per eseguire studi archeologici (Doneus & Briese, 2011); oggi, sono diventati un metodo valido per l'acquisizione dei dati per la restituzione di modelli digitali dettagliati del terreno (DTM) in ambito terrestre. Sistemi analoghi, ma utilizzati in campo marino (ALB - *airborne laser bathimetry*), richiedono un *laser* che permetta la penetrazione della colonna d'acqua

per acquisire la morfologia sommersa; per questo, nella maggior parte dei sistemi ALB viene utilizzato un impulso verde a 532 nm (Pope & Fry, 1997; Bukata et al., 1995).
Uno dei principali vantaggi dell'ALB rispetto ad altri metodi idrografici (*sonar multibeam*) è il breve tempo necessario per l'acquisizione. L'ALB può quindi essere utilizzato su vaste aree per restituire le caratteristiche topografiche ed eventualmente pianificare ulteriori campagne di acquisizione utilizzando altre tecnologie per rilievi batimetrici in aree di particolare interesse.

2.3.2.1 Modello digitale del fondale: rilievi batimetrici

Uno dei problemi fondamentali da risolvere quando si affrontano le problematiche inerenti lo studio delle coste rocciose alte è quello di disporre di un valido "supporto" cartografico di base su cui riportare i tematismi di sintesi degli studi e delle indagini eseguite.
Il progresso tecnologico è venuto incontro a questa esigenza e già da diversi anni si utilizzano diverse tecnologie per la ricostruzione tridimensionale dei fondali marini (Figura 9).
La mappatura batimetrica *multibeam* ha aumentato notevolmente le conoscenze dei lineamenti morfologici presenti sui fondali e dei processi geologici che agiscono in tali ambienti, coinvolgendo diversi settori disciplinari come la geologia-geofisica marina, l'ingegneria marittima, l'archeologia, la geodesia ecc..
La possibilità di ottenere DEM ad alta risoluzione e precisione, insieme a misure di riflettività dei fondali, rappresenta oggi un mezzo insostituibile per lo studio ed il monitoraggio ambientale e l'individuazione dei geo-rischi marini.
Oltre a questa tecnologia, è utilizzato il sistema *single beam*; si tratta di uno strumento che misura il tempo di andata e ritorno di un segnale acustico tra il suo trasmettitore / ricevente, il cosiddetto trasduttore che assolve la funzione di trasmettitore e ricevitore in tempi differenti, ed un bersaglio che è quasi sempre il fondale marino. La scelta dell'una o dell'altra tecnica dipende, oltre che, dalle disponibilità economiche, anche dai limiti "ambientali" presenti in ambedue le tecnologie.

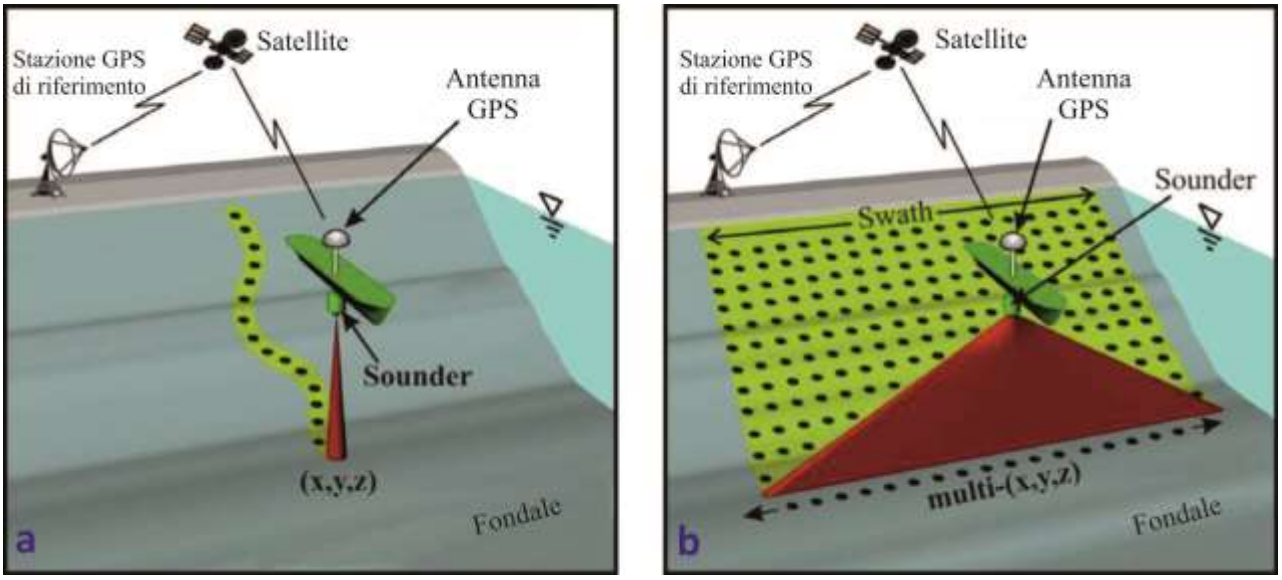


Figura 9 – Tecnologie per il rilevamento batimetrico dei fondali marini: (a) single beam; e (b) multi-beam. Da Muste et al. (2010) mod.

2.3.2.2 Rilievi batimetrici *singlebeam*

Il rilievo batimetrico *singlebeam* (SBES) dovrà essere eseguito mediante ecoscandaglio idrografico di precisione con una risoluzione di 1 cm, cono di emissione inferiore a 10° e in grado di operare con frequenza di non inferiore a 200 khz. Lo strumento sarà opportunamente interfacciato con un sistema di acquisizione per la registrazione digitale dei dati batimetrici e la loro georeferenziazione. Il sistema dovrà

essere, inoltre, interfacciato con una piattaforma inerziale (compensatore d'onda) per la correzione dei dati batimetrici dall'effetto onda.

2.3.2.3 Il rilievo batimetrico multibeam

Lo strumento utilizzato è un ecoscandaglio di tipo *multibeam* ad altissima risoluzione che lavora con segnali acustici ad una frequenza operativa di almeno 455 kHz; la larghezza della spazzata non dovrà essere inferiore a 130° di modo da poter acquisire, con il trasduttore montato in posizione orizzontale, un corridoio ampio almeno 3 volte la profondità dell'acqua fino ad una profondità massima di almeno 60 metri.

Per funzionare correttamente il sistema sarà supportato dalla seguente strumentazione esterna:

-Sistema integrato posizionamento / assetto / direzione composto da:

-Piattaforma inerziale per la compensazione dei movimenti dell'imbarcazione;

-Girobussola per la correzione di orientamento dell'imbarcazione;

-Sonda per la misura della velocità del suono nell'acqua in continuo e profilatore;

-Sistema di posizionamento con correzione differenziale di tipo RTK (*Real Time Kinematik*) e con precisione centimetrica per la corretta georeferenziazione dei punti campionati.

Il software di gestione del sistema ha registrerà i dati provenienti dal *multibeam* e dai vari strumenti e provvederà alla registrazione alla loro registrazione in formato digitale per la successiva fase di *post-processing.*

I rilievi ecografici di dettaglio, sia monofascio (*singlebeam*) che multi fascio (*multibeam*) seguono procedure *standard* nelle differenti fasi:

1) Pianificazione del rilievi;
2) Calibrazioni;
3) *Processing*;
4) Restituzione dei dati.

2.3.2.4 Rilievo *Side Scan Sonar*

E' una tecnica di rilievo acustico per lo studio indiretto della morfologia dei fondali marini e delle facies geologiche che caratterizzano i fondali.

Il *Side Scan Sonar* (SSS) è uno strumento acustico in grado di rilevare le anomalie morfologiche e tessiturali del fondale, come rocce isolate, variazioni laterali di sedimenti a differente granulometria e composizione, depressioni e strutture antropiche sommerse.

Il *plot* dell'intensità di riflessione (*backscatter* o riflettanza) produce un'immagine digitale (Figura 10) dove ogni singolo pixel rappresenta una cella di fondale.

Il *backscattering* è la retrodiffusione o riflettanza delle onde acustiche da parte di un terreno, ovvero l'effetto di riflessione delle onde o del segnale emesso dal trasduttore in direzione della sorgente. Il *tow-fish* viene accuratamente collegato al sistema *laptop*, mediante il cavo "*Towcable*" che funge anche da cavo di traino.

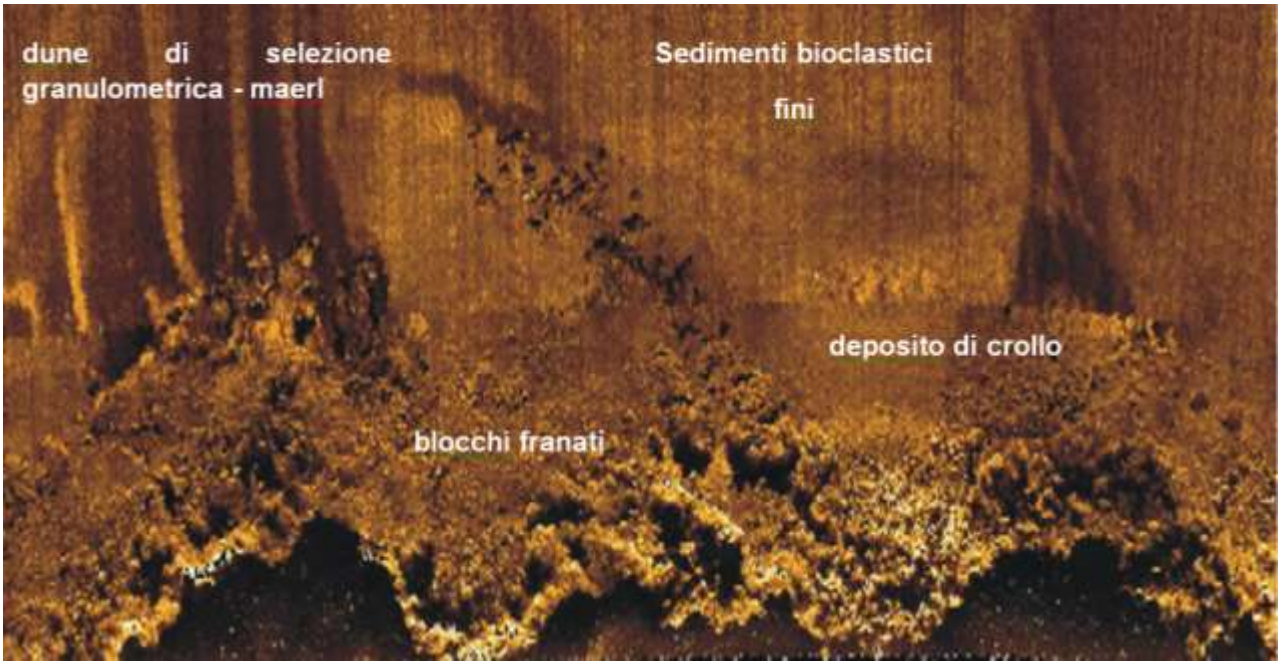


Figura 10 - Immagine SSS del piede di falesia Ovest dell'Isola di Tavolara, discriminazione dei principali patterns del sonogramma, sia sulla base dei caratteri strutturali dell'immagine che di backscatter.

2.3.2.4.1 Rilevamento diretto in immersione subacquea

Il rilevamento geologico e geomorfologico in immersione è sempre supportato da una prima base conoscitiva, in genere acquisita con metodi geofisici. L'indagine diretta è finalizzata alla elaborazione di chiavi interpretative utili alla restituzione oggettiva delle basi geofisiche; la prima fase è quindi rappresentata dalla identificazione e dalla scelta dei punti chiave localizzati nelle aree in cui si concentrano i principali problemi interpretativi o gli elementi particolarmente significativi in relazione alla tematica in studio. Le operazioni di indagine diretta sono note, specialmente in ambiente biologico, col termine di "*verità mare*".

2.3.2.4.2 Interpretazione e restituzione dati e analisi stratigrafica

La precedente procedura, associata alle osservazioni dirette raccolte in immersione, consente di:

- seguire a mare i limiti geologici già cartografati a terra;
-determinare la litologia degli affioramenti rocciosi sommersi;
-ricostruire i limiti tra litotipi differenti;
-rilevare le evidenze di lineamenti tettonici;
-rilevare lo stato evolutivo delle forme del rilievo costiero e sottomarino;
-rilevare le principali facies sedimentarie;
-riconoscere evidenze di morfologie erosive in falesia sommersa.

La caratterizzazione geologica e geomorfologica dei fondali permette quindi la caratterizzazione e la distribuzione dei sedimenti incoerenti, dei substrati rocciosi e della presenza di ecosistemi sensibili quali praterie a Posidonia oceanica. Tale analisi viene fatta principalmente sulla base dei dati aerofotogrammetrici per i settori pericostieri a bassa profondità (< 8 m) e sulla base dei dati geofisici e batimetrici per profondità maggiori. Nei sonogrammi *side scan sonar* i toni più chiari e meno saturi, decrescono con il decrescere delle dimensioni granulometriche, ma è dimostrata una forte influenza dei caratteri lito-composizionali del sedimento; ad una dominanza della frazione litoclastica corrispondono toni più chiari e tessitura sfumata; la composizione bioclastica porta invece a risposte più sature (Figura 11).

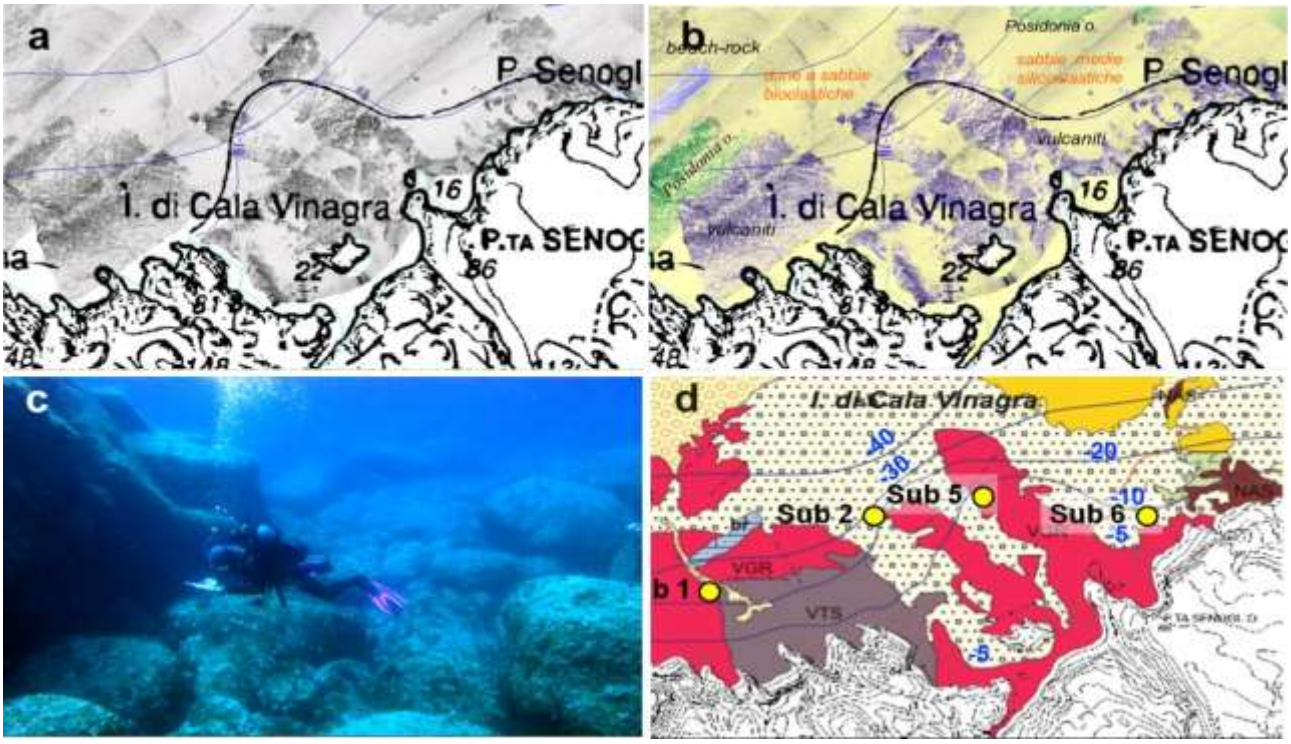


Figura 11 - Fasi del rilevamento geologico in aree pericostiere a costa rocciosa alta: a) telerilevamento acustico side scan sonar, foto mosaico; b) fotomosaico dei sonogrammi interpretato, mappatura e ipotesi interpretative; c) indagine diretta, rilevamento geologico subacqueo e campionamento, validazione e taratura delle ipotesi interpretative; d) cartografia finale con posizionamento delle stazioni di rilevamento diretto in immersione.

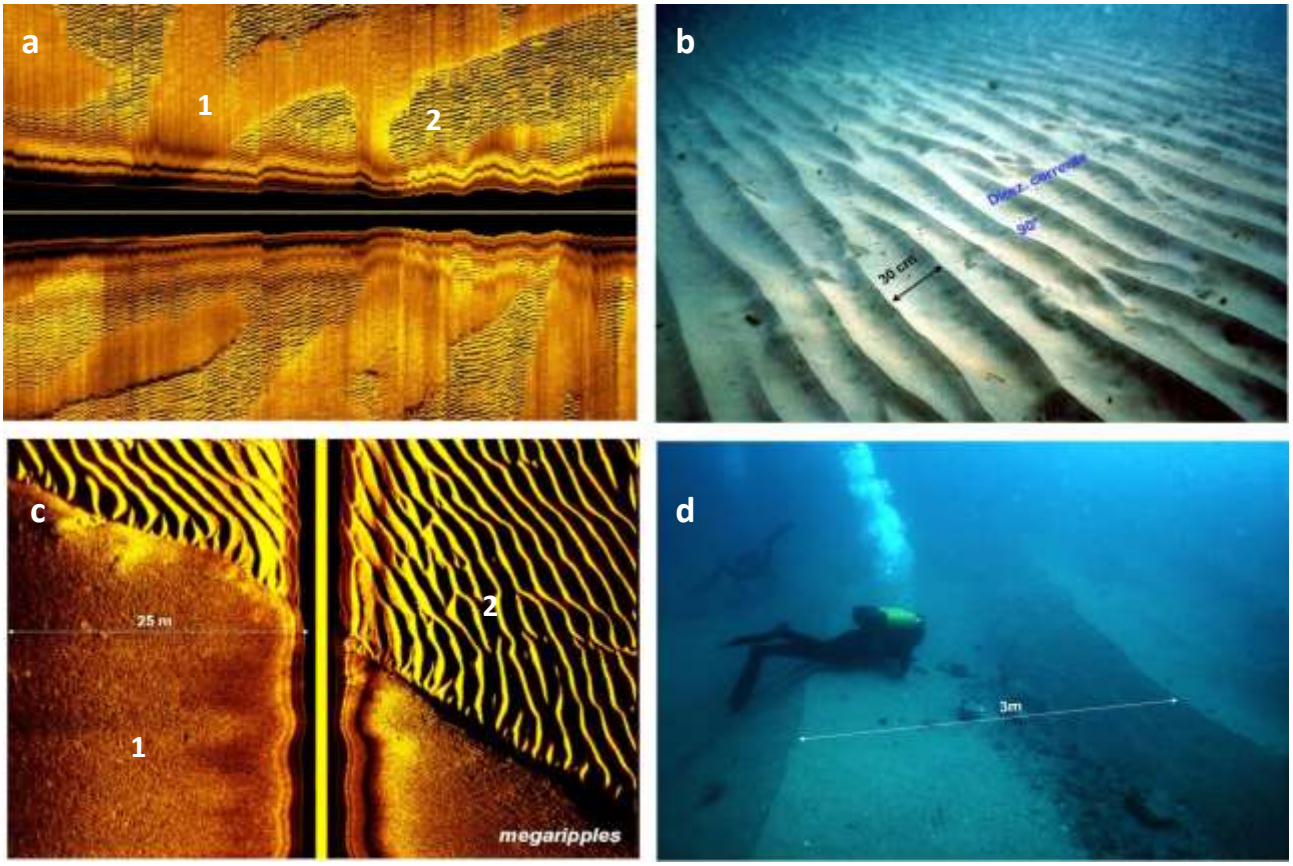


Figura 12 – a) Sonogramma Side Scan Sonar: 1- Sabbie medie e fini 2- strutture sedimentarie a ripples mark; b) strutture sedimentarie di tipo ripples mark; c) Sonogramma Side Scan Sonar: 1- Sabbie medie e grosse a dominante frazione organogena; 2- strutture sedimentarie a megaripples; d) rilevatore subacqueo impegnato nel rilevamento di strutture sedimentarie a megaripples.

Le sabbie litoclastiche, a carattere prevalentemente quarzoso e quarzoso-feldspatico, dominano nella piattaforma prossimale. La tessitura uniforme ed i toni più chiari subiscono variazioni in corrispondenza di modeste rotture di pendio e di canali debolmente acclivi (Figura 12).

L'analisi della dinamica dei sedimenti e dei processi erosivi al piede delle falesie viene effettuata attraverso lo studio delle facies dei sedimenti incoerenti e delle eventuali strutture sedimentarie rilevabili nel settore sommerso. Oltre a fornire indicazioni sui processi di interazione tra moto ondoso e la costa, tale fase consente di valutare il contributo dei depositi di frana al rifornimento dei litorali sabbiosi limitrofi.

2.3.3 Moto ondoso

L'informazione ondametrica è fondamentale in tutti gli studi, i progetti, i lavori e l'esercizio di opere di ingegneria costiera e marittima, nonché nell'analisi dei relativi impatti ambientali (Weisse et al., 2015). L'acquisizione dei dati costituisce quindi un'esigenza irrinunciabile per una conoscenza accurata e completa dei parametri meteo-marini che definiscono istante per istante e punto per punto lo stato di mare (Picone, 2009).

Il tipo di dati disponibili condiziona sia la metodologia di esecuzione degli studi degli stati di mare che la qualità dei risultati. I requisiti ideali dei dati sono (APAT, 2005):

- alto contenuto di informazioni e possibilità di estrarre tutti i parametri caratteristici;
- affidabilità e precisione;
- buona copertura del periodo di rilievo;
- durata estesa nel tempo (rappresentatività per il lungo termine);
- rappresentatività geografica per il sito in esame.

Nessuna delle fonti usualmente disponibili possiede contemporaneamente tutti questi requisiti. La disponibilità di dati strumentali sufficienti alla valutazione di eventi estremi non è ancora molto estesa. Ad esempio, per la Sardegna sono disponibili (dal 1989 al 2014) i dati ondametrici rilevati alla boa di Alghero, appartenente alla Rete Ondametrica Nazionale (RON), che fornisce i dati direzionali, per il fondale nel quale essa è ormeggiata, e le caratteristiche del moto che possono essere validamente estesi a tutta la costa occidentale dell'isola (Atzeni, 2011). Ma tutte le altre coste sarde sono sprovviste di rilievi strumentali, se si prescinde dai 56 mesi circa rilevati dalla boa di Capo Comino (Sardegna Nord-orientale), e dai 73 mesi circa rilevati dalla boa di Capo Boi nel Golfo di Cagliari (*dataset* RON in tecnologia *Linked Open Data* http://dati.isprambiente.it/id/website/ronRmn/html). Peraltro, nell'ultimo ventennio, sono disponibili i dati strumentali rilevati da satellite, che hanno bisogno di essere verificati con altre fonti (Izaguirre et al., 2011).

Altre fonti di dati diretti sono private o istituzionali installate per scopi ben precisi che vanno dalla ricerca alla progettazione ed esecuzione di strutture a riva o off-shore. Generalmente questi dati risultano a volte di ridotta utilità per alcune elaborazioni, a causa dei periodi di funzionamento troppo brevi (spesso inferiori ai tre anni) e discontinui (per interruzioni di servizio, spesso in corrispondenza dei picchi di mareggiata), per errori di installazione ed affidabilità degli strumenti e delle misurazioni. In alcuni casi anche le modalità impiegate per l'acquisizione e l'analisi dei dati hanno compromesso l'affidabilità dei risultati ottenuti.

L'utilizzo dei modelli avanzati permette la ricostruzione del moto ondoso dai dati meteorologici per orizzonti temporali ampi e non discontinui, e distribuiti spazialmente (Perez et al., 2017). Questi modelli richiedono la disponibilità di una considerevole mole di dati ed una potenza di calcolo di grosse proporzioni, non facilmente disponibile, tanto che l'utilizzo di questi modelli rimane, almeno per ora, limitato agli specialisti. In particolare, i modelli numerici d'onda di terza generazione oggi forniscono accurate informazioni sul clima ondoso (Stopa et al., 2016) a complemento dei dati misurati in termini di risoluzione e copertura. Per molti siti del Mediterraneo ove il *fetch* è limitato, risulta molto utile l'impiego di modelli semplificati.

I dati ondametrici possono essere acquisiti tramite misure dirette (rete RON, rete RMN) e indirette (metodo SMB, modelli SWAMP, modello WAM).

3 GEODATABASE

3.1 INDIVIDUAZIONE DELLA PIATTAFORMA DI ARCHIVIAZIONE E PUBBLICAZIONE DATI

Uno degli obiettivi principali da conseguire nella produzione di dati cartografici e in genere georiferiti è la realizzazione di un sistema per la gestione e per la condivisione dei dati in ambiente GIS e per la loro esposizione mediante un'interfaccia Web-GIS.

Risulta quindi necessaria l'individuazione e l'implementazione di una piattaforma modulare che soddisfi i seguenti requisiti:

- permettere l'archiviazione strutturata dei dati raccolti nei siti campione nelle campagne di acquisizione con le diverse tecniche di indagine;
- permettere l'analisi e la confrontabilità spaziale, oltre che numerica, delle osservazioni e dei prodotti derivati dall'elaborazione degli stessi;
- permettere la pubblicazione attraverso la rete delle osservazioni acquisite sui siti campione e la condivisione delle conoscenze che derivano dall'analisi dei processi di erosione delle coste esaminate.

Data la grande variabilità di osservazioni che confluirà dalle diverse attività di acquisizione previste, il modulo di archiviazione dei dati deve permettere lo stoccaggio, la gestione relazionale e l'utilizzo integrato di dati tabellari e spaziali acquisiti o elaborati in formato vettoriale e in matrici *raster*. Il database, pertanto, deve comprendere le funzionalità di gestione delle componenti geometriche associate alle componenti informative e deve essere in grado di costruire tabelle relazionali che consentano l'ottimizzazione della strutturazione dei contenuti

Attraverso interfaccia GIS, i dati spaziali devono essere visualizzabili nei rispettivi piani geografici con le proprie componenti geometriche e devono essere sovrapponibili reciprocamente per l'analisi multilivello ed essere confrontabili con altri dati topografici e ambientali a disposizione.

L'accesso ai dati deve essere rivolto sia alla comunità scientifica di progetto (intranet) sia anche alla più larga platea di utenti (internet), attraverso un'interfaccia *web* semplice, intuitiva ed efficace, che permetta ad un utente, anche non esperto, la ricerca, l'esplorazione, la visualizzazione e il *download* dei dati resi fruibili nel progetto. Queste funzionalità devono essere integrate nel sistema di pubblicazione, attraverso moduli di gestione ed esposizione del catalogo dei dati presenti nel database e dei metadati associati ai *dataset* di acquisizione, di elaborazione ed alla strumentazione utilizzata nelle campagne di osservazione ed analisi.

In virtù delle caratteristiche avanzate di cui dispone, dell'aderenza (nella versione base) alla filosofia Open Source che ne consente l'implementazione con funzionalità aggiuntive costruibili "ad hoc", del largo utilizzo da parte di diverse Pubbliche Amministrazioni per l'esposizione di complessi cataloghi dati, la scelta della piattaforma di condivisione verte sul software GeoNetwork e sugli applicativi cartografici specifici.

Questo sistema, infatti, incorpora modularmente sia la componente portale, per la pubblicazione e per la condivisione delle informazioni, sia la componente di archiviazione (database) organizzata in forma di catalogo di *Spatial Data Infrastructure* (SDI) così come definito nel "OGC *Reference Architecture*".

3.2 IL SISTEMA GEONETWORK

GeoNetwork Opensource è un ambiente software nato per la gestione dell'informazione spaziale.

Sviluppato in *joint venture* dalla FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), dal WFP (*United Nations World Food Programme*) e dall'UNEP (*United Nations Environment Programme*), è stato registrato nella sua prima versione nel 2003.

GeoNetwork è stato sviluppato per permettere l'accesso condiviso alle informazioni alle comunità che si occupano di informazioni spaziali attraverso un'architettura moderna, che è al tempo stesso potente e a

basso costo, basata sui principi del Free and Open Source Software (FOSS) e sulle norme internazionali per i servizi e protocolli (ISO/TC211 e OGC).

Il sistema fornisce strumenti di editing e funzioni di ricerca dei metadati oltre ad un visualizzatore web di mappe georiferite. Esistono numerose realtà ricomprese fra le organizzazioni internazionali che attualmente utilizzano la piattaforma GeoNetwork per fornire l'accesso ad una grande varietà di dati e metadati, inerenti diverse discipline e organizzati in maniera standard e coerente, grazie alla possibilità di utilizzare lo standard di riferimento internazionale del settore: l'ISO19115-Metadati.

Le principali caratteristiche di questo sistema sono:

- accesso a cataloghi di ricerca geospaziale locali e distribuiti;
- *uploading* e *downloading* di dati, cartografie, grafici, documenti, file PDF e qualsiasi altro tipo di contenuto digitale;
- *Web Map Viewer* interattivo in grado di utilizzare i servizi WMS da *server* distribuiti in tutto il mondo;
- *editing online* di metadati in formato xml con un sistema di *template* anche personalizzabili;
- raccolta programmata e sincronizzazione dei metadati tra cataloghi distribuiti;
- controllo degli accessi mediante un modulo specifico per la gestione degli utenti;
- interfaccia utente multi- lingue.

GeoNetwork è perfettamente integrato con gli standard di catalogazione e di pubblicazione di dati e metadati geografi e non geografici. Esso, infatti, prevede l'utilizzo degli ISO19115/ISO19119/ISO19110 secondo lo schema ISO19139, FGDC e *Dublin Core*, le interfacce per il catalogo (OGC-CSW2.0.2 profilo ISO *client* e *server*, OAI-PMH client e server, GeoRSS server, server GEO *OpenSearch, WebDAV harvesting*, supporto per *harvesting* GeoNetwork a GeoNetwork) e Servizi Mappa (OGC-WMS, WFS, WCS, KML e altri) attraverso il *software* GeoServer incorporato.

Oltre a fornire gli strumenti per la gestione e la pubblicazione di metadati sui dati territoriali, GeoNetwork fornisce anche gli strumenti per la pubblicazione dei servizi connessi, quali i servizi di ricerca distribuita di dati e metadati, che fornisce accesso a un volume enorme di informazioni provenienti da diversi ambienti. Inoltre fornisce i servizi di visualizzazione dei dati cartografici mediante mappa interattiva *Web- based*.

3.2.1 I metadati

Le funzionalità di catalogazione di GeoNetwork permettono di risolvere uno di punti focali per la condivisione delle informazioni, consentendo la costruzione di archivi di metadati strutturati ed integrati nel sistema.

La costruzione di un archivio di metadati del progetto, collegato ai dati ed agli strumenti, garantisce il raggiungimento di numerosi vantaggi che trovano maggiore riscontro nella consultazione e nella ricerca dei dati. I metadati catalogati ed organizzati permettono, infatti:

Di descrivere le caratteristiche dei dati per il loro corretto utilizzo;

La condivisione delle informazioni tematiche georeferenziate tra i partner di progetto e le utenze esterne;

Il monitoraggio del contenuto del sistema di dati territoriali ed ambientali, del loro stato di aggiornamento, della loro qualità e della loro affidabilità;

La possibilità di ricerca e visualizzazione dei dati di interesse secondo diversi criteri.

La piattaforma Geonetwork consente l'indicizzazione dei dati in un database dedicato consultabile via web. La catalogazione dei metadati potrà essere articolata anche in macrocategorie di riferimento, concordate con i partner del progetto, che verranno proposte dal portale.

Queste macrocategorie, implementabili e modificabili anche in corso d'opera, riguarderanno le tematiche di indagine del progetto e, pur non essendo vincolanti per la ricerca, tenderanno all'ottimizzazione ed alla facilitazione della consultazione.

Al momento, si individuano le seguenti macrocategorie, categorie e sottocategorie:

- Siti
- Strumenti
- Dati Parte Emersa
- Dati Geostrutturali
- Dati Geomeccanici
- Dati Geotecnici
- telerilevamento ottico
- telerilevamento *Laser Scanner*
- Dati Parte sommersa
- Rilievi batimetrici
- Rilievi single beam
- Rilievi multi beam
- Rilievi Side Scan Sonar

Definite le macrocategorie di metadato, è possibile procedere alla gerarchizzazione delle informazioni, con collegamenti del tipo Parent --- > Child che consentono di riconoscere una relazione logica fra i metadati.
La possibilità di poter settare legami gerarchici "Parent/Child" fra i metadati è offerta dallo standard ISO19115.
L'associazione logica dei metadati consente di aggregare i dati per tipologia di macrocategoria, come nel seguente esempio:
SITO --------> n…strumenti --------> Parte Emersa/Sommersa --------> n…misure --------> n…dataset
Ogni elemento della catena dipende dall'elemento da cui deriva e genera delle dipendenze secondo legami logici.
Questa gerarchia in GeoNetwork può essere esplicitata attraverso la creazione di legami che consente un agevole aggiornamento attraverso delle funzioni di propagazione e di auto compilazione. Il sistema consente l'aggiornamento in cascata delle informazioni, facendo ricadere eventuali modifiche ed aggiornamenti del "*Parent*" anche negli elementi "*Child*" che da esso dipendono, evitando quindi la ricompilazione manuale di record che possono essere anche numerosi.
L'inserimento dei metadati nel sistema avverrà fornendo agli specialisti delle varie tecniche di acquisizione le credenziali di accesso personali. Ogni utente potrà quindi essere in grado di inserire autonomamente i metadati di propria competenza, attraverso la compilazione di un *form* il cui contenuto rispetterà gli standard internazionali (ISO) che garantiscono l'interoperabilità delle informazioni.

3.2.2 Il database PostgreSQL

I dati alfanumerici e geografici derivanti dalle campagne di acquisizione e dalle elaborazioni saranno stoccati in tabelle di un DBMS PostgreSQL, integrato con GeoNetwork e implementato con il modulo PostGIS per i dati spaziali.
La strutturazione del database, a livello tabellare, sarà realizzata a seguito dell'analisi delle tipologie di dati che confluiranno nel sistema e delle specifiche variabili che devono essere introdotte per ciascun tipo di osservazione. Qualora la tipologia di dati lo richiedessero, attraverso la redazione di un diagramma E-R entità-relazioni, saranno definite e predisposte nel DBMS le tabelle di relazione che permetteranno di connettere le informazioni che logicamente appartengono a tabelle differenti ma che concettualmente possono essere collegate secondo una o più chiavi.
Una volta predisposto il database, si procederà al popolamento delle tabelle attraverso la definizione di procedure manuali, automatiche o semiautomatiche di trasferimento dati. Tali procedura consentiranno, a seconda della tipologia di dato, di riversare nel database i contenuti spaziali ed informativi direttamente

dagli strumenti di acquisizione/elaborazione oppure attraverso punti di elaborazione intermedi che, utilizzando processi di conversione e preparazione dei dati, consentono il passaggio verso il sistema di archiviazione.

Sotto il profilo qualitativo, i dati di tipo spaziale saranno verificati da procedure di controllo topologico e/o geometrico, mentre i contenuti informativi saranno sottoposti a verifiche formali sotto gli aspetti di coerenza, completezza e conformità del dato.

Se da un lato pertanto esisterà un ambiente GIS di *back-office* per la creazione, archiviazione e gestione di tutti i dati acquisiti nei siti di interesse, d'altra parte sarà possibile dare l'accesso a tutte le informazioni che i ricercatori e gli utenti in genere vorranno condividere.

L'accesso ai dati sarà gestito attraverso le interfacce di ricerca e pubblicazione di GeoNetwork, predisposte per il progetto.

Il *download* dei dati resi fruibili dagli utenti sarà garantito attraverso l'esportazione in formati aperti (ad esempio, *shapefile* per i dati spaziali vettoriali, dbf o simili per i dati tabellari, Geotif o ASCII per i dati *raster*).

3.2.3 Implementazione delle funzionalità di GeoNetwork

Grazie all'architettura software completamente aperta, GeoNetwork permette l'implementazione di nuove funzionalità definite e sviluppate da un utente che necessita di specifici strumenti di accesso o di ricerca dati.

Pertanto, rispetto alla versione base, per le finalità del progetto saranno introdotte delle migliorie sia dal punto di vista grafico sia sotto il profilo delle funzionalità.

L'aspetto grafico della versione *opensource* attualmente distribuita si presenta con una veste volutamente minimale e scarna, che garantisce l'accesso ai servizi, mantenendo però un aspetto anonimo.

In quest'ambito sarà progettata e sviluppata una veste grafica aderente all'iconografia del progetto, più moderna ed accattivante sotto il profilo estetico e contemporaneamente maggiormente intuitiva e leggibile per la ricerca e la consultazione delle risorse.

Sotto l'aspetto funzionale, sarà sviluppata l'analisi delle migliorie da introdurre al sistema. L'analisi si baserà sulla rispondenza delle funzionalità di base ai seguenti requisiti, o sulla opportunità di implementare il *software* con miglioramenti o con lo sviluppo di specifici moduli:

• Usabilità:

- Percezione: le informazioni e i comandi necessari per l'esecuzione dell'attività saranno sempre disponibili e percettibili;
- Comprensibilità: le informazioni e i comandi necessari per l'esecuzione delle attività saranno facili da capire e da usare;
- Operabilità: informazioni e comandi saranno tali da consentire una scelta immediata della azione adeguata per raggiungere l'obiettivo voluto;
- Coerenza: stessi simboli, messaggi e azioni avranno gli stessi significati in tutta la piattaforma;
- Apprendibilità: sarà garantito l'apprendimento del suo utilizzo da parte dell'utente in tempi brevi e con minimo sforzo
- Performance: i tempi di risposta di ciascuna pagina saranno tali da consentire l'usabilità del sistema anche a pieno carico informativo.

• Sicurezza:

Saranno definiti criteri che possano identificare e tracciare le operazioni effettuate dai singoli operatori con la possibilità di memorizzare *log* di sistema. Il *software* prevedrà strumenti minimi di *auditing* finalizzati al controllo dell'operatività del sistema informativo. Il *software*, come richiesto in capitolato e indicato anche nell'introduzione di questo capitolo, prevedrà la predisposizione e la gestione di diversi profili utenti per

l'accesso ai moduli, applicativi, sezioni del sistema, che consentiranno l'impostazione di permessi su vari livelli (lettura, lettura-scrittura, lettura – scrittura – modifica, modifica). Il profilo, inoltre, consentirà di limitare l'operatività a moduli specifici o gruppo di moduli.

• Flessibilità:

La soluzione applicativa proposta sarà flessibile in modo da garantire, anche attraverso un concetto di scalabilità di tipo tecnologico, l'adeguamento alle mutanti esigenze della Stazione Appaltante sia in termini di numerosità di utenti che di aree applicative da implementare. In particolare gli interventi fisici per installare o attivare nuovi moduli *software* non implicheranno interruzioni di servizio o re-implementazioni del sistema.

L'interfaccia *web* sviluppata per il progetto sarà inoltre dotata di punti di accesso facilitato alle risorse attraverso strumenti di ricerca di tipo testuale (ad esempio con menu a tendina sulle liste delle categorie di dati) oppure attraverso l'interrogazione delle mappe interattive sviluppate in ambiente web-GIS.

3.2.4 Integrazione degli ambienti di archiviazione e pubblicazione dei database in un unico punto di accesso.

Le esperienze di pubblicazione di dati e metadati secondo le specifiche dettate dalla normativa sulla condivisione e pubblicazione di dati aperti convergono verso la proposta di un sistema di gestione già ampiamente testato dagli scriventi e utilizzato in ambito nazionale e internazionale, SHARE-Geonetwork.

Il progetto SHARE-Geonetwork, che in questo ambito sembra rispondere al meglio alle esigenze anche del progetto MAREGOT, nasce nel 2013 con l'intento di condividere a livello internazionale i dati acquisiti dalle stazioni climatiche d'alta quota della catena del Karakorum-Himalaya. Partì da qui l'esigenza di sviluppare una piattaforma di accesso ai dati che contenesse oltre alle misure, tutte le informazioni necessarie ai ricercatori per capire con quali modalità, strumenti e processi di calibrazione i dati venissero raccolti.

Pertanto fu pensato di sviluppare un sistema in grado di gestire sia i dati che gli strumenti/sensori di misura per ogni stazione. Questa idea fu estesa anche ad altre tematiche (Progetto I-AMICA, Progetto Nextdata, Progetto FLOWERED) e riconosciuta come funzionale in diversi progetti che prevedevano lo sviluppo di un Geoportale, in cui oltre alla componente informativa del dato, si voleva dare il corretto contenuto metodologico adottato per la sua acquisizione. Così i metadati degli strumenti hanno assunto la giusta visibilità per permettere ai tecnici e ai ricercatori di poter applicare in contesti diversi da quelli già esistenti le stesse metodologie di acquisizione.

In sintesi si tratta di una architettura *software* che permette, attraverso un CMS (*Content Management System*) tipo *WordPress* di gestire in un unico ambiente i *database* geografici delle misure e restituzioni cartografiche e il *database* dei metadati.

http://geonetwork.nextdataproject.it/

4 VALUTAZIONE DELLA DINAMICA EVOLUTIVA

I rilievi descritti nel capitolo 2 ed organizzati in un *geodatabase* come indicato nel capitolo 3, servono per definire il contesto in cui si possono sviluppare condizioni di instabilità nelle coste alte rocciose, considerando i fattori geologici, idrodinamici e climatici. In sintesi, si tratta di confrontare le caratteristiche della costa in esame - che possiamo considerare come gli elementi predisponenti al dissesto - con i meccanismi che possono attivare i fenomeni di instabilità. Gli elementi predisponenti concernono le caratteristiche geologico-geomorfologiche, climatiche (intese come la media degli eventi metereologici a lu go termine), idrogeologiche e geotecniche. I meccanismi di attivazione dei processi che portano all'instabilità sono, in diversa misura e talvolta in compartecipazione, il moto ondoso, l'assetto geomeccanico, la variazione del livello del mare e della marea (sebbene questa sia poco significativa nel contesto mediterraneo), i venti (ed eventi metereologici in genere), il comportamento delle acque sotterranee, le precipitazioni e l'effetto di alterazione provocato dallo *spray* marino (Figura 13).

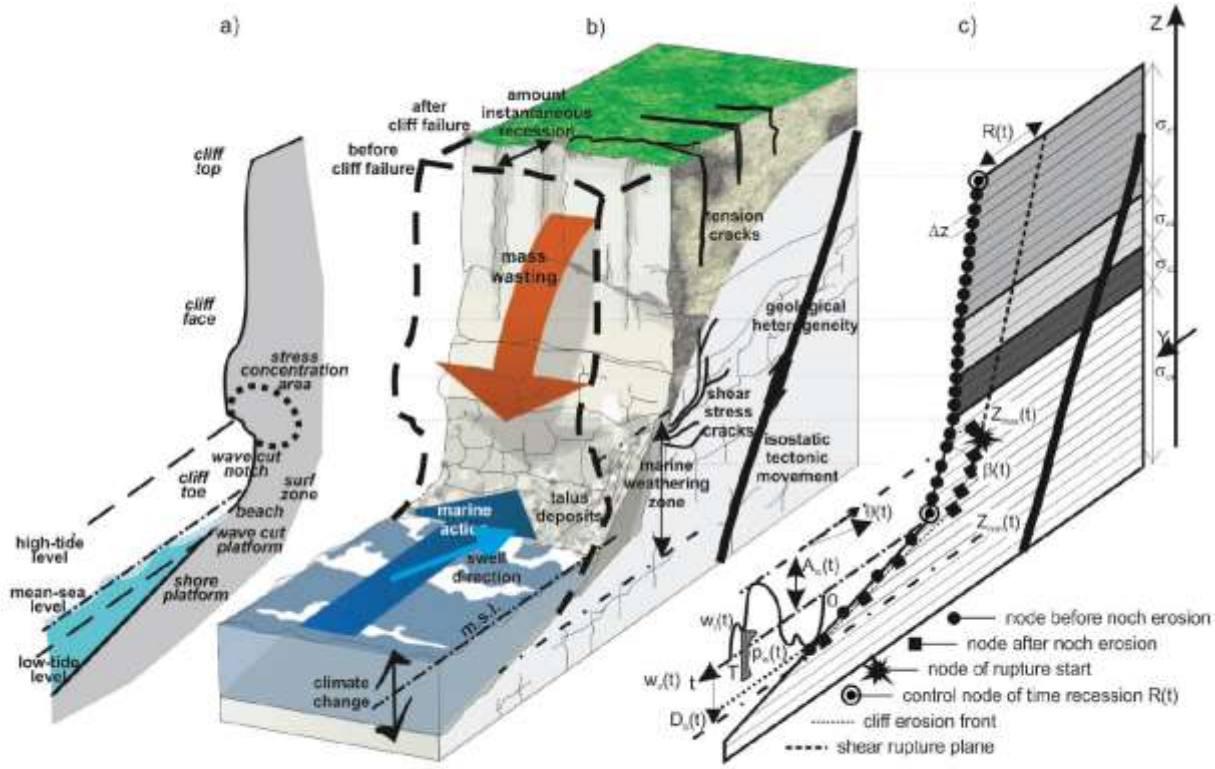


Figura 13 – Blocco diagramma di una falesia: (a) aspetti morfologici di una falesia; (b) unità costiera omogenea (CBU), che presenta condizioni geologiche ed oceanografiche omogenee; (c) discretizzazione di una sezione litorale su falesia con gli elementi principali coinvolti, da (Castedo et al., 2017).

Lo studio delle coste alte è prevalentemente orientato a comprendere il fenomeno dell'erosione e dell'arretramento in modo da poterne predire l'evoluzione e quindi pianificare interventi che possano ridurre il possibile danno. La stragrande maggioranza delle esperienze e le ricerche note nella letteratura internazionale (Sunamura, 1992; Castedo et al., 2012; Lim et al., 2010; Del Rio & Gracia, 2009; ecc.) sono concentrate sui fenomeni di arretramento delle coste alte costituite da rocce tenere o molto tenere (resistenza alla compressione uniassiale - o ad espansione laterale libera - inferiori a 25-50 MPa), mentre le coste delle aree in studio nell'ambito partenariale sono in grande prevalenza costituite da materiali da mediamente a molto resistenti alla deformazione (vulcaniti, carbonati, arenarie ben cementate, ecc.).
Sebbene esistano differenti approcci, anche riguardo ai dati rilevati ed al modello di analisi scelto, vi è in letteratura un sostanziale accordo nel classificare due tipologie estreme (*end-member*) di meccanismi che

innescano frane in contesti di falesie attive, applicabili anche a falesie costituite da rocce dure: uno "marino", prevalentemente conseguente all'azione del moto ondoso, ed uno invece più legato a fenomeni "terrestri" di evoluzione del versante, tra cui il più rilevante è l'azione delle acque sotterranee. Tra questi due estremi si possono verificare situazioni di interconnessione tra i fenomeni, con interazione di processi marini e terrestri che creano condizioni di instabilità diverse, soprattutto per la loro tendenza evolutiva; fino ad arrivare a situazioni in cui, nella stessa falesia, si possono sviluppare diverse tipologie di frana, passando da un meccanismo di attivazione ad un altro.

L'analisi della dinamica evolutiva di un tratto di costa alta rocciosa qui proposta per comprendere i fenomeni che ne pregiudicano la stabilità, è finalizzata a conseguire due obbiettivi di differente scala. Alla **scala locale**, quella del singolo versante costiero (falesia), lo scopo è quello di verificare la pericolosità ed il rischio idrogeologico, spesso in presenza di fenomeni passati, talvolta recenti, e costituisce la base di conoscenza imprescindibile per la progettazione dell'intervento. Alla **scala regionale**, di minor dettaglio, lo scopo è quello di individuare con un'accettabile approssimazione le aree con diversi gradi di propensione al dissesto in modo da avere uno strumento di pianificazione nell'uso delle aree costiere. Le due differenti scale, seppur basate sui medesimi modelli concettuali generali, utilizzano in modo diverso i dati rilevati descritti nel capitolo 2.

4.1 ANALISI ALLA SCALA LOCALE

Alla scala locale lo scopo principale è quello valutare il grado di stabilità di un versante e la sua evoluzione nel tempo. Le condizioni di equilibrio incidono in maniera determinante su una serie di fattori che tendono a ridurne la stabilità (caratteristiche intrinseche, pendenza del versante, geometria del rilievo, ecc.). Come già ricordato, nel caso delle falesie costiere attive l'effetto marino rende il quadro più complesso.

4.1.1 Coste in arretramento

Abbiamo già ricordato che l'approccio tecnico al problema della stabilità delle coste alte in ambito scientifico è principalmente rivolto alle coste rocciose in rapido arretramento, un caso non comune nel contesto mediterraneo considerato nel progetto MAREGOT. Gli studi noti mostrano che nelle coste in rapido arretramento è importante non solo la posizione geografica della falesia (quindi la sua orientazione rispetto ai venti e condizioni climatiche in generale) ma anche l'interazione con il regime idrodinamico in continua evoluzione (moto ondoso, variazioni di marea e del livello medio del mare, ecc.), che crea un complesso sistema costiero (Figura 14) (Sunamura, 1992; Lee e Clark, 2002; Castedo et al., 2012). Uno degli obbiettivi intermedi del progetto è proprio verificare quanto l'approccio previsto per un contesto idrodinamico, geologico e climatico diverso sia applicabile alle aree costiere del Tirreno centro-meridionale e delle coste provenzali, e soprattutto quali dei parametri e dei processi già individuati siano validi e nel caso individuarne o studiarne di nuovi. Lo studio efficace dei diversi scenari di recessione costiera nelle diverse condizioni necessita di un'adeguata rappresentazione dei processi coinvolti, in particolare dove la linea di costa risponde in modo non lineare a causa delle variazioni delle caratteristiche geologiche in senso lato, del regime idrodinamico, clima, ecc. Per ottenere questo risultato l'approccio scelto, come evidente da quanto descritto nel capitolo 2, è quello di integrare diverse competenze tecnico-scientifiche. Solo l'attività sperimentale permetterà di trovare il risultato più soddisfacente, per cui in questo documento vengono riportati i modelli che allo stato attuale delle conoscenze generali e delle competenze specifiche sono stati selezionati come i più promettenti.

Esistono pochi modelli affidabili di risposta al processo di arretramento delle falesie. Questi sono in genere basati sulle relazioni funzionali tra i processi fisici dominanti che agiscono sulla costa (Figura 14) (Walkden

& Hall, 2005; Walkden & Hall, 2011; Trenhaile, 2009; Castedo et al., 2012). Richiamiamo alcuni dei più significativi.

Essendo necessari modelli per simulare l'erosione basale e il conseguente collasso della falesia Bray & Hooke (1997) e Castedo et al. (2012) propongono un modello che attraverso l'analisi di stabilità dell'equilibrio limite con il "Metodo svedese" o il "Metodo Fellenius" (Fellenius, 1936), integra il modello di erosione in risposta ai processi agenti. Sono metodi validi però in rocce tenere dove prevalgono processi di instabilità attivati lungo superfici curve, sub-circolari, che si formano per una generica perdita di coesione del materiale. Non adeguati perciò a coste in rocce da mediamente a molto resistenti agli sforzi di taglio (resistenza a compressione uniassiale > 50MPa).

Lajoie & Mathieson (1998) ritengono che l'azione del moto ondoso è il principale responsabile dell'arretramento del piede di falesia, mentre Hampton e Dingler (1998), in uno studio condotto su diverse aree dei promontori costieri della California settentrionale tra cui Pacifica, ipotizzano che l'azione delle infiltrazioni di acque sotterranee sia a volte prevalente; gli stessi autori hanno suggerito che l'azione delle onde può svolgere solo un ruolo secondario rimuovendo il deposito di accumulo al piede della falesia. Questo ovviamente legato all'incremento della pressione interstiziali nei sedimenti granulari poco coerenti che costituiscono quelle coste con conseguente riduzione della resistenza a taglio.

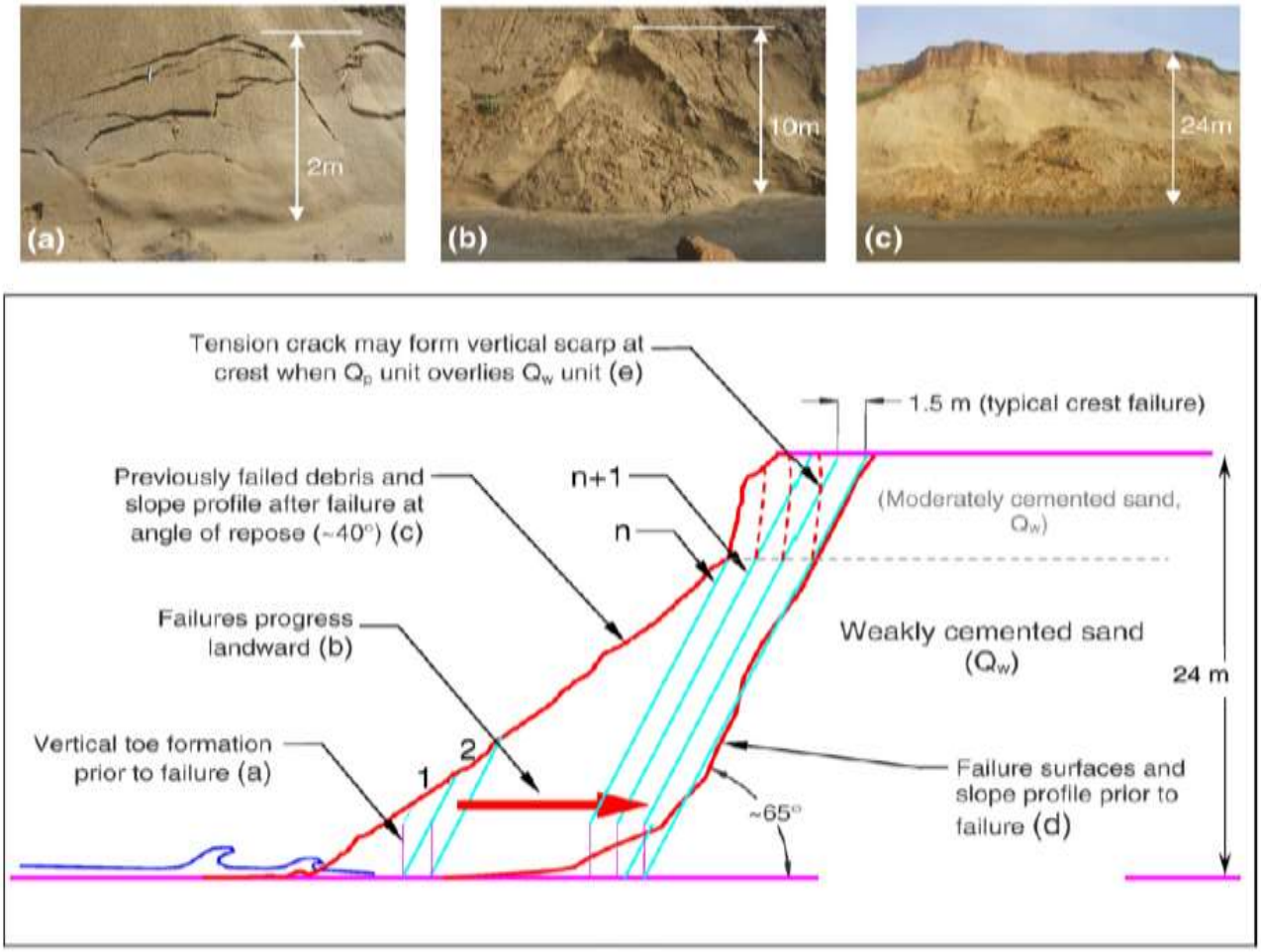


Figura 14 – Modello di arretramento della falesia sulla base di dati LIDAR indotto dall'azione del moto ondoso. Onde che agiscono solo su precedenti depositi di frana causano frane di scivolamento con altezza inferiore a 2 metri (a). I processi di crollo aumentano in altezza (1, 2, n) (b), ma senza interessare il ciglio, quando il moto ondoso disgrega il deposito basale connesso con precedenti crolli o materiale integro e intatto (c). Il crollo che interessa l'intera falesia avviene in n + 1 con conseguente arretramento parallelo del ciglio (d). Il ciclo ricomincia quando i detriti risultanti dai crolli vengono erosi dall'azione delle onde. A Pacifica (California), la sabbia moderatamente cementata (Qp) sovrasta la sabbia debolmente cementata sulla cresta e forma scarpate verticali (e) che non rispondono all'erosione del piede indotta dall'azione delle onde. Da Collins & Sitar (2008).

Sallenger et al. (2002) suggeriscono che potrebbe esserci un certo equilibrio tra questi due fattori ma non sono stati in grado di trovare un riscontro nei *dataset* acquisiti.
Collins & Sitar (2008) hanno cercato di fare chiarezza riguardo questo dibattito fornendo un quadro conoscitivo per i futuri studi sull'erosione delle falesie, identificando i meccanismi di crollo in ambienti a rapida evoluzione caratterizzati da sedimenti litorali sabbiosi debolmente cementati.
L'instabilità di una falesia costiera, secondo il modello classico di Sunamura (1992), è il risultato del rapporto tra Forze resistenti (Fr) e Forze agenti (Fw) (Figura 15), in cui il prevalere delle ultime comporta il crollo di una parte della falesia per erosione alla base.

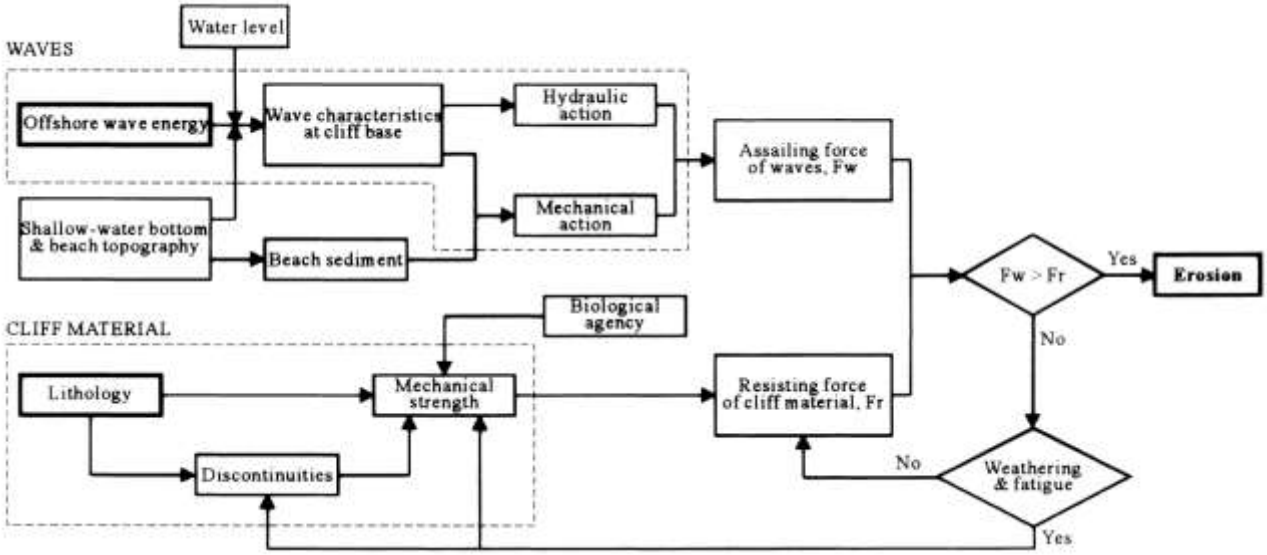


Figura 15 - Fattori che determinano l'erosione alla base della falesia per effetto del moto ondoso, secondo l'elaborazione del modello di Sunamura (1992) proposto da (Budetta et al., 2000).

È un meccanismo attivo soprattutto nelle falesie con rocce tenere, direttamente connesso all'azione delle onde sulle pareti, che provoca la progressiva erosione alla base di una falesia e il successivo crollo di un volume di roccia. È il classico modello di "sovraccarico di una mensola" e dipende da diversi fattori dipendenti dal litotipo e dalle sue caratteristiche geomeccaniche. La relazione tra presenza di un solco di battente e probabilità di sviluppo di una frana (effetto mensola) è ben discussa da Lim et al. (2010) che non solo hanno dimostrato la validità dell'ipotesi proposta da Sunamura (1988; 1992) ma l'hanno anche meglio articolata dimostrando statisticamente che esiste una relazione tra litotipo e instabilità, misurata valutando il rapporto tra profondità dell'incisione e volume della frana accumulata alla base della falesia. Il fatto che materiali più teneri producano durante i singoli eventi minori volumi viene interpretato come l'effetto di una maggiore instabilità, per cui il collasso avviene anche per effetto di solchi poco profondi e quindi con il coinvolgimento di sovrastanti cunei di roccia di minor volume. D'altra parte in rocce tenere, la frequenza dei fenomeni franosi è tendenzialmente maggiore che in rocce più resistenti. La presenza di un solco di erosione, non necessariamente solo quello legato al moto ondoso normale, come descritto nei paragrafi 2.3.1.4.2, è quindi un indicatore importante della possibile predisposizione al collasso gravitativo di una porzione del versante anche in rocce resistenti alla deformazione. Ugualmente, l'accumulo del materiale collassato al piede della falesia costituisce una protezione dall'erosione della falesia stessa, per cui la sua presenza previene una continua erosione alla base (Figura 13).

Sono state fatte delle stime approssimative della forza distruttiva delle onde al piede delle falesie in cui non sono disponibili dati batimetrici accurati, mediante la correlazione semi-logaritmica lineare tra il tasso di

arretramento delle coste rocciose e la resistenza meccanica dell'ammasso roccioso misurata come la resistenza a compressione uniassiale (Budetta et al, 2000).

Alla determinazione della dinamica evolutiva in atto, e all'identificazione delle tendenze evolutive future delle coste alte rocciose, concorrono tutti gli aspetti e il quadro di conoscenze acquisito attraverso le "Metodologie di indagine" presentate in capitolo 2. Partendo dal livello di mobilità tettonica dell'area e dall'assetto geologico-strutturale, dall'evoluzione geomorfologica passata dei processi gravitativi (paleo frane) e le evidenze di riattivazione, dall'interpretazione del sistema delle superfici attraverso l'utilizzo di dati da remoto con sensori multi banda, dalla analisi delle qualità geotecniche delle rocce alla modellistica applicata alla verifica stabilità degli ammassi rocciosi, dalla ricostruzione della circolazione di superficie e di sottosuolo (acquiferi profondi e pensili) al ruolo delle sorgenti sottomarine; fino alla quantificazione dell'energia incidente (moto ondoso) secondo le geometrie di esposizione della fascia costiera e quindi la valutazione del ruolo giocato dal cambiamento climatico globale nei suoi diversi effetti (innalzamento del livello marino e della altezza massime significativa delle onde estreme, influenza nei processi di *weathering* e mutamento della distribuzione delle precipitazioni) (Castedo et al., 2017).
Tutto ciò sarà affrontato secondo un approccio *multiscaling*, in particolare in un'analisi a scala locale sarà sviluppata l'identificazione di tutte le situazioni di dissesto rilevabili nell'area pilota, la ricostruzione del mosaico dei processi gravitativi distinguendone tipologia, livello di attività e generazione; per poi isolare alcuni dissesti tipologicamente più rappresentativi e/o maggiormente attivi su cui realizzare un approfondimento di maggior dettaglio (morfostrutturale, idrogeologico, geotecnico e morfostrutturale). Così da raggiungere, limitatamente agli oggetti studiati, un quadro conoscitivo adatto a supportare la progettazione di ipotesi di intervento di stabilizzazione o di mitigazione del rischio.

4.2 ANALISI ALLA SCALA REGIONALE (MODELLI DI VALUTAZIONE ALLA SUSCETTIVITÀ AL DISSESTO)

L'analisi alla scala regionale è necessariamente diversa da quella alla scala locale in quanto, nonostante l'esigenza conclamata di distinguere le aree con differente propensione al dissesto, per motivi logistici e di risorse non è possibile una caratterizzazione di dettaglio di chilometri di costa rocciosa come quella fattibile alla scala locale. Si tenta perciò di determinare alcune caratteristiche principali, che possano essere considerate indicative per la zonazione della pericolosità ad ampia scala, e che permettano di riconoscere i tratti che hanno una pericolosità tale da necessitare un maggior approfondimento in fase di pianificazione. Questi sono parte di quelli descritti nel capitolo 2 e comunque da quell'analisi derivano, ovviamente considerati con una approssimazione di scala adeguata. In genere, per poter fare questo tipo di zonazioni esistono diversi metodi, che concettualmente possono essere distinti in: a) modelli euristici, cioè quelli che fanno affidamento sulle capacità dell'osservatore di selezionare in base alla sua esperienza gli indicatori significativi per la definizione della propensione al dissesto, attribuendo ad essi un diverso peso a seconda delle diverse condizioni; b) modelli empirici, che studiano le relazioni tra diversi parametri fisici (pendenza del versante, sforzi trasmessi alla parete rocciosa dal moto ondoso, ecc.); 3) metodi statistici basati principalmente da un repertorio degli eventi franosi.
Preferiamo non adottare modelli euristici in quanto essendo influenzati dall'esperienza dell'operatore geologo, tendono ad essere scarsamente oggettivi e quando vengono confrontate aree analizzate da operatori diversi possono riscontrarsi disomogeneità nella zonazione proposta. Un'integrazione tra modelli empirici e modelli statistici dovrebbe fornire prodotti più attendibili, a patto di individuare parametri facilmente misurabili in tutte le condizioni. Di seguito dapprima si forniscono le generalità sulla zonazione della suscettività, pericolosità e rischio da frana, e quindi si affronta il caso più specifico della zonazione nell'ambito delle coste alte rocciose.

4.2.1 Zonazione della suscettività, della pericolosità e del rischio da frana: generalità

Ai fini della zonazione della suscettività, della pericolosità e del rischio da frana vengono comunemente utilizzati metodi qualitativi e metodi quantitativi (Corominas et al., 2014). I metodi qualitativi prevedono perlopiù criteri soggettivi con una zonazione in termini descrittivi come: inventari delle frane, cartografia geomorfologica, sovrapposizione di carte tematiche (indicizzazione delle cause, con modelli euristici); i metodi quantitativi invece si basano su criteri oggettivi più o meno riproducibili con stime numeriche delle probabilità (modelli statistici e modelli deterministici). Gran parte degli studi esistenti sulla zonazione si fondano su analisi di tipo qualitativo, i cui risultati hanno spesso un basso grado di attendibilità. Solo in misura minore esistono metodi più rigorosi con analisi su base quantitativa sia della pericolosità, attraverso la stima della probabilità di accadimento (frequenza) delle frane potenziali, sia del rischio a cui sono esposti gli elementi esistenti. L'esigenza di disporre di analisi quantitative del rischio, soprattutto ai fini della pianificazione territoriale, ha stimolato la comunità scientifica a condurre numerosi studi finalizzati alla realizzazione di vere e proprie linee guida e raccomandazioni per l'analisi quantitativa del rischio di frana (Fell et al., 2008; Corominas et al., 2014).

Tra gli altri, il JTC-1 (*Joint ISSMGE, ISRM and IAEG Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*) ha redatto delle Linee Guida che forniscono degli elementi utili per la descrizione e definizione della zonazione della suscettività, della pericolosità e del rischio da frana. Le Linee Guida sono rivolte a Enti locali, statali e governi nazionali, professionisti operanti nel campo dell'Ingegneria Geotecnica, pianificatori territoriali.

La **suscettività** per frana indica la propensione al dissesto gravitativo di una certa area, vengono proposti diversi modelli di valutazione, tra questi la determinazione della "Instabilità potenziale" (Linee Guida RAS, ecc.) basata su elementari operazioni di *overlay mapping*. Potendo avere a disposizione un *geodatabase* affidabile e completo uno dei metodi analiticamente più completi prevede l'utilizzo della valutazione dei fattori predisponenti incrociando tematismi e tipologia di movimento.

La **pericolosità** da frana identifica la probabilità che un dato evento gravitativo si sviluppi in un certo intervallo di tempo coinvolgendo una determinata area e presentando una data magnitudo che, nel caso di una frana, è rappresentata dal volume coinvolto e dalla velocità di evoluzione.

Per **vulnerabilità** s'intende il grado di danno atteso ad un elemento o ad un insieme di elementi posti all'interno di una data area per effetto di un fenomeno franoso.

L'**esposizione al rischio** indica l'elemento che deve sopportare l'evento, esposto ad un determinato pericolo: numero di presenze umane, numero e tipologia del centro abitato, infrastrutture industriali e viarie, risorse naturali e culturali presenti. Nel caso di una costa rocciosa alta o una costa a falesia l'elemento a rischio è raramente rappresentato da un edificio costruito sul ciglio, più frequente è il caso di strutture viarie e ferroviarie interessate dai processi di arretramento. Il caso più comune è dato dalla esposizione di turisti e bagnanti che stazionano alla base delle pareti o in *pocket beach* comprese al piede di falesie, come di canoisti o diportisti alla fonda che frequentano le acque marine pericostiere.

Il **valore** è la quantificazione della stima economica di ciascun elemento a rischio: valore economico della vita umana, valore economico di edifici e infrastrutture, valore economico delle attività che insistono nell'area, valore economico dei beni ambientali e culturali.

Il **rischio** è una misura della probabilità e dell'entità delle conseguenze dei fenomeni franosi sulla salute, sulla proprietà e sull'ambiente. Il rischio è spesso ottenuto come prodotto della probabilità di accadimento di un fenomeno di assegnato volume per le conseguenze attese (Fell et al., 2008).

Alcune esperienze di zonazione della suscettività e della pericolosità da frana (Cascini et al., 2005; Fell et al., 2005; Fell, 2005; Cascini, 2008) evidenziano come i prodotti finali (la zonazione) presentino differenti livelli di accuratezza e di affidabilità. Inoltre la valutazione del rischio da frana richiede un approccio *multi-hazard*,

poiché a ciascuna tipologia di frana possono essere associate differenti caratteristiche, cause di innesco e probabilità spaziali, temporali e dimensionali (Corominas et al., 2014; Van Westen & Greiving, 2017).
Recenti sviluppi delle tecniche di acquisizione dei dati (*Remote Sensing*), delle metodologie di analisi e dei sistemi GIS, mettono a disposizione strumenti che rendono meno difficoltosa la zonazione del rischio in termini quantitativi (Corominas et al., 2014; Remondo et al., 2008).

La valutazione di area vasta della suscettività al dissesto, (e ove sarà possibile, della pericolosità e del rischio) per le coste rocciose alte potrebbe essere affrontata attraverso un approccio metodologico quali-quantitativo basato sulla sovrapposizione di cartografie e DTM tematici che sintetizzino valorizzandola la complessità del database acquisito (area emersa ed area marina). Tale approccio si svilupperebbe attraverso la identificazione e classificazione di parametri discriminanti, che rappresentano le condizioni necessarie ma non sufficienti per il verificarsi di una data tipologia di frana (ad es. l'unità geologica, l'assetto giaciturale, la pendenza) incrociandoli con fattori aggravanti, cioè i fattori di qualsiasi natura che concorrono, direttamente o indirettamente, per ogni tipo di movimento, ad aggravare le condizioni di instabilità gravitativa (ad esempio: presenza d fratture beanti, grado di alterazione, lubrificazione delle superfici di discontinuità, ecc.) valutati per ciascun tematismo (geologia, geomorfologia, idrogeologia, geomeccanica, uso del suolo ecc.). Il modello da sviluppare potrebbe trarre indicazioni sia da quanto elaborato dal CNR per Regione Calabria (Antronico et al., 2010) che dalla metodologia RES (*Rock Engineering System*) o dalla metodologia probabilistica (*Certainty factor*), descritte in seguito, opportunamente interpretate ed adattate alla fisiografia e alla dinamica evolutiva delle coste rocciose alte delle falesie.

4.2.2 Zonazione della suscettività da frana per le coste alte rocciose

La zonazione della suscettività da frana in ambito costiero oltre ai parametri ed agli elementi descritti e discussi nei capitoli precedenti, prevede la loro integrazione con l'ambiente marino e i dati climatici e ondametrici. In ambito mediterraneo (e non solo, ma diversamente da quanto avviene nell'Atlantico e nel Pacifico) il fenomeno dell'instabilità delle coste rocciose, ed il loro arretramento, è in genere caratterizzato da tassi molto bassi ma concentrati in episodi molto rapidi legati spesso ad eventi ad elevata energia durante i quali si generano movimenti di massa ingenti, molto superiori alla media e che proprio per la loro saltuarietà sono difficilmente osservabili e misurabili. Ne consegue che anche la loro prevedibilità è difficile, e con essa la corretta pianificazione di un territorio costiero roccioso. A questo si aggiunge la generale difficile accessibilità.
Il proposito è che, a seguito delle analisi a scala locale che verranno realizzate nei diversi siti pilota individuati in Sardegna, sia possibile trarre le caratteristiche più rappresentative per distinguere nelle coste la loro propensione al dissesto per frana. L'ipotesi di partenza, e i primi studi in parte la confermano, prevede di prendere in considerazione oltre ai fattori geologici in senso lato (pendenza della falesia, litologia, presenza di falde sotterranee, geometria della falesia sommersa, ecc.), anche quelli idrodinamici (l'esposizione al moto ondoso) e metereologici (verificarsi di precipitazioni intense in serie storiche, venti dominati, ecc.). Ma se ne esistono altri, e in che modo e con quale peso dovranno essere presi in considerazione, sarà oggetto dello studio previsto nella successiva fase di attuazione progettuale (component T3, vedi Formulario del Progetto MAREGOT), durante la quale ci si propone di validare diverse esperienze descritte in letteratura. Qui di seguito ne vengono riportate alcune delle più interessanti.

4.2.2.1 Metodo semi-quantitativo (Del Rio & Gracia, 2009)

Del Río & Gracia (2009) propongono un metodo semi-quantitativo per valutare il rischio di erosione della scogliera in ambienti di clima temperato, analizzando sia i principali fattori fisici di innesco che gli aspetti socioeconomici connessi all'erosione, che rappresentano rispettivamente il potenziale di perdita della

falesia (intesa come arretramento) e il danno potenziale. Il metodo è testato e convalidato utilizzando dati sui tassi di arretramento della scogliera e sui processi gravitativi nella costa della provincia di Cádiz (SW Spagna, Figura 16, Figura 17). L'approccio proposto dagli autori consente la zonizzazione delle falesie costiere in base al livello di rischio, pericolo e/o impatto, incluso il riconoscimento di aree critiche dove applicare strategie di intervento di mitigazione. Nel dettaglio gli autori propongono l'uso di una serie di fattori naturali integrati con altri antropici (quali uso del suolo, presenza di aree urbane e di aree naturali, densità di popolazione, ecc.). I fattori naturali sono quelli classici: litologia, struttura, pendenza, presenza e caratteristiche di spiagge a protezione della falesia o di piattaforme rocciose, variazione della marea, esposizione alle onde, variazione del moto ondoso in caso di tempesta, variazione del livello del mare, precipitazioni. Vengono considerati tra i fattori naturali anche alcuni a componente umana, come le strutture ingegneristiche di protezione localizzate ai piedi della falesia. I fattori vengono pesati in base al loro impatto sull'instabilità o l'erodibilità di una falesia. Importante notare che gli stessi autori suggeriscono che la loro scelta ed il loro peso siano adattati alle condizioni di applicazione; ad esempio è chiaro che il sistema di coste atlantiche dove il metodo è stato testato ha caratteristiche profondamente diverse da quelle mediterranee, se non altro per la variazione del livello del mare, dell'intervallo tidale e dell'energia del moto ondoso. L'impatto di questi elementi sulle coste dell'area mediterranea è sicuramente differente. Ne è un esempio la minore variazione tidale che favorisce una concentrazione dell'onda nel solco di battente sempre a quote simili e che quindi massimizza l'effetto erosivo dell'onda media. Diversamente, l'energia dell'onda in presenza di variazioni di marea più importanti viene dissipata su superfici più ampie.

Questo metodo va inteso come semi quantitativo in quanto sebbene presupponga una misurazione di alcuni parametri fisici a cui attribuire un diverso peso, nel lavoro presentato questo viene fatto in maniera arbitraria, con considerazioni derivate dall'esperienza degli autori, come tipico dei metodi euristici e qualitativi.

Nell'ambito degli studi di dettaglio previsti dal progetto in alcuni siti pilota, e in presenza di un inventario delle frane che interessano le coste rocciose, si ritiene di poter attribuire ai diversi fattori un peso misurato statisticamente, e di verificarne quindi l'attendibilità applicando questi dati in altre aree di cui esiste un inventario dei fenomeni franosi da usare come elemento di controllo.

4.2.2.2 Metodologia probabilistica (Certainty factor)

Il criterio di base di una metodologia statistica è che, in presenza di un inventario dei fenomeni franosi attuale e dettagliato e studiando i fattori che hanno un ruolo nel determinare l'instabilità di una falesia costiera, sia possibile individuare le aree con medesima propensione allo sviluppo di fenomeni di dissesto ancorché non se ne siano già verificati.

Il metodo illustrato di seguito è un metodo diretto, statistico di tipo probabilistico che, per la valutazione del contributo dei diversi parametri correlati all'instabilità, utilizza l'approccio del Certainty Factor (CF) ovvero "Fattore di Certezza" (Binaghi et al., 1998; Devokta et al., 2013; Pourghasemi et al., 2013). I dati utilizzati, localizzati arealmente tramite un *geodatabase*, permettono di verificare il CF che esprime la probabilità (in un intervallo di variazione che varia tra -1 e +1) che possa verificarsi una certa ipotesi (area suscettibile al franamento) relativamente alla presenza o assenza di evidenze note. Valori positivi del CF indicano una maggiore certezza dell'ipotesi fatta, mentre valori negativi determinano una diminuzione della certezza di eventualità di attivazione di una frana. Un valore del CF prossimo allo zero indica invece che non è possibile fornire un'indicazione circa la probabilità che si verifichi l'ipotesi fatta.

Figura 16 – Esempio di evoluzione storica del ciglio della falesia tra il 1956 e il 2005 e transetti di perpendicolari alla linea di costa lungo i quali sono state effettuate le misure.

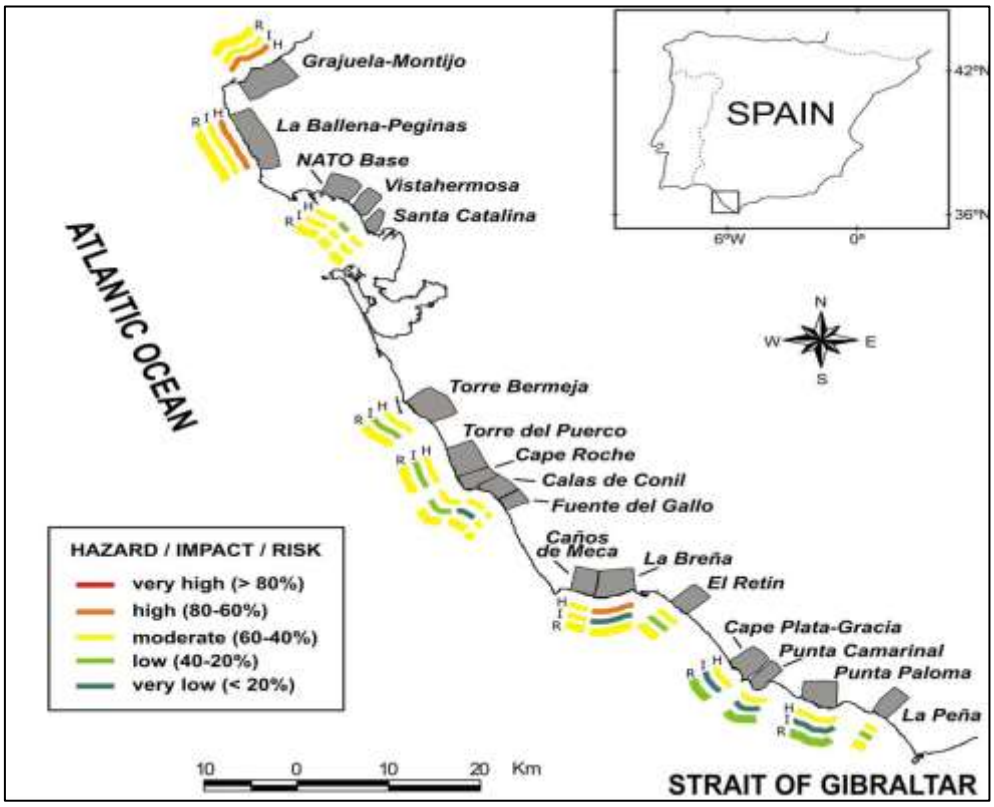


Figura 17 – Applicazione di un metodo semi-quantitativo per definire suscettività, pericolosità, impatto e rischio di un tratto di costa nella Spagna meridionale. Da Del Rio & Gracia, 2009.

I valori di CF si ottengono confrontando alcuni parametri spazializzati attraverso carte tematiche (per esempio esposizione della falesia al moto ondoso) con l'occorrenza di eventi franosi, desunti dalla carta inventario dei fenomeni franosi, secondo la seguente formula:

$$CF = \begin{cases} \dfrac{pp_a - pp_s}{pp_a(1 - pp_s)} & \text{se } pp_a \geq pp_s \\ \\ \dfrac{pp_a - pp_s}{pp_s(1 - pp_a)} & \text{se } pp_a < pp_s \end{cases}$$

Il valore pp_a viene calcolato come il rapporto tra l'area in frana appartenente ad una determinata classe e l'area totale di quella classe (es.: frane/esposizione della falesia al moto ondoso). Il valore pp_s è il rapporto tra la superficie delle aree in frana e la superficie dell'intera area di studio.
Pertanto i valori di probabilità vengono calcolati utilizzando i parametri:
1. Area in studio
2. Area totale in frana nell'area in studio (deriva dai poligoni delle frane censite)
3. Area totale di ogni determinata classe per ogni tematismo (es.: esposizione della falesia al moto ondoso dominante)
4. Area interessata da frana di ogni classe per singolo tematismo (es.: frana)
I valori numerici utilizzati sono misurati come numero di *pixel*.
Il Fattore di Certezza viene calcolato per ogni *data lay*er ritenuto indicatore di instabilità, quindi si procede con la combinazione a due a due dei *layers*, per mezzo di successive regole di integrazione (Chung e Fabbri, 1993):

$$z = \begin{cases} x + y - xy & \text{se } x, y \geq 0 \\ \dfrac{x + y}{1 - \min(|x|, |y|)} & \text{se } x, y \text{ sono di segno diverso} \\ x + y + xy & \text{se } x, y < 0 \end{cases}$$

in cui x e y sono i CF relativi a due *layer* differenti e z è la loro combinazione, ossia il CF risultante. L'integrazione fra CF avviene applicando le regole precedenti in maniera iterata sui tematismi considerati: il risultato della prima integrazione fra i primi due tematismi sarà combinato con il terzo tematismo, fornendo un risultato che andrà combinato con il quarto e così via fino ad esaurire i *data layer*.
L'approccio metodologico proposto inoltre può prevedere una differenziazione specifica relativa alla tipologia di frana, per cui possono essere considerati indicatori di instabilità differenti a seconda delle differenti tipologie di frana.
I valori di CF calcolati sono infine da riclassificare in classi di instabilità potenziale ovvero di probabilità che si verifichi un fenomeno franoso, in questo caso diventa fondamentale poter costruire una frequenza dei fenomeni.

4.2.2.3 Metodologia RES (Rock Engineering System)

Il RES è una metodologia sviluppata da Hudson (Hudson, 1992) allo scopo di affrontare i problemi di meccanica delle rocce secondo una prospettiva sistemica. Questa metodologia di analisi può essere molto utile per affrontare in maniera speditiva le aree che presentano diffusi processi di dissesto. Punto di forza del RES è la sua versatilità; è ben noto che, pur nell'ambito delle stesse leggi generali, i sistemi naturali hanno risposte diverse in funzione del luogo e del tempo. Il RES presenta, pur nell'ambito di uno schema

generale stabilito in base al tipo di problema da affrontare, i parametri e le interazioni che possono essere adattati di volta in volta al contesto e agli obiettivi dello studio/progetto; analogamente potrà variare il grado di dettaglio col quale si potrà caratterizzare il sistema, i suoi elementi e le sue interazioni. Per gestire un modello sistemico è necessario considerare contemporaneamente gli elementi e le interazioni che lo compongono attraverso l'utilizzo di uno strumento. Nella metodologia RES questo strumento è rappresentato dalla matrice delle interazioni. Il principio fondamentale della matrice delle interazioni consiste nell'elencare i principali parametri lungo la diagonale principale e considerare le interazioni nelle celle non diagonali. I termini della diagonale principale possono essere soggetti o concetti: essi non devono necessariamente avere valori quantitativi, sebbene ci siano dei vantaggi nell'assicurare che siano tutti della stessa qualità, ad esempio misurabili con la stessa unità. Riguardo alle interazioni, ci sono diversi modi di presentare le informazioni: una cella di interazione può contenere un'analisi più dettagliata del meccanismo o, in alternativa si può tentare di rappresentare la significatività del meccanismo attraverso una certa forma di codifica. La matrice è, in generale, asimmetrica; l'asimmetria è associata al fatto che l'interazione dipende dal percorso seguito. In generale si può studiare un fenomeno con il grado di dettaglio compatibile con i mezzi e gli obiettivi imposti. Per ciò che riguarda la matrice delle interazioni, un maggiore grado di dettaglio significa anche un maggior numero di parametri e relazioni da considerare. Nella matrice delle interazioni, usare una maggiore risoluzione significa poter riconoscere relazioni di causa effetto più elementari; viceversa utilizzare una risoluzione grossolana significa aggregare in un parametro o in una interazione più parametri o meccanismi elementari; il concetto di risoluzione è collegato anche alle celle non diagonali ed alla densità che esse conferiscono alla matrice.

Trattandosi, nel caso generale, di un problema nuovo per il quale non si dispone di un modello pronto, il modello di riferimento va costruito sulla base delle conoscenze specifiche disponibili. Il procedimento per l'applicazione della metodologia RES è articolato in due fasi: una prima analitica (l'ingresso nel sistema) ed una successiva sintetica (l'uscita dal sistema). Nella prima fase, definiti gli obiettivi, si scompone il sistema nelle sue singole parti, cioè gli elementi e le interazioni, allo scopo di definirle ed esaminarle.

Lo schema generale è il seguente:

1) Definizione degli obbiettivi: essendo la metodologia basata sull'obiettivo, la sua definizione deve essere eseguita per prima; questa fase può condizionare la linearità dell'analisi stessa.

2) Analisi del sistema: in questa fase vengono stabiliti i parametri che sono coinvolti nel funzionamento del sistema; non esiste una regola assoluta per scegliere con quali e quanti parametri costruire in modello; in base agli obiettivi, l'operatore dovrebbe scartare i parametri meno significativi e scegliere i parametri e le relazioni più rappresentativi e/o complessi da approfondire.

3) Analisi dei meccanismi interattivi: si tratta di raccogliere le informazioni disponibili per la caratterizzazione delle interazioni tra tutti i parametri scelti, appurando quali sono significativi e quali non lo sono in virtù degli obiettivi, dei mezzi a disposizione e quindi del grado di dettaglio prescelto. Il prodotto di questa fase è una matrice molto dettagliata ed aderente al problema oggetto di studio.

Gli ultimi due passi della fase analitica vengono attuati attingendo alla letteratura disponibile e attraverso la raccolta di dati *in situ*. Una volta conclusa la fase analitica si ha la base di conoscenze necessaria per "sintetizzare" il problema. Si entra così nella fase di sintesi, articolata anch'essa in tre stadi:

1) Strutturazione delle conoscenze acquisite: la fase sintetica comincia con la riorganizzazione delle conoscenze accumulate in una struttura funzionale agli obiettivi ed ai mezzi disponibili per la misurazione dei parametri e dei fenomeni. Tutto ciò può implicare una ricompattazione della matrice dettagliata a cui si è giunti come risultato del terzo passo della fase analitica.

2) Comprensione del funzionamento del modello: in questo passo si ha la possibilità di approfondire la comprensione iniziata con il secondo passo interpretando (ai nostri fini) il funzionamento del sistema così

come è stato da noi strutturato, con il grado di dettaglio concesso dai vincoli imposti (tempo, risorse, strumenti). L'interpretazione del modello passa attraverso la codifica della matrice delle interazioni.

3) Stabilire i metodi e le procedure da adottare: come risultato della fase di sintesi si dispone della conoscenza completa del sistema, perciò si può passare a decidere ed implementare le azioni che sarà necessario intraprendere per ottenere gli obiettivi prefissati. Si potrà trattare di metodi, di dati da raccogliere o algoritmi di calcolo.

Una volta costruita la matrice delle interazioni, vi sono diversi metodi per la loro codifica numerica. I più utilizzati sono i metodi semi-quantitativi a giudizio esperto (ESQ, Hudson, 1992). Attraverso tale codifica, per ciascun parametro P rappresentato nella diagonale della matrice, potrà essere valutata l'influenza che tale parametro ha su tutti gli altri (cause) e l'influenza che tutti gli altri hanno su di esso (effetti). Il valore numerico di causa ed effetto per ciascun parametro viene plottato su un diagramma C-E dal quale potrà essere stabilita l'importanza di ciascun parametro nel sistema considerato (Figura 18) ed assegnato quindi un punteggio alle classi dei valori determinati per quel dato parametro.

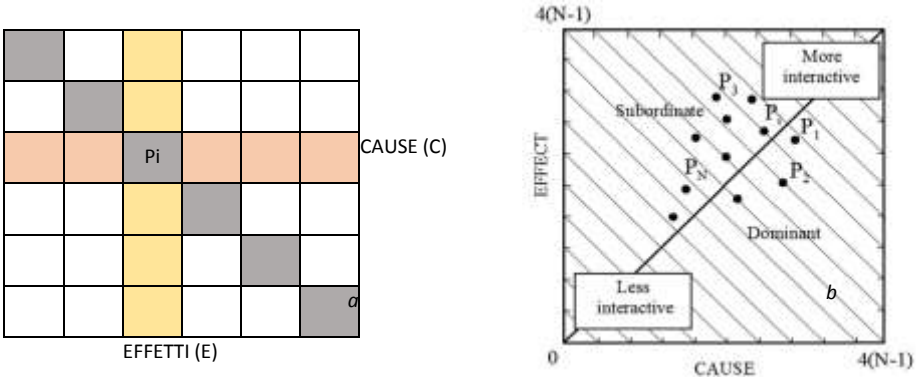


Figura 18 - Matrice delle interazioni (a); la somma dei valori nelle righe e nelle colonne passanti per ciascun parametro definiscono le coordinate dei punti causa-effetto per ciascun parametro (b) (da Hudson, 1992, modificato).

4.2.2.3.1 Calcolo Indice RMII

La metodologia RES vien utilizzata per determinare l'indice di instabilità Rock Mass Instability Index (RMII), che fornisce un'indicazione sul livello di instabilità potenziale dei versanti (Mazzoccola, 1992; Mazzoccola & Hudson, 1996); quanto maggiore risulterà questo indice tanto più i versanti saranno instabili. L'indice RMII , per un versante j, è dato dalla sommatoria:

$$\mathrm{RMII}_j = \sum_{0}^{n} a_i P_{ji}$$

dove:

- a_i rappresenta il contributo di C+E di ciascun parametro sul totale dei contributi di C+E ($a_i = \frac{C_i+E_i}{\sum_i C_i+\sum_i E_i}$)
- P_{ji} è il punteggio assegnato alle diverse classi di valori del parametro (differente per ciascun versante j) attraverso la procedura di codifica delle cause e degli effetti.

I valori di suscettibilità ottenuti, possono essere classificati, per una maggiore leggibilità, in livelli che individuando le aree a bassa, media ed alta suscettibilità. Il coefficiente ha lo scopo di pesare il valore del parametro attraverso l'importanza del complesso delle sue interazioni con il resto del sistema. Questo indice rappresenta la sintesi più efficace del ruolo del parametro all'interno del sistema. In base ad esso si può operare una classifica di parametri, che costituisce un ulteriore modo di interpretare il sistema.

4.2.2.4 Metodo basato su rilievi geologico-strutturali indiretti (De Vita et al., 2012)

Sulla base dei risultati di rilievi geologico-strutturali indiretti o di "non-contatto", De Vita et al. (2012) hanno sviluppato una metodologia per la valutazione di dettaglio della suscettività al dissesto in settori di costa alta rocciosa parzialmente urbanizzati. Gli autori hanno applicato tale metodologia in Liguria, all'interno del Golfo del Tigullio (Mar Tirreno Nord-settentrionale), lungo un tratto di costa alta esteso circa 6 km.

Il metodo è stato sviluppato allo scopo di fornire informazioni utili alla pianificazione territoriale, soprattutto per aree costiere caratterizzate da scarsa accessibilità. Come noto nel panorama scientifico, nei casi di coste alte rocciose le caratteristiche geologico-strutturali sono solitamente ben esposte ma non facilmente misurabili a causa della non facile accessibilità dei siti. In tali contesti geomorfologici, la fotogrammetria digitale terrestre può essere considerata un utile tecnica di *remote sensing* per la caratterizzazione e mappatura dei sistemi di discontinuità (Crosta, 1997).

La metodologia proposta da De Vita et al. (2012) può essere classificata come avanzata (Fell et al., 2008) per via della scala di dettaglio a cui viene restituita la mappatura della propensione al dissesto (i.e., scala 1:5000) e si basa sui seguenti step operativi (Figura 19): i) rilievo fotogrammetrico continuo da mare del tratto di costa, ii) analisi geologica e geomorfologica delle stereo-coppie di immagini fotografiche, iii) analisi geologico-strutturale alla meso- e macro-scala dei fronti rocciosi al fine di individuare aree omogenee dal punto di vita geologico-strutturale, iv) stima della giacitura delle discontinuità mediante tecniche di rilevo di non contatto utilizzando tavole rigide orientate e di bussola, v) analisi cinematica di stabilità dei tratti di costa alta mediante test di Matheson (1983); vi) implementazione di un modello di suscettività al dissesto in ambiente GIS utilizzando i dati relativi alle geometrie del versante (acclività e orientazione) e alle giaciture delle discontinuità. A causa delle particolari caratteristiche morfologiche dell'area di studio e della sua estensione, per validare la stima della giacitura delle discontinuità effettuata mediante tecniche indirette su immagini da rilievo fotogrammetrico e, quindi verificarne il grado di soggettività, gli autori effettuarono il confronto con i risultati di rilievi geomeccanici in sito effettuati in corrispondenza di fronti rocciosi campione.

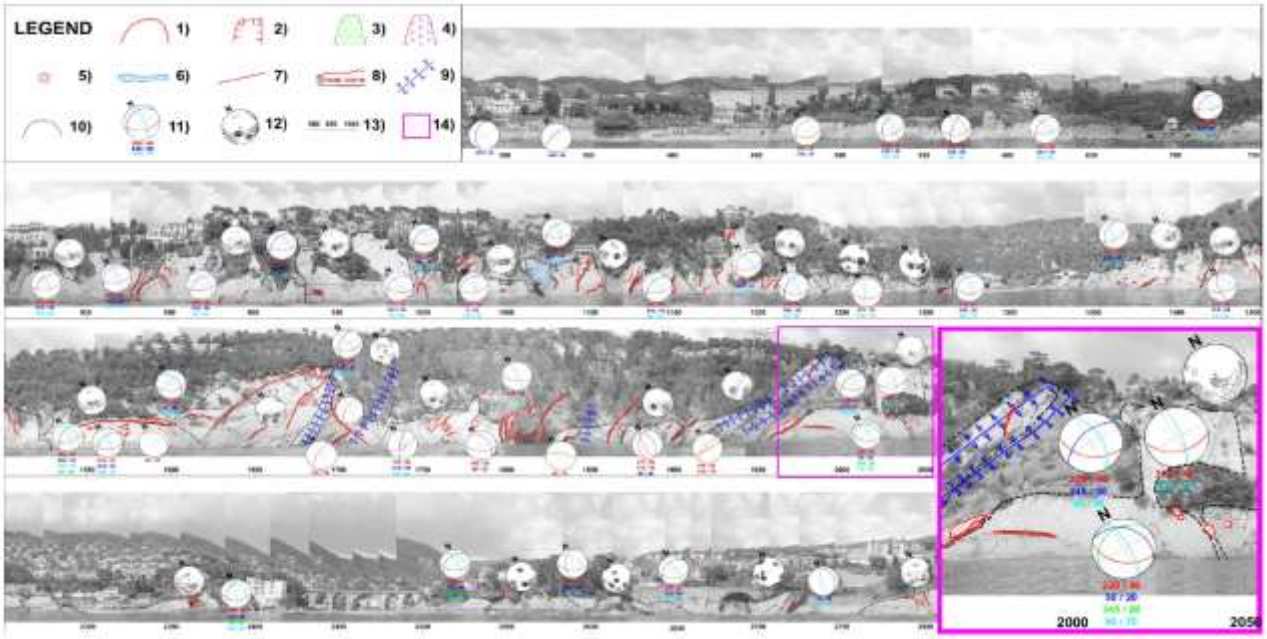


Figura 19 –Mosaico fotografico che illustra l'applicazione del metodo basato su rilievi geologico-strutturali indiretti, proposto da De Vita et al. (2012). Legenda: (1) nicchie di distacco di frane di crollo; (2) nicchie di frana semplice; (3) depositi di crollo; (4) depositi di frana; (5) blocchi di roccia instabili; (6) interventi di mitigazione della pericolosità da frana; (7) faglie; (8) zone di taglio e scorrimento; (9) asse di piega; (10) stazione di rilevamento geomeccanico; (11) orientazione delle discontinuità; (12) diagramma di densità delle discontinuità; (13) scalimetro; (14) ingrandimento (da De Vita et al., 2012)

5 PROPOSTA DEL PROTOCOLLO D'INDAGINE

Allo stato attuale delle attività possiamo anticipare un modello di indagine che dovrà essere validato durante la restante parte del progetto, applicandolo ai diversi casi studio rappresentati dai siti pilota scelti. Il percorso immaginato è per ora sintetizzato in un diagramma di flusso che mette in ordine e in sequenza una serie di indagini con collegati i prodotti scientifici attesi (Tabella 5.1). Questo protocollo, ancora generico nel dettaglio dei contenuti, è quello che si intende applicare dalla scala del sito, quindi del tratto di costa scelto, fino alla scala estremamente locale (puntuale) del versante instabile.
Dagli esiti di questo studio sarà anche possibile rilevare quali grandezze, parametri o indicatori possono essere rilevanti anche per una zonazione della suscettività al rischio di frana alla scala regionale, da applicare seguendo uno dei modelli (empirici, euristici o statistici) indicati nel capitolo precedente.

Tabella 5.1 – Sintesi delle indagini e dei prodotti tecnici da realizzare per l'indagine alla scala locale dei ratti di costa che presentano una propensione allo sviluppo di fenomeni franosi

Caratteristiche	Tipologia d'indagine	Prodotto atteso
Dati Esistenti	Analisi ed integrazione dei dati esistenti	Geodatabase e modelli cartografici
Morfologiche	*Remote Sensing*, Rilievi Batimetrici,	DTM parte emersa e morfologia parte sommersa.
Analisi mutitemporale	Analisi delle foto aeree	Modello della variazione storica della linea di costa
Geologico-Strutturali	Rilievi di campo, *Remote Sensing*, Fotoanalisi	Modello Geologico Strutturale
Geomorfologiche	Rilievi di campo, Remote Sensing, Fotoanalisi, Rilievi in immersione	Modello Geomorfologico Inventario locale dei fenomeni franosi
Geomeccaniche	Rilievi sul campo, *Remote Sensing*, Fotoanalisi, Analisi *in situ* e di laboratorio	Caratterizzazione Geomeccanica, Ricostruzione 3D dell'ammasso roccioso (Modello Geomeccanico)
Geotecniche	Analisi *in situ* e di laboratorio,	Modello Geotecnico
Idrogeologiche	Rilievi di campo, *Remote Sensing*,	Modello Idrogeologico
Climatiche	Analisi pluviometriche delle serie storiche	Soglie Pluviometriche
Moto Ondoso	Misure dirette e indirette	Caratterizzazione energetica del moto ondoso

5.1 PROPOSTA DI PROTOCOLLO D'INDAGINE ALLA SCALA LOCALE

In sintesi, l'approccio allo studio alla scala locale dell'area di studio (in questa fase del progetto coincidente con i siti pilota) si articola in diverse fasi illustrate come in Figura 20 e brevemente descritte di seguito.

1 – Stato dell'arte

Il primo stadio d'intervento è l'integrazione di tutte le informazioni provenienti dagli studi precedenti, in particolare gli strumenti di gestione e pianificazione, quali IFFI, PAI e PAC (nel caso della Sardegna), le cartografie geologiche, geomorfologiche ecc. disponibili. Questo fornirà un quadro di riferimento da utilizzare per la progettazione delle indagini alla scala locale. In particolare, tutte le informazioni vanno riportate in un *geodatabase* in modo da poterle mettere in relazione, anche attraverso modelli cartografici georiferiti che permettano la valutazione relativa delle diverse caratteristiche. Lo stesso *geodatabase* avrà un'architettura tale (vedi capitolo 3) da poter essere implementato e popolato anche con i nuovi dati prodotti durante le fasi di indagine successive. I prodotti attesi da questa fase preliminare saranno quindi:

- un archivio dati dinamico che permette di mettere in relazione i diversi dati, ad esempio tra la presenza di faglie e campi di frattura ed emergenze idrogeologiche o tra sorgenti e corpi di frana, ecc.;

- modelli cartografici, anche in rappresentazioni 3D derivanti direttamente dall'archivio dati.

Questa fase è importante perché determina in parte il tipo di indagini ex-novo che dovranno essere eseguite. Ad esempio, la presenza di possibili acquiferi poroso invece che fessurati può influenzare il tipo di indagine idrogeologica da eseguire al passo 4.

2 - Acquisizione modelli topografici

Realizzazione, o acquisizione se già disponibili, dei modelli topografici della parte emersa e della parte sommersa.

3 - Modello del moto ondoso e modello climatico

Secondo le modalità indicate, questa caratterizzazione è funzionale a comprendere i meccanismi che possono innescare le instabilità che vengono rilevate nel passo 4 ed approfondite nel passo 6 e contribuiscono alla definizione del modello di instabilità al passo 7. Inoltre, diventano utili anche per l'ipotesi di monitoraggio.

4– Rilevamenti per la caratterizzazione geologica, geomorfologica e idrogeologica.

Realizzazione delle cartografie tematiche della parte emersa e della parte sommersa secondo le modalità descritte nel capitolo 2. I prodotti attesi sono dei modelli in genere tridimensionali, che racchiudono i dati più importanti della parte emersa e di quella sommersa. L'uso delle tecniche di analisi fotogrammetrica digitale alla scala adeguata è funzionale per una rapida caratterizzazione geomeccanica dell'intero tratto di costa indagato. L'accuratezza del metodo sarà valutata e validata attraverso misure *in situ.*

In questa fase viene anche realizzato un inventario delle frane aggiornato, possibilmente con caratteristiche che lo rendano coerente con i catasti frane regionali e/o nazionali.

5 - Analisi multitemporale

Sulla base dei rilevamenti eseguiti nel passo 4 può essere realizzata un'analisi delle immagini e cartografie storiche per determinare la variazione del tratto di costa e la frequenza degli eventi di instabilità. Questa analisi è importante per la definizione della pericolosità delle aree studiate.

6– Studio di dettaglio dei versanti instabili

Sulla base dei modelli cartografici realizzati vengono individuati i siti instabili e quindi viene svolto un approfondimento dello studio con una caratterizzazione geologico- geomorfologica di dettaglio, caratterizzazione geomeccanica e geotecnica del versante, e viene rilevato in dettaglio anche il corpo di frana. Le tecniche di analisi fotogrammetrica digitale vengono applicate anche in questa fase, con un maggiore dettaglio per una efficace caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso indagato. In questa fase potrebbero anche essere misurati i volumi di sedimenti che sono riversati in mare, in modo da evidenziare la propensione al contributo sedimentario dei tratti di costa alta rocciosa indagati. Dati che potranno essere utili ai modelli sedimentari di alimentazione dei corpi sabbiosi litoranei. In questa fase vengono prodotte le analisi di instabilità.

7 - Modello di instabilità

Integrando le conoscenze generali del tratto di costa indagato (passo 4) del moto ondoso (passo 3), la caratterizzazione di dettaglio (passo 5) e l'analisi dettagliata del sito (passo 6) è possibile definire un modello dell'instabilità, dove si evidenziano quali sono i processi che inducono i fenomeni franosi, definiscono una zonazione locale della pericolosità,

8 - Ipotesi d'intervento

Sulla base del modello al passo 7 e degli studi al passo 6 possono essere proposti gli interventi di messa in sicurezza, stabilizzazione ecc.

9– Ipotesi di monitoraggio

Il modello d'instabilità al passo 7, che integra anche i dati climatici e idrodinamici del passo 3 permette di verificare quali siano i parametri e/o le grandezze che possono essere monitorate al fine della previsione degli eventi e riduzione del rischio.

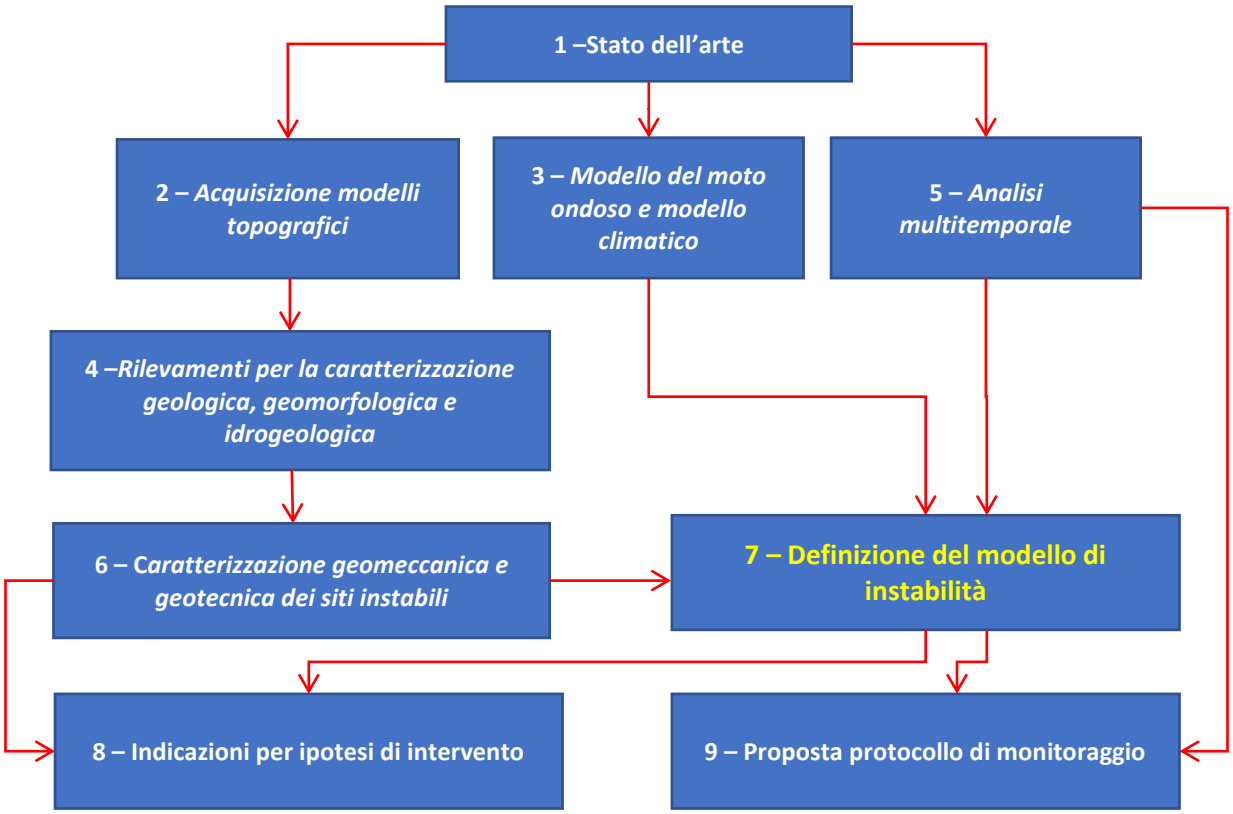


Figura 20 – Ipotesi di protocollo d'indagine alla scala locale (quella del sito pilota)

6 BIBLIOGRAFIA

Andriani GF, Walsh N (2007). Rocky coast geomorphology and erosional processes: a case study along the Murgia coastline south of Bari, Apulia- SE Italy. Geomorphology 87(3):224–238.

Antronico, L., Borrelli, L., Gullà, G., & Sorriso-Valvo, M. (2010). La frana di Maierato (Calabria, Italia meridionale) del febbraio 2010: caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione. GEAM GEoingegneria Ambientale e Mineraria, 2, 15-26.

APAT, Università degli Studi Roma Tre. (2005). Atlante delle onde nei mari italiani.

Atzeni, A., (2011). Dispense di idraulica marittima. Aracne Editrice, 400 p.

Binaghi, E., Luzi, L., Madella, P., Pergalani, F., & Rampini, A. (1998). Slope instability zonation: a comparison between certainty factor and fuzzy Dempster–Shafer approaches. Natural hazards, 17(1), 77-97.

Bray, M.J., Hooke, J.M., (1997) - Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. Journal of Coastal Research 13, 453–467.

Budetta, P., G. Galietta, and A. Santo (2000). "A methodology for the study of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses." Engineering Geology 56.3-4: 243-256.

Budetta P, Nappi M (2011). Heterogeneous rock mass classification by means of the geological strength index: The San Mauro formation (Cilento, Italy). Bull Eng Geol Environ 70:585–593. doi:10.1007/ s10064-011-0351-1

Budetta, P., & De Luca C. (2015). "Wedge failure hazard assessment by means of a probabilistic approach for an unstable sea-cliff." Natural Hazards 76.2 (2015): 1219-1239.

Budetta, P., C. De Luca, & M. Nappi. (2016). "Quantitative rockfall risk assessment for an important road by means of the rockfall risk management (RO. MA.) method." Bulletin of Engineering Geology and the Environment 75.4 (2016): 1377-1397.

Bukata, R.P., Jerome, J.H., Kondratyev, K.Y., Pozdnyakov, D.V., 1995. Optical properties and remote sensing of inland and coastal waters. CRC Press, Boca Raton.

Buttau C., Fanelli F., Funedda A., Ibba A., Loi A., & Pillola G.L. 2011. Evidence of Quaternary tectonics in SW Sardinia. Rendiconti online Soc. Geol. It., Vol. 15 (2011), pp. 11-13.

Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska annaler: series A, physical geography, 62(1-2), 23-27.

Cancelli, A., & Nova, R. (1985, August). Landslides in soil debris cover triggered by rainstorms in Valtellina (Central Alps-Italy). In Proceedings of the 4th international conference and field workshop on landslides, The Japan Geological Society, Tokyo (pp. 267-272).

Cannon, S. H. and Ellen, S.: (1985) -Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California, California Geology, 38(12), 267–272,.

Carobene L., 1972. Osservazioni sui solchi di battente attuali ed antichi nel golfo di Orosei in Sardegna. Italian Journal of Geosciences (1972) 91 (3): 583-601.

Cascini L, Bonnard Ch, Corominas J, Jibson R, Montero-Olarte J, (2005). Landslide hazard and risk zoning for urban planning and development—state of the art report. In: Hungr O, Fell R, Couture R, Eberhardt E (eds) Landslide risk management. A.A. Balkema, Amsterdam, pp 199–235.

Cascini L (2008). Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. Eng Geol 102:164–177.

Castedo, R., Murphy, W., Lawrence, J., & Paredes, C. (2012). A new process–response coastal recession model of soft rock cliffs. Geomorphology, 177, 128-143.

Castedo R, Ferna´ndez M, Trenhaile AS, Paredes C, (2013). Modeling cyclic recession of cohesive clay coasts: effects of wave erosion and bluff stability. Marine Geol 335:162–176. doi: 10.1016/j.margeo. 2012.11.001

Castedo, R., Paredes, C., de la Vega-Panizo, R., & Santos, A. P. (2017). The Modelling of Coastal Cliffs and Future Trends. In Hydro-Geomorphology-Models and Trends. InTech.

Chelli A., Pappalardo M., Arozarena Liopis I., Federici P.R. 2010. The relative influence of lithology and weathering in shaping shore platforms along the coastline of the Gulf of La Spezia (NW Italy) as revealed by rock strength. Geomorphology 118 (2010) 93–104.

Chiappone, A. & Scavia C. (1999) -"La prova al blu di metilene nella caratterizzazione geotecnica: un'applicazione allo studio della stabilità dei versanti." Rivista italiana di geotecnica 4: 36-51.

Civita M. (2005) - Idrogeologia applicata e ambientale. CEA.

Colantoni P., Mencucci D., Nesci O.; (2004) - Coastal processes and cliff recession between Gabicce and Pesaro (northern Adriatic Sea): a case history Geomorphology, 62, pp. 257-268

Collins, B.D., Sitar, N., (2008) - Processes of coastal bluff erosion in weakly lithified sands, Pacifica, California, USA. Geomorphology 97, 483–501.

Corominas, J., et al. (2014). "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk." Bulletin of engineering geology and the environment 73.2: 209-263.

Crosta, G. (1997). Evaluating Rock Mass Geometry From Photographic Images, Rock Mech. Rock Eng., 30, 35–58

Crosta, G. (1998). Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation. Environmental Geology, 35(2-3), 131-145.

Crosta, G. B., & Frattini, P. (2003). Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. Natural Hazards and Earth System Science, 3(1/2), 81-93.

Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2003). Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. Canadian Geotechnical Journal, 40(1), 176-191.

Crozier, M. J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. Earth surface processes and landforms, 24(9), 825-833.

De Blasio F.V. & Mazzanti P. (2010) - Subaerial and subaqueous dynamics of coastal rockfalls. Geomorphology, 115: 188-193.

De Vita P., Cevasco A., Cavallo C. (2012). Detailed rock-failure susceptibility mapping in steep rocky coasts by means of non-contact geostructural surveys: the case study of the Tigullio Gulf (Eastern Liguria, Northern Italy). Natural Hazards and Earth System Sciences, 12, 867–880, 2012. www.nat-hazards-earth-syst- sci.net/12/867/2012/.

Del Río, L., Gracia, F.J., (2009) - Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. Geomorphology 112, 82–95.

Dessena, A., & Melis, M. T. (2006). Telerilevamento applicato.

Devkota, K. C., Regmi, A. D., Pourghasemi, H. R., Yoshida, K., Pradhan, B., Ryu, I. C., ... & Althuwaynee, O. F. (2013). Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya. Natural hazards, 65(1), 135-165.

Doneus, M., Briese, C., 2011. Airborne Laser Scanning in Forested Areas - Potential and Limitations of an Archaeological Prospection Technique. In: Cowley, D. (Ed.), Remote Sensing for Archaeological Heritage Management. Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, 25-27 March 2010. Archaeolingua; EAC, Budapest, pp. 53–76.

Dramis F. & Bisci C. (1998) – Cartografia Geomorfologica. Pitagora Ed., Bologna, 215 pp.

Fairbridge, F.W., 1968. The Ecyclopedia of Geomorphology, voll.2. Fairbridge F.W.(Ed.), Dowden, Hutchinson &Ross, Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, pp 1295.

Fall, M., R. Azzam, and C. Noubactep. "A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping." Engineering geology 82.4 (2006): 241-263.

Fell R, Corominas J, Bonnard Ch, Cascini L, Leroi E, Savage WZ (on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes) (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Eng Geol 102:85–98.

Fell, E. L. C. B. R. (2005). Risk assessment and management. In Landslide risk management (pp. 163-202). CRC Press.

Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., Leroi, E., (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), Landslide Risk Management. Taylor and Francis, London, pp. 3–26.

Fellenius, W., (1936) - Calculations of the stability of earth dams. Transaction of the 2nd Congress on Large Dams, 4. Washington, D.C.

Francioni, M., et al. (2014). "A case study integrating remote sensing and distinct element analysis to quarry slope stability assessment in the Monte Altissimo area, Italy." Engineering Geology 183 (2014): 290-302.

Furlani, S., Cucchi, F., Odorico, R., 2010. A new method to study microtopographical changes in the intertidal zone: one year of TMEM measurements on a limestone removable rock slab (RRS). Z. Geolorphol. 54 (Suppl. 2), 137e151.

Furlani S., Cucchi F., Biolchi S., Odorico R. 2011. Notches in the Northern Adriatic Sea: Genesis and development. Quaternary International 232 (2011) 158e168

Garzia G. (2007). L'erosione costiera e gli interventi di ripascimento del litorale: il quadro giuridico attuale e le prospettive di riforma. Federalismi.it, Rivista di diritto pubblico, italiano comunitario e comparato.

Glade, T., Crozier, M., & Smith, P. (2000). Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". Pure and Applied Geophysics, 157(6-8), 1059-1079.

Group, T. W. (1988). The WAM model—A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 18(12), 1775-1810.

Gupta, A. S., & Rao, K. S. (2000). Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state. Engineering Geology, 56(3-4), 257-274.

Gurocak, Z., & Kilic, R. (2005). Effect of weathering on the geomechanical properties of the Miocene basalts in Malatya, Eastern Turkey. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 64(4), 373-381.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and atmospheric physics, 98(3-4), 239-267.

Hall AM, Hansom JD, Jarvis J (2008). Patterns and rates of erosion produced by high energy wave processes on hard rock headlands: the Grind of the Navir, Shetland, Scotland. Mar Geol 248:28–46. doi:10.1016/ j.margeo.2007.10.007

Hervás, Javier, et al. (2003). "Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy." Geomorphology 54.1-2: 63-75.

Hudson J.A. (1992). Rock Engineering Systems: Theory and Practice. New York, Ellis Horwood.

Izaguirre, C., Méndez, F.J., Menéndez, M. and Losada, I.J., (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data, Geophys. Res. Lett., 38 (10), 10.1029/2011GL047302.

Kelletat, D., 1997. Mediterranean coastal biogeomorphology: processes form and sea-level indicators. In: Briand, F., Maldonado, A. (Eds.), Transformations and Evolution of Mediterranean Coastline: Monaco: Bull. Inst. of Oceanography, special, 18, pp. 209–226.

Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T., & Matsukura, Y. (2006). Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. Geomorphology, 80(3-4), 236-244.

Laborel, J., Morhange, C., Collina-Girard, J., Laborel-Deguen, F., 1999. Littoral bioerosion, a tool for the study of sea-level variations during the Holocene. Bulletin. Geological Society of Denmark 45, 164–168.

Lajoie, K.R., Mathieson, S.A., (1998) - 1982-83 El Niño Coastal Erosion, San Mateo County. U.S. Geologic Survey Open-File Report 98-041, CA. 61pp.

Lee, E.M. & Clark, A.R., 2002. Investigation and management of soft rock cliffs. DEFRA, Thomas Telford, London.

Lim, M., Rosser, N. J., Allison, R. J., & Petley, D. N. (2010). Erosional processes in the hard rock coastal cliffs at Staithes, North Yorkshire. Geomorphology, 114(1-2), 12-21.

Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., & Catani, F. (2012). Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale. Landslides, 9(4), 485-495.

Martino, S., and P. Mazzanti. "Integrating geomechanical surveys and remote sensing for sea cliff slope stability analysis: the Mt. Pucci case study (Italy)." Natural Hazards and Earth System Sciences 14.4 (2014): 831.

Marques, F. M. S. F., Matildes, R., & Redweik, P. (2013). Sea cliff instability susceptibility at regional scale: a statistically based assessment in the southern Algarve, Portugal. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13(12), 3185.

Matheson, G. D. (1983). Rock stability assessment in preliminary site investigations: graphical methods. Laboratory report 1039 of Transport and Road Research Laboratory, Berkshire, UK, 30 pp.

Mazzanti, P., Bozzano, F., Brunetti, A., Esposito, C., Martino, S., Prestininzi, A., ... & Mugnozza, G. S. (2015). Terrestrial SAR Interferometry monitoring of natural slopes and man-made structures. In Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5 (pp. 189-194). Springer, Cham.

Mazzoccola D., Hudson J. A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability, The Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, pp. 37 – 56.

Mazzoccola D.F. (1992). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating slope instability – Dep. of Mineral Resources Engineering, Univ. London.

Medatlas Group. (2004). Wind and Wave Atlas of the Mediterranean Sea. Western European Union, 420p.

Mitchell, T., Suarez, G. and Hogan P., (2010) - Integrated Remote Sensing of Bathymetry and Onshore Topography for Asset Inspection, Hydrology Modelling and Hazard Assessment", Remote Sensing and Hydrology. Proceedings and International Association of Hydrological Sciences Red Book.

Montgomery, D. R., & Dietrich, W. E. (1994). A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. Water resources research, 30(4), 1153-1171.

Montebello, C. (2004). La gestione integrata e sostenibile delle zone costiere nel diritto internazionale. Rivista di diritto dell‟ economia, dei trasporti e dell'ambiente.

Moser, M., & Hohensinn, F. (1983). Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. Engineering Geology, 19(3), 185-211.

Naylor LA, Stephenson WJ (2010). On the role of discontinuities in mediating shore platform erosion. Geomorphology 114:89–100. doi:10.1016/j.geomorph.2008.12.024

Orrù P. & Ulzega A. 1986. Geomorfologia costiera e sottomarina della baia di Funtanamare (Sardegna sud-occidentale) - Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria. Vol. 9, 59/67.

Pappalardo M., Cappietti L., Arozarena Llopis I., Chelli A. & De Fabritiis L., 2017. Development of Shore Platforms along the NW Coast of Italy: The Role of Wind Waves. Journal of Coastal Research: Volume 33, Issue 5: 1102-1112.

Paronuzzi P (2010). Flexural failure phenomena affecting continental Pleistocene deposits along coastal cliffs (Croatia). Ital J Eng Geol Environ 1:93–106. doi:10.4408/IJEGE.2010-01.0-07.

Perez, J., Menendez, M. and Losada, I.J., (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. Coastal Engineering, 124, 1-11.

Picone, M., (2009). Analisi e ricostruzione delle serie storiche dei dati mareografici ed ondametrici dell'ISPRA. Tesi di Tirocinio di formazione e orientamento. ISPRA.

Pirazzoli, P.A., 1986. Marine notches. In: Van de Plassche, O. (Ed.), Sea-level Research: A Manual for the Collection and Evaluation of Data. Geo Books, Norwich, pp. 361–400.

Pirazzoli P.A., Evelpidou N. 2013. Tidal notches: A sea-level indicator of uncertain archival trustworthiness. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 369 (2013) 377–384.

Pope, R.M., Fry, E.S., 1997. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. Appl. Opt. 36 (33), 8710–8723.

Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., Gokceoglu, C., Mohammadi, M., & Moradi, H. R. (2013). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. Arabian Journal of Geosciences, 6(7), 2351-2365.

Rahardjo, H., Leong, E. C., & Rezaur, R. B. (2008). Effect of antecedent rainfall on pore-water pressure distribution characteristics in residual soil slopes under tropical rainfall. Hydrological Processes, 22(4), 506-523.

Remondo, Juan, Jaime Bonachea, and Antonio Cendrero. "Quantitative landslide risk assessment and mapping on the basis of recent occurrences." Geomorphology 94.3-4 (2008): 496-507.

Rovere, A., Antonioli, F., Bianchi, C.N., 2015. Fixed biolgical indicator, Handbook of Sea-Level Research pp. 268 -280.

Ružić, Igor, et al. "A stability assessment of coastal cliffs using digital imagery." Acta Geotechnica Slovenica 12.2 (2015): 25-35.

Sallenger, A.H., Krabill, W., Brock, J., Swift, R., Manizade, S., Stockdon, H., (2002) - Sea-cliff erosion as a function of beach changes and extreme wave runup during the 1997–1998 El Niño. Marine Geology 187, 279–297.

Salvini, R., et al. (2013). "Photogrammetry and laser scanning for analyzing slope stability and rock fall runout along the Domodossola–Iselle railway, the Italian Alps." Geomorphology 185 (2013): 110-122.

Schoeller, H. "Sur les conditions de circulation dans les Calcaires: capacité d'ingestion, capacité d'infiltration." Mémoires AIH, Congrès de Montpellier (1974).

Stopa, J.E., Ardhuin, F., Babanin, A. and Zieger, S., (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models, Ocean Model., 103, 2-17, 10.1016/j.ocemod.2015.09.003

Sulis, A., & Annis A., "Morphological response of a sandy shoreline to a natural obstacle at Sa Mesa Longa Beach, Italy." Coastal Engineering 84 (2014): 10-22.

Sunamura, T., 1977. A relationship between wave-induced cliff erosion and erosive force of waves. J. Geol. 85, 613–618.

Sunamura, T., 1983. Processes of sea cliff and platform erosion. In: Komar, P.D. (Ed.), CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 233–265.

Sunamura, T., (1992) - The Geomorphology of Rocky Coasts. Wiley, Chichester.

Trenhaile, A. S. (2002). "Modeling the development of marine terraces on tectonically mobile rock coasts." Marine Geology 185.3-4: 341-361.

Varnes D. J. (1978) - Slope movements types and processes. In: Schuster R L, Krizek R J (eds). Landslides: Analysis and Control. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Washington D.C., Special Report, No. 176. pp. 11-33.

Walkden, M.J.A., Hall, J.W., (2005) - A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. Coastal Engineering 52, 535–563.

Walkden, M. J., & Hall, J. W. (2011). A mesoscale predictive model of the evolution and management of a soft-rock coast. Journal of Coastal Research, 27(3), 529-543.

Weisse, R., Bisling, P., Gaslikova, L., Geyer, B., Groll, N., Hortamani, M., Matthias, V., Maneke, M., Meinke, I., Meyer, E.M.I., Schwichtenberg, F., Stempinski, F., Wiese, F. and Wöckner-Kluwe K., (2015). Climate services for marine applications in Europe, Earth Perspect., 2 (1), 10.1186/s40322-015-0029-0.

White I.D., Mottershead D.N., Harrison J.J. Environmental Systems (2nd edition), Chapman & Hall, London (1996), p. 616.

Wieczorek, G. (1987). in central Santa Cruz Mountains, California. Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation, 7, 93.

Wilson, R. C., & Wieczorek, G. F. (1995). Rainfall thresholds for the initiation of debris flows at La Honda, California. Environmental & Engineering Geoscience, 1(1), 11-27.