

# Evoluzione geomorfologica di una costa alta nel Cilento (Campania). Il caso di Ripe Rosse

Domenico Guida<sup>1</sup> e Alessio Valente<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Salerno, Campus Universitario, 84084 Fisciano (SA)

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università del Sannio, Via F. de Sanctis, 82100 Benevento

## Riassunto

Il presente contributo illustra l'evoluzione geomorfologica a medio termine della falesia costiera denominata Ripe Rosse, localizzata lungo la costa del Cilento in Campania. Essa è inserita in un'area tutelata non solo a livello nazionale, ma anche internazionale, come patrimonio geologico riconosciuto dalla Rete dei Geoparchi dell'UNESCO. Questo sito mostra un tipico profilo costiero noto come "slope-over-wall", composto da un pendio superiore convesso a moderata pendenza costituito da colluvioni ed un tratto inferiore come falesia rocciosa subverticale. Lo studio geomorfologico di dettaglio attraverso l'analisi multitemporale di fotoaeree integrato dal LIDAR e dalle informazioni di rilievi subacquei ha consentito di riconoscere le forme sulla falesia e del suo immediato fondale. A tali forme è stata attribuita un'età di formazione che ha permesso la ricostruzione dell'evoluzione geomorfologica di questa particolare falesia a partire dal MIS 5. Alcuni dei processi che l'hanno determinata risultano ancora attivi e preoccupano le amministrazioni locali, poiché gli eventi franosi che si susseguono sul pendio superiore convesso mettono a rischio l'unica strada statale che collega tutti i villaggi turistici della Costiera Cilentana meridionale. Pertanto, al fine di comprendere quale sarà la futura evoluzione della falesia ed indirizzare strategie di mitigazione si è tentato di applicare una modellazione qualitativa, supportata da modellazione di ingegneria numerica orientata.

**Parole chiave:** Falesie; Profilo costiero composito; Geomorfologia costiera, Variazione livello del mare, Modello numerico, Geoparco UNESCO, Campania.

## Abstract

*This contribution illustrates the medium-term geomorphological evolution of the coastal cliff called Ripe Rosse, located along the Cilento coast in Campania. It is included in an area protected not only nationally, but also internationally, as a geological heritage recognized by the UNESCO Geoparks Network. This site shows a typical coastal profile known as "slope-over-wall", consisting of a convex upper slope with medium slopes consisting of colluviums and a lower section as a sub-vertical rocky cliff. A detailed geomorphological study through the multitemporal analysis of aerial photos integrated by LIDAR and information from underwater surveys made it possible to recognize the landforms on the cliff and its immediate sea-bottom. The age of formation has been attributed to these morphologies and this has made it possible to reconstruct the geomorphological evolution of this particular cliff. In particular, the genesis of this profile is attributable to three morphogenetic phases: the first phase, with a base level at approximately + 8-10 m a.s.l., presumably corresponding to MIS5 (last interglacial), with the formation of a residual cliff and related deposits of coarse beach, nowadays submerged; a second, developed over a long period in a stadial Mediterranean periglacial morphoclimatic regime, responsible for the upper profile characterized by solifluxion in the form of clinostratified colluvium and connected to a much lower base level than the current one and a final phase produced by the alternating but progressive ascent of the late Pleistocene sea, following the last glaciation, responsible for the retreat of the cliff. Some of the processes that determined such retreat are still active and worry local administrations, since the events landslides that follow one another on the*

*upper convex slope put at risk the only state road that connects all the tourist villages of the southern Cilento coast. Therefore, in order to better identify integrated strategies both to preserve the internationally protected coast and to prevent road damage, a qualitative geomorphic modeling, supported by numerical oriented engineering modeling, was carried out. The application of this modeling has given promising results on how the coast will recede in the next 500 years and therefore on how to mitigate the risk based on the exceptional value of the site.*

**Keywords:** *Sea cliff, Slope-over-wall, Coastal geomorphology, Sea level changes, Numeric modelling, UNESCO Global Geopark, Campania.*

## Introduzione

Il Cilento mostra uno dei litorali più affascinanti e apprezzati dei paesi del Mediterraneo (Valente et al, 2017). Le caratteristiche di questo litorale hanno favorito il suo inserimento nell'ambito del Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni e in seguito il riconoscimento nell'ambito del Patrimonio Mondiale dell'UNESCO come Global Geopark (Aloia et al., 2013a). Questo territorio è caratterizzato da un'ampia diversità fisica, floristica e faunistica e gode di un clima con inverni miti e piovosi ed estati calde, secche e prolungate. L'uomo frequenta quest'area costiera fin dall'epoca paleolitica, ma oggi gli insediamenti civili e le infrastrutture turistiche provocano una notevole pressione in grado di danneggiare questo paesaggio spettacolare. Comunque, negli ultimi decenni nel Cilento sono svolte azioni di protezione/conservazione del patrimonio naturale e di mitigazione/recupero verso le condizioni di degrado. In particolare, sono stati effettuati interventi sull'erosione delle spiagge, data la loro grande importanza economica nel turismo e nel tempo libero. Tuttavia, anche le coste alte, che peraltro hanno una maggiore estensione spaziale e rilevanza paesaggistica del litorale cilentano, dovrebbero ricevere maggiore attenzione da parte delle istituzioni pubbliche al fine di prevenire condizioni di pericolo (Aloia et al., 2013b; Budetta, 2008). Per questo diventano sempre più indispensabili studi specifici con metodologie di ricerca innovative. Questo studio intende dare un contributo specifico in questa direzione dedicandosi alle coste alte rocciose, che sono meno considerate nella letteratura. Probabilmente, questo potrebbe dipendere dall'utilizzo di questi spazi, in quanto i litorali bassi sono maggiormente preferiti per attività turistico-balneari o commerciali. Tuttavia, le coste alte e rocciose spesso sono caratterizzate da livelli di pericolosità significativi per gli insediamenti umani e per le molteplici attività sul territorio (Pranzini, 2004). Questi pericoli non sono sempre del tutto noti e quindi gli interventi di mitigazione si dimostrano talvolta errati. Inoltre, su questi litorali si conservano habitat naturali di pregio, che devono essere salvaguardati e non eliminati o alterati dalle azioni antropiche. In base a queste considerazioni gli studi dovrebbero avere un carattere interdisciplinare così da migliorare la conoscenza dello stato dei luoghi e la comprensione dei fenomeni che si verificano.

Le coste alte e rocciose, come quella del presente studio, richiedono analisi specifiche sulla loro porzione emersa e sulla porzione sommersa, rispettivamente soggette a processi subaerei e marini (Bird, 2000). Nel tempo queste porzioni possono subire dei cambiamenti nella tipologia e nell'intensità dei processi che vi agiscono. In particolare, le oscillazioni glacio-eustatiche del Quaternario hanno portato ad importanti effetti sulle coste alte e rocciose, le cui tracce sono ancora leggibili sulle falesie attuali (Griggs e Trenhaile, 1994). A queste oscillazioni possono comunque sovrapporsi variazioni di breve termine rappresentate da eventi meteorologici di particolare intensità che possono concentrarsi sulla porzione emersa o sommersa. Anche tali eventi, se le condizioni lo consentono, possono lasciare delle forme di erosione e/o di accumulo. Negli ultimi secoli, inoltre, è diventata rilevante l'azione dell'uomo, che riesce ad alterare il profilo della costa (es. realizzazione di strade, installazioni di resort a picco sul mare, moli per ormeggio addossati alla falesia, ecc.), dando enfasi ai processi che la modellano. Per questo è importante procedere ad un'analisi geomorfologica dettagliata al fine di distinguere le forme ereditate da processi non più attivi rispetto a quelle derivanti da processi in corso o potenzialmente innescabili. La conoscenza di tali processi scanditi nel tempo possono essere previsti a medio termine, addirittura attraverso modelli numerici, e quindi consentire di poter procedere ad interventi mirati alla conservazione dei beni naturali ed antropici di questo sito. Tale contributo è estratto da un lavoro comprendente altri siti costieri del Cilento (Guida e Valente, 2019), ma in questo caso si intende focalizzare solo l'evoluzione geomorfologica del tratto di costa alta delle Ripe Rosse.

## Materiali e metodi

L'analisi geomorfologica non può prescindere da un rilievo di campo, che nello studio si è concentrato sulla porzione emersa. Anche questa porzione è stata analizzata attraverso l'analisi di fotografie scattate dal mare, che

ne consentissero una visione completa. Le informazioni ottenute, supportate da dati di letteratura, sono state essenzialmente di natura geologica e geomorfologica. Successivamente, l'analisi è proseguita con la lettura di carte topografiche, riguardanti l'area. La carta utilizzata più antica è stata realizzata dall'IGM nel 1956 e la carta più recente è stata realizzata dalla Regione Campania nel 2004. Tali carte sono state integrate dalle osservazioni di diverse fotografie aeree dal 1943 fino alle più recenti del 2012. Questa analisi multitemporale è stata completata sul web con le immagini disponibili su Google Earth acquisite nel 2015 sul Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente (2012). Da quest'ultimo sito è stato estratto il DEM ottenuto dal LIDAR rilevato nel 2012. Da mappe, foto aeree e immagini satellitari disponibili sul web, sono state ottenute informazioni spaziotemporali dell'area successivamente digitalizzate così da ottenere una carta geomorfologica. Per la realizzazione di questa carta si è utilizzata la procedura GmIS\_UniSa, che consente di eseguire una mappatura orientata agli oggetti a copertura totale (Dramis et al., 2011). Tutte le caratteristiche geomorfologiche identificate dai rilievi sul campo e dall'analisi aerofotogrammetrica sono state automaticamente identificate, organizzate gerarchicamente e mappate. Particolare attenzione è stata data al riconoscimento oggettivo, alla classificazione e alla mappatura dei processi di formazione del terreno odierni (canali incisi, falesie rocciose, frane superficiali, ecc.) sovrapposte a morfologie pleistoceniche (conoidi alluvionali, terrazzi marini, talus detritici, ecc.) (Dramis et al., 2011) In questo processo di rilevamento sul terreno e di acquisizione della cartografia un contributo importante è stato svolto dalla struttura tecnica del Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni.

Dopo aver ricostruito qualitativamente l'evoluzione geomorfologica a breve e medio termine di questa particolare costa alta ed aver ottenuto informazioni sul ruolo dei processi che hanno agito in passato, a partire dal Pleistocene superiore, si è cercato di testare un modello numerico dell'evoluzione, fisicamente basato. A tal fine è stato utilizzato il software SCAPE, che è stato in grado di modellare l'evoluzione della parte basale della costa, quella in cui agisce l'onda per le prossime centinaia di anni.

La forma costiera è stata rappresentata all'interno di questo software con una serie di profili di costa alta distanziati tra loro ed assemblati lungo la stessa linea di riferimento. Il modello prevedeva dati di input corrispondenti alle caratteristiche morfometriche del tratto di costa in esame e a quelle meteomarine incidenti su di esso. I dati meteomarine presi in considerazione sono stati quelli registrati nella stazione di Ponza (ISPRA, 2011). Nel complesso ne è scaturita una recessione orizzontale di ogni profilo rispetto ad una data elevazione della piattaforma sommersa ( $z_s$ ), che SCAPE ha calcolato in base alla seguente equazione differenziale:

$$\frac{dy_s(z_s)}{dt} = \frac{F}{R} f_1(h(t) - z_s) \tan\left(\frac{dz_s}{dy_s}\right) f_2(z_{beach} - z_s) \quad (1)$$

dove  $y_s$  e  $z_s$  sono rispettivamente le dimensioni orizzontale e verticale delle piattaforme;  $t$  è il tempo considerato, mentre con

$$F = H_b^{13/4} T_p^{3/2} \quad (2)$$

si considera la forza erosiva delle onde casuali ad una data altezza dell'onda al frangimento ( $H_b$ ) in metri e periodo di picco ( $T_p$ ) in secondi,  $R$  è una costante di calibrazione, usata come parametro che varia con la resistenza del materiale ed una costante idrodinamica;  $f_1$  è funzione di una forma descrittiva di come le forze erosive ( $F$ ) variano con la profondità dell'acqua ( $h(t) - z$ );  $dz / dy_s$  è la pendenza locale riferita all'altezza della piattaforma  $z$ ;  $f_2$  è una funzione discontinua che è uguale a 0 se lo spessore della spiaggia (la differenza tra l'elevazione della spiaggia e l'elevazione della piattaforma consolidata  $z_{beach} - z_s$ ) è maggiore di  $0.23H_b$  e aumenta linearmente fino a 1 se non c'è spiaggia sulla piattaforma più prossima alla falesia.

Per i blocchi sommersi (cioè blocchi la cui altezza superiore è inferiore al livello del mare), l'erosione orizzontale originaria di SCAPE è stata convertita nella sua componente verticale,  $dz/dt$ , applicando la seguente semplice conversione trigonometrica:

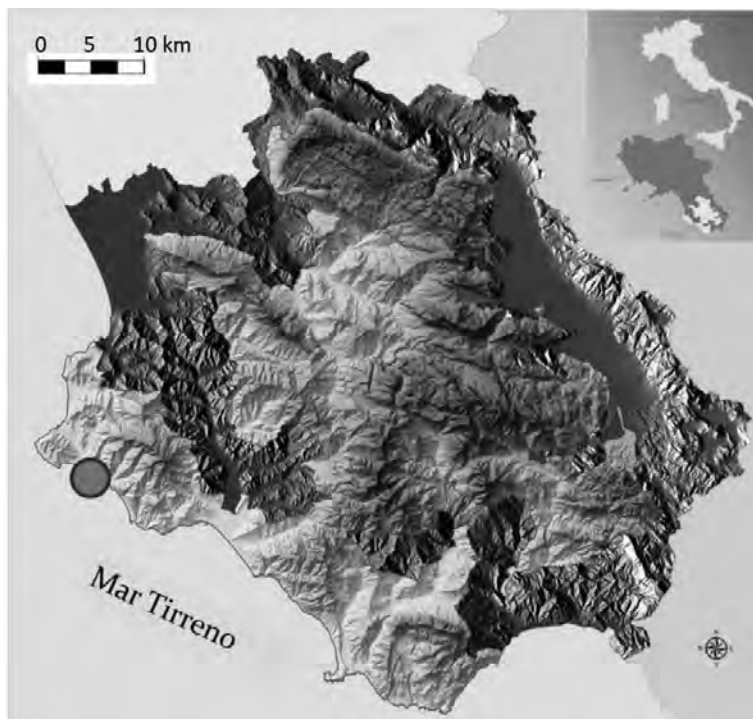
$$\frac{dz_s}{dt} = \frac{dy_s(z_s)}{dt} \tan\left(\frac{dz_s}{dy_s}\right)$$

Tutti i parametri dell'equazione (1) sono facilmente disponibili; la pendenza locale, ad esempio, può essere ricavata dai profili costieri. Per ogni profilo, la forza erosiva è calcolata in funzione dell'altezza delle onde

al frangimento memorizzata nella geometria della costa e il periodo del picco d'onda definito dall'utente. La stessa funzione della forma di erosione proposta per SCAPE è utilizzata per stimare l'erosione della piattaforma a terra in base al rapporto tra la profondità dell'acqua e l'altezza dell'onda al frangimento. La lunghezza nota del profilo è utilizzata per garantire che l'integrale numerico della funzione di forma sia uguale a 1. L'erosione verticale non vincolata è quindi calcolata per ciascuna cella lungo il profilo. Il livello attivo, l'equazione (2), è quindi applicata a ciascuna cella per stimare l'effettiva erosione verticale. L'applicazione del modello ha generato una serie di file di output con dati sui profili delle pareti rocciose e della spiaggia sottostante, sul trasporto solido e sul volume annuo accumulato sulla costa emersa. Queste informazioni, attraverso l'utilizzo di programmi quali Excel e Matlab, hanno permesso la rappresentazione grafica di quanto elaborato dal programma SCAPE.

### La costa di Ripe Rosse

Nel Cilento settentrionale (Campania) uno dei tratti più rappresentativi con costa alta è denominato Ripe Rosse (Fig. 1). Tale costa si caratterizza per il suo versante composito, composto da una parte superiore convessa ed una parte inferiore pressoché verticale. Un'importante strada (SR exSS267) attraversa la parte più alta del pendio con una vista impressionante sul mare sin quasi alla base della falesia. Alle estremità di questo versante, si sviluppano delle spiagge sabbiose, che permettono di raggiungere la sua base e percorrerla interamente, sfruttando la gran quantità di detriti di ogni dimensione accumulatisi in una fascia piuttosto ristretta. Questo accumulo è indicativo dei numerosi crolli di rocce costituenti la falesia.



**Figura 1. Localizzazione di Ripe Rosse nel Geoparco del Cilento, Vallo di Diano e Alburni (Campania)**

Le Ripe Rosse sono costituite da una successione torbiditica grossolana (Fig. 2) di spessore superiore ai 150 m, ascrivibile alle Arenarie di Pollica, la più antica formazione del Gruppo del Cilento (Langhiano - Tortoniano inferiore: Cammarosano et al., 2004). In particolare, questa successione è costituita da strati medi e spessi di arenarie medie e grossolane, generalmente con basi nette, che passano verso l'alto ad arenarie più fini con significative intercalazioni pelitiche. Sono presenti altresì banchi conglomeratici con basi erosive e concave, che lateralmente "tagliano" strati sottili di arenarie a grana più fine con porzioni pelitiche prevalenti. In questa successione si intercalano diversi livelli caotici quali slumping, colate sabbiose, ecc. (Cocco et al., 1986; Cavuoto et al., 2008).



Tale successione si è depositata in un bacino sottomarino profondo sulle successioni deformate precocemente dell'Appennino meridionale (es. Unità Tettonica Nord-calabrese: Eocene medio – Burdigaliano). Una serie di quest'ultima successione deformata, costituita da strati sottili di arenarie fini con intercalazioni siltitiche, affiora risalendo verso nord alla base della falesia al di sotto delle Arenarie di Pollica (ISPRA, 2015). Quest'ultima serie, come evidenziato da un rilievo geofisico (ISPRA, 2015), costituirebbe il substrato del fondale antistante il tratto costiero. In quest'ultimo la piattaforma costiera si mostra con un gradiente molto basso, ricoperta da sabbie e ghiaie organogene grossolane a profondità compresa tra i 10 e i 25 m. Questo deposito verosimilmente si sarebbe formato in coincidenza con l'ultimo abbassamento del livello del mare (Pennetta et al, 2013; ISPRA, 2013).



**Figura 2.** Vista da mare della costa di Ripe Rosse.

Per completare la descrizione geologica, come si osserva in particolare nella porzione emersa, faglie normali trasversali interrompono la continuità dell'affioramento. Invece, una faglia pressoché parallela alla linea di costa nel tratto di Ripe Rosse è stata rilevata dall'analisi dei profili sismici eseguiti in una campagna di rilievi (ISPRA, 2015). Rilievi sul campo, analisi di foto aeree multitemporali e immagini satellitari hanno permesso di realizzare una carta geomorfologica digitale dalla quale si può dedurre che il profilo costiero delle Ripe Rosse è costituito per buona parte da una scarpata con moderata pendenza (in media  $40^\circ$ ) che nell'ultimo tratto scende con una falesia sub-verticale fino al livello del mare (Fig. 3) e quindi prosegue nell'area sommersa con una piattaforma costiera sub-orizzontale ampia fino a 200 m. Il tratto di costa in oggetto ha un'estensione di circa 2 km e



**Figura 3.** Ripe Rosse: il profilo costiero composto con la porzione superiore (slope) ricoperta da vegetazione radicata in detriti e quella inferiore (wall) in cui affiorano le torbiditi arenaceo pelitiche; alla base del profilo un accumulo costituito da blocchi e ciottoli.

un'altezza da poco più di 10 m fino a 100 m. Le pendenze del versante costiero sono comprese in media tra i 40°, nella parte superiore, e gli 80°, nella parte inferiore. Questi caratteri mutano decisamente verso le estremità, non rappresentate in figura 3, più marcatamente a nord, dove il versante ha una pendenza generalmente con un angolo inferiore a 30° che degrada fino ad un'ampia spiaggia sabbiosa.

La falesia composta tende generalmente a recedere per "slope decline", soprattutto dopo che la parte basale si è evoluta per arretramento. Ne consegue che essendo il versante superiore, principalmente soggetto a processi subaerei, evidenzia forme legate a movimenti gravitativi quali crolli, ribaltamenti e scorrimenti, mentre quello inferiore, che è soggetto all'azione erosiva delle onde, mostra tracce legate alla morfogenesi marina (Fig. 4). La conservazione di tali tracce può essere impedita dal materiale accumulato nel tempo al piede della falesia. Nella fattispecie la parte basale del pendio di Ripe Rosse è ricoperta da abbondanti detriti per una larghezza limitata da 2 a 4 m. Essi rappresentano i prodotti dell'alterazione del substrato precipitati dal versante sovrastante, che svolgono, finché non sono asportati, un'azione importante di protezione. Nello stralcio della carta non mancano altresì le forme legate alla morfogenesi del versante costiero rappresentate da crinali, lembi di antiche superfici di abrasione marina molto degradati, indicativi di un versante non ancora regolarizzato (Fig. 4).

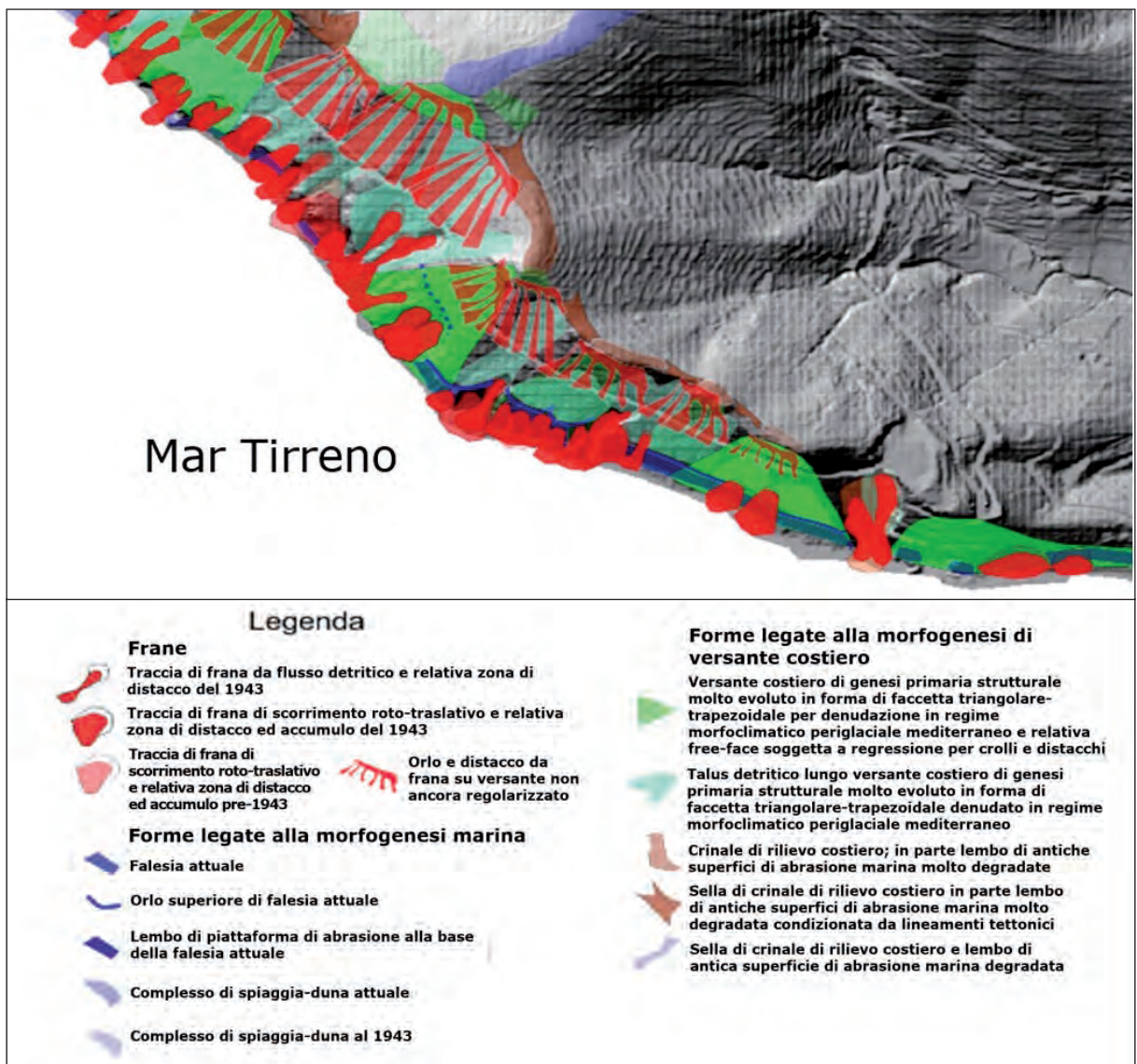


Figura 4. Ripe Rosse: Stralcio della Carta geomorfologica di "Ripe Rosse" (Guida et al., 2017) eseguita secondo la procedura GmIS\_UniSa (Dramis et al., 2011) in scala 1:5.000.

Questo profilo composto, conosciuto nella letteratura come “slope-over-wall” (Bird, 2000; Trenhaile, 2010), potrebbe aver avuto origine da una faglia, già riconosciuta dalle indagini geofisiche, e quindi essere stato oggetto di una lunga modellazione. La natura strutturale è supportata anche da alcune faccette triangolari-trapezoidali sviluppate sul versante. Le fasi di modellazione del versante si sarebbero sviluppate a partire dell'epoca periglaciale, ed avrebbero formato anche l'accumulo detritico alla base dell'attuale falesia. Le diverse zone di distacco del materiale, soprattutto nella parte convessa del pendio, sono state riconosciute e cartografate (Fig. 4). Inoltre, dal confronto delle foto aeree del secolo scorso sono emersi importanti fenomeni di frana avvenuti nel 1943 lungo questo versante costiero, ben riconoscibili verso la parte settentrionale di questo tratto costiero. Secondo l'Autorità distrettuale di Bacino Sinistra Sele (2007) la condizione in cui si trova questo versante costiero è classificata con un rischio da alto a molto alto (Aloia et al., 2013b). Infatti, su di esso la diffusa instabilità presente metterebbe a rischio l'unica strada posta alla sommità del pendio che collega i villaggi turistici della costa meridionale del Cilento, così come comprometterebbe l'esistenza di questo sito geologico di valenza internazionale. Pertanto, sarebbe indispensabile considerare misure di prevenzione e mitigazione che non abbiano alcun impatto sui valori, l'autenticità e l'integrità di un bene culturale o naturale e neppure sulla sicurezza della mobilità (Aloia et al., 2013a).

Un ultimo aspetto da prendere in esame riguarda la vegetazione che ricopre questo versante costiero che appartengono alla macchia mediterranea. In questo caso l'associazione vegetale è arricchita dalla Ginestra del Cilento (*Genista cilentina*), specie endemica distribuita in Campania e Sicilia, dal Carrubo (*Ceratonia siliqua*), dal Ginepro fenicio (*Juniperus phoenicea*) e dal Pino d'Aleppo (*Pinus halepensis*) (Corbetta et al., 2004). Nelle aree sommerse adiacenti sono ampiamente diffuse le praterie di fanerogame (*Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*) (Aronne et al., 2014) (ISPRA, 2013). Questa significativa biodiversità costituisce un'importante funzione ecologica, considerata di pregio anche dal programma Man and Biosphere dell'UNESCO dal 1997.

### **Modello di evoluzione**

Ai fini della comprensione dell'evoluzione della costa alta e rocciosa di Ripe Rosse è stato sviluppato uno studio geomorfologico dettagliato, anche con l'ausilio di modelli numerici. Come detto in precedenza, questo tratto costiero è costituito da alternanze di arenarie/conglomerati e peliti, che hanno nel complesso una bassa resistenza all'erosione (soft rock). Pertanto i processi subaerei, che agiscono lungo il pendio, ne risultano favoriti, così come le onde che agiscono soprattutto al piede della falesia. I risultati di questi processi hanno determinato una parte superiore del versante con un pendio convesso modellato in roccia alterata e ricoperta da detriti, ed una parte inferiore rappresentata da una falesia verticale in roccia relativamente meno degradata e più coerente. Come indicato in letteratura questa falesia verticale potrebbe corrispondere ad un piano di faglia o ad una sua evoluzione (Bird, 2000; Trenhaile, 2010), e quindi costituire la parte inferiore di un modello slope-over-wall (Fig. 5). La genesi di questo profilo è attribuibile a tre fasi morfogenetiche, di cui sono riconoscibili le tracce determinate dai processi che si sono succeduti. La prima fase si sarebbe esplicata con un livello di base a circa +8-10 m s.l.m. attuale, corrispondente presumibilmente al MIS5. In tale condizione climatica calda si sarebbe formata una falesia sub-verticale per arretramento (parallel retreat) e i relativi depositi di spiaggia grossolani presenti sui fondali antistanti, che sono stati attribuiti all'ultimo interglaciale (ISPRA, 2013). La seconda fase si sarebbe sviluppata in un lungo periodo in regime morfoclimatico stadiale di periglaciale mediterraneo, responsabile del profilo superiore caratterizzato da soliflussi in forma di colluvioni clinostratificate, raccordate ad un livello di base molto più basso di quello attuale. Tale livello potrebbe essere quello di -120 m sotto a quello attuale ovvero in coincidenza con l'ultima fase glaciale verificatasi intorno a 20.000 anni fa. La fase finale, infine, si sarebbe compiuta durante l'alternante ma progressiva risalita del mare tardo-pleistocenica, successiva all'acme dell'ultima fase glaciale, quando è avvenuta la graduale demolizione del profilo precedente soprattutto attraverso fenomeni gravitativi ed una diminuzione graduale del suo declivio (slope decline). Questa condizione verosimilmente perdurerà, finché si conserverà la falesia sub-verticale sottostante, a quel punto potrebbe avvenire un generale collasso gravitativo (Fig. 5).

In letteratura questi profili composti si formano essenzialmente quando le coste, intagliate in rocce relativamente resistenti si degradano per azione del gelo e disgelo in ambiente periglaciale. Ne consegue, quindi, il lento flusso di materiale lungo i pendii costieri (solifluzione) che poi si predisporrebbero



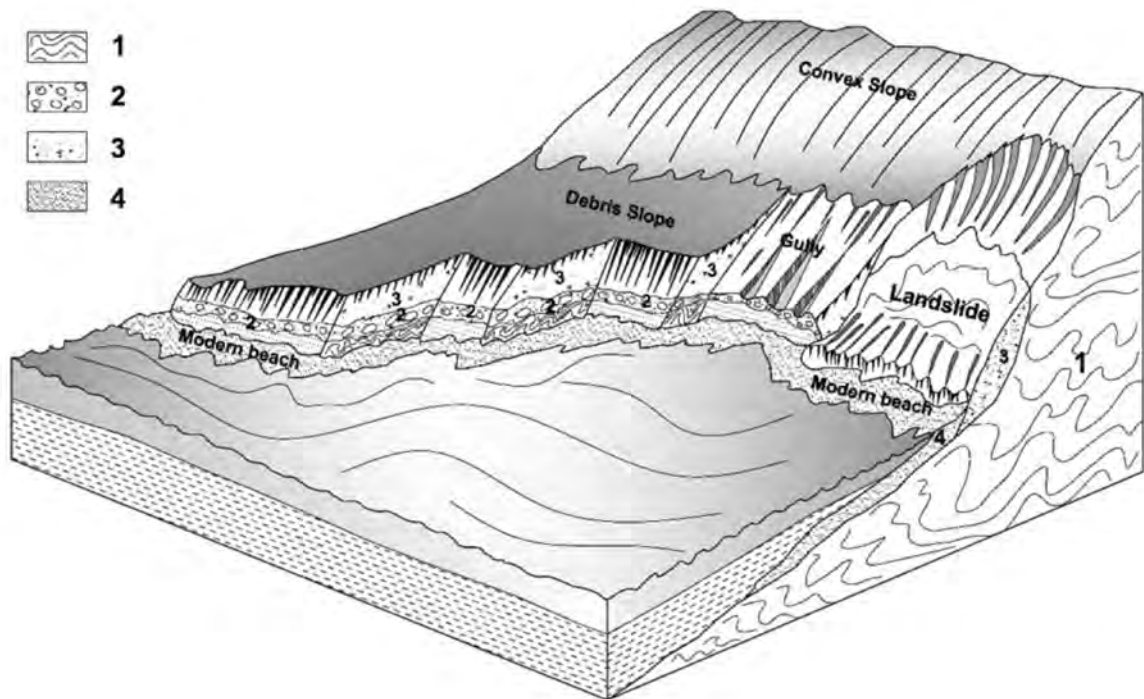


Figura 5. Evoluzione di una costa alta con profilo "slope-over-wall". Legenda: 1. substrato deformato; 2. Depositi di soliflusso; 3. Deposito detritico sul versante; 4. Sedimenti attuali di spiaggia (Guida e Valente, 2019).

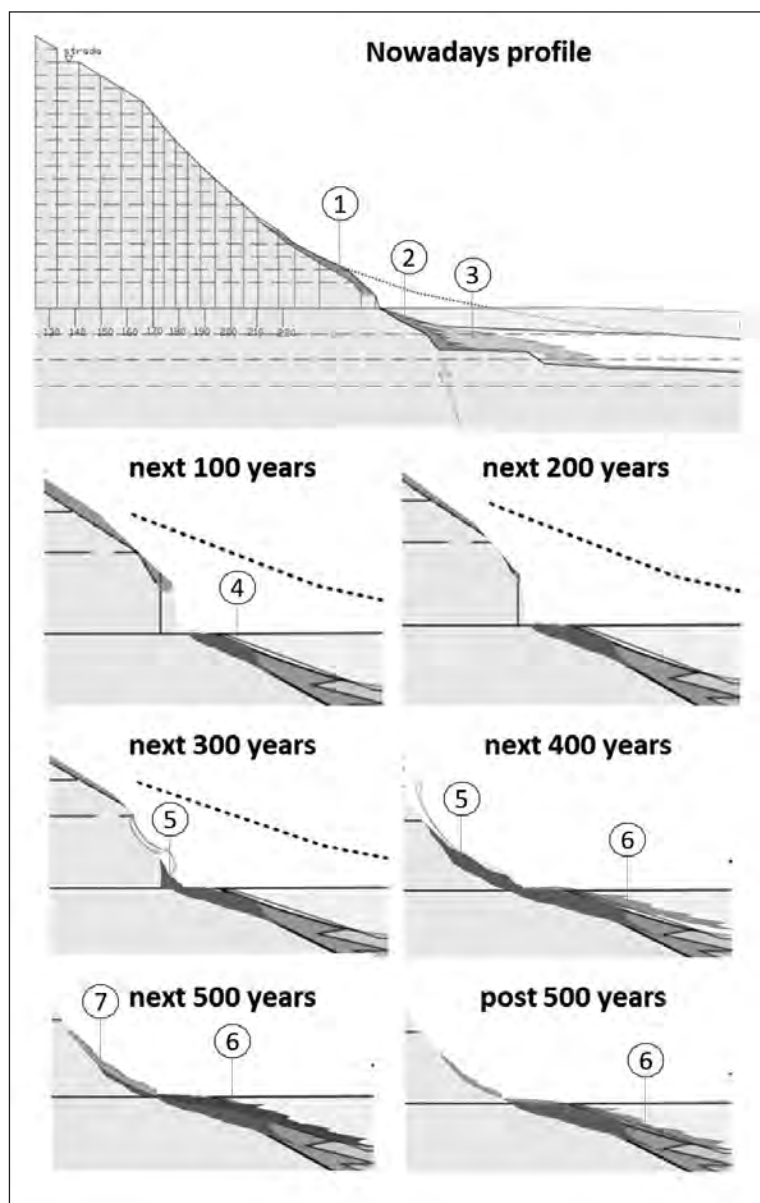
all'erosione marina. Questo processo è ancora attivo alle alte latitudini, ma durante il Pleistocene si estese fino alle coste temperate. Durante le fasi fredde pleistoceniche, infatti, i versanti costieri furono soggetti ad una notevole disgregazione delle rocce, i cui frammenti si accumulavano alla loro base, senza che il mare li potesse disperdere, poiché posto ad un livello decisamente più basso. Le coste pleistoceniche divennero quindi pendii ammantati da depositi di soliflusso con ghiaie spigolose (*grèzes litées*). Alla fine del Pleistocene il clima divenne più mite e questi pendii costieri si copirono di vegetazione, facendone diminuire l'intensità dei processi subaerei. La risalita del livello del mare fece però incrementare l'erosione marina così da intaccare la porzione inferiore dei pendii, che proseguì fino al raggiungimento della successione rocciosa in falesia subverticale, formatasi nella fase interglaciale precedente. Sul pendio sovrastante, in mancanza di vegetazione, il detrito poteva trovarsi sospeso ed essere coinvolto in fenomeni gravitativi. Questa evoluzione ben si adatta a quanto è accaduto sul sito di Ripe Rosse, tuttavia sarebbe importante comprendere ciò che potrebbe accadere in futuro per pianificare interventi idonei alla sua conservazione.

Pertanto è stata simulata l'evoluzione geomorfologica a medio termine, in considerazione che la tropicalizzazione climatica è ormai la tendenza più acclamata almeno per i prossimi cento anni (Antonioli e Silenzi, 2007). Così partendo dallo stato attuale, e tenendo conto di un lento innalzamento del livello del mare, è stata ricostruita l'azione dei processi marini che potrebbero agire ai piedi della scogliera. È stata inoltre considerata la rimozione del materiale crollato dal versante, nonché la formazione di una grande piattaforma di erosione costiera. Come già avanzato, lo sviluppo di un accumulo ai piedi della falesia, con sedimenti forniti dal tratto costiero adiacente in erosione ovvero da materiali di cumuli di roccia crollati dal suddetto versante, potrebbe giocare un ruolo importante nell'efficacia dei processi erosivi e quindi impedire una rapida modifica del profilo della falesia.

Alla luce della ricostruzione qualitativa dell'evoluzione geomorfologica di questo particolare tipo di costa alta, frequente nell'area del Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni, è stato possibile implementare un modello di evoluzione costiera, cercando di simulare un modello fisico basato sull'evoluzione a medio termine. Il software utilizzato è SCAPE, con il quale è stato possibile riprodurre un modello di evoluzione della costa, come già sperimentato per rappresentare gli effetti di alcune coste soggette alla risalita del livello del mare (Walkden & Hall.,



2011; Ashton et al., 2011; Carpenter et al., 2014). Questi effetti sono rappresentati su una superficie rocciosa in risposta all'attacco delle onde. In questo caso la forma costiera rappresentativa delle Ripe Rosse utilizzata all'interno di SCAPE è stata costituita da 21 profili, ciascuno distanziato di 25 m, perpendicolari ad una linea di riferimento con una lunghezza totale di 525 m orientata di 322°. I dati di input includevano anche file che descrivono le condizioni delle onde, i livelli di marea, il livello medio annuo del mare, il flusso di sedimenti annuale, il trasporto di sedimenti e il volume annuale accumulato sul tratto di costa emerso. Per ogni profilo, l'intensità dell'erosione è stata calcolata in funzione dell'altezza delle onde che si infrangono a causa delle caratteristiche geometriche della costa e del periodo d'onda di picco. La simulazione è stata testata per 500 anni partendo dalle condizioni attuali e considerando l'ipotesi di un innalzamento del livello del mare di 1 mm/a su una falesia pressoché verticale alta 10 m (Fig. 6). Le altre caratteristiche morfometriche sono state dedotte da un profilo topografico rappresentativo della tipologia "slope over wall" per meglio simulare qualitativamente la loro evoluzione geomorfologica.



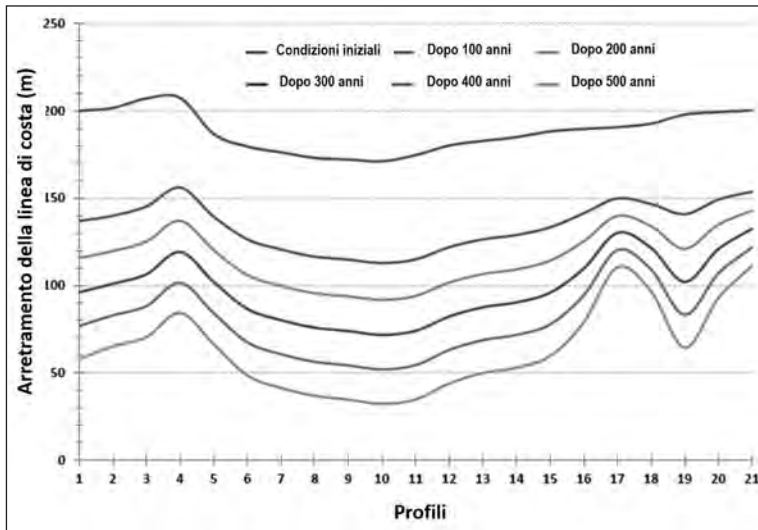
**Figura 6.** Ricostruzione qualitativa (step by step) dell'evoluzione geomorfologica per i prossimi 500 anni lungo un profilo rappresentativo. La linea tratteggiata indica la superficie topografica a -20.000 anni dal presente con il livello del mare a -120 m dalla posizione attuale (Guida e Valente, 2019). **Legenda:** 1. colluvioni; 2. "Spiaggia" al piede della falesia; 3. Sabbie e ghiaie, in parte relitte; 4. Fascia detritica parzialmente sommersa; 5. Accumulo franato dal versante; 6. Sabbie e ghiaie, in parte rielaborate dall'accumulo; 7. Coltre detritica "stabilizzata".

Nella figura 6 è stato altresì riportato solo per i primi trecento anni con linea tratteggiata il profilo topografico risalente a circa 20.000 anni fa quando il livello del mare stava a 120 m al di sotto dell'attuale livello del mare. In quel periodo, infatti, la linea di costa con i ripetuti cicli glaciali, che hanno caratterizzato il Pleistocene, era notevolmente avanzata con gli estesi ricoprimenti di detriti provenienti dalla degradazione delle rocce esposte. Questa condizione rallentò gradatamente fino a 6.000 anni fa quando il mare era risalito ad un livello pressoché simile a quello attuale, causando nel tempo l'arretramento della falesia nella posizione attuale. Tale arretramento è stato possibile per il continuo smantellamento dell'esteso ricoprimento detritico ad opera delle onde di tempesta, nonostante che lo stesso venisse alimentato continuamente dal crollo

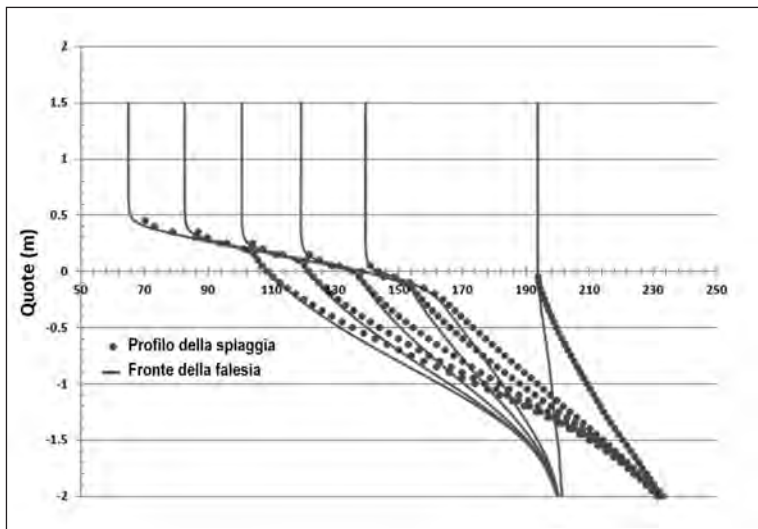
del materiale sovrastante reso instabile dall'erosione al piede. Questi processi hanno restituito il profilo attuale di Ripe Rosse, da cui è stata simulata l'evoluzione della costa a medio termine. Tale evoluzione ha tenuto

conto di quanto previsto dal cambiamento climatico nel prossimo futuro, cioè una sorta di tropicalizzazione, che porterà ad una risalita del livello del mare e ad una enfattizzazione delle mareggiate. Queste condizioni sottoporanno la falesia verosimilmente ad un incremento dell'erosione e del trasporto dei sedimenti.

L'esecuzione del modello per i 500 anni ha generato una serie di file di output, tra i quali il profilo della falesia e della spiaggia sottostante, ma quello che si registra è un arretramento complessivo della falesia fino a 140 m. Tale arretramento, calcolato dall'equazione differenziale precedentemente riportata, è stato rappresentato graficamente dai programmi Excel e Matlab sia lungo il tratto modellato che in corrispondenza del profilo rappresentativo (Figg. 7 e 8). In particolare, la Figura 7 riporta l'evoluzione nei 500 anni del tratto di parete rocciosa di Ripe Rosse in corrispondenza dei 21 profili considerati. La Figura 8, invece, mostra l'arretramento lungo il profilo rappresentativo nell'arco temporale considerato. In essa è evidente come l'erosione delle onde sulla parete rocciosa produca materiale che fa accrescere la spiaggia sottostante.



**Figura 7.** Arretramento della falesia di Ripe Rosse simulato dal software SCAPE nei prossimi 500 anni in corrispondenza dei 21 profili (in pianta) (Guida e Valente, 2019).



**Figura 8.** Arretramento parallelo della falesia e spostamento verso terra del profilo della spiaggia nei prossimi 500 anni simulato dal software SCAPE (Guida e Valente, 2019).

La simulazione ha mostrato chiaramente che la parte basale verticale del pendio costiero retrocede parallelamente a sé stessa con intensità di denudazione uniforme, ipotizzando che non cambi l'intensità con cui avvengono i processi lungo il pendio e/o la resistenza all'erosione delle rocce esposte. Si nota che la recessione è facilitata dalla progressiva rimozione dei detriti dalla base del pendio e dalla formazione di un accumulo parzialmente sommerso. Purtroppo, non è stato ancora possibile simulare l'intero versante sopra la falesia sub-verticale (wall),

tuttavia, come si vede dalla ricostruzione geomorfologica della figura 6, il suo progressivo arretramento dopo 300 anni dovrebbe intercettare la soglia della porzione di versante con il materiale detritico (slope), così da accelerare l'evoluzione dell'intero versante costiero. Tuttavia, se le condizioni climatiche caldo-umide dovessero intensificarsi o se la pressione antropica dovesse diventare pesante attraverso modifiche delle canalette di drenaggio, tagli del versante e incendi boschivi si avrebbe un'enfasi sui processi subaerei estesi all'intero versante con conseguente "sostituzione" della forma del versante in tempi piuttosto ridotti. In tali condizioni la strada sommitale, che è l'unica arteria per raggiungere le località costiere poste a sud, potrebbe essere coinvolta dai movimenti gravitativi che si innescherebbero.

### Conclusioni

Lo studio effettuato sulle Ripe Rosse ha permesso di conoscere nel dettaglio le caratteristiche geologiche e geomorfologiche di questo particolare profilo di costa rocciosa, noto come "slope over wall". Questo profilo si è formato in rocce considerate di relativa scarsa resistenza (soft rocks) durante le alternanze climatiche succedutesi nel Pleistocene superiore e successivamente si è evoluto fino a raggiungere la forma attuale. Questa evoluzione ha permesso di ipotizzare le condizioni in cui si troverà nel prossimo futuro questo sito, che fa parte della rete dei geoparchi UNESCO e conserva un'associazione vegetale della macchia mediterranea di pregio. Infatti, l'applicazione della modellazione su base fisica utilizzando il software SCAPE ha confermato quanto qualitativamente fosse stato immaginato fino a 500 anni. Il tratto subverticale della falesia arretrerà fino a che coinvolgerà i detriti del versante convesso. I fenomeni erosivi significativi potrebbero determinare la perdita del profilo composito e la scomparsa della vegetazione lungo di esso. I tempi previsti per questo "collasso" potrebbero ridursi anche per le conseguenze dei cambiamenti climatici, quindi sarebbe corretto sviluppare un monitoraggio lungo il sito in esame e nel contempo predisporre delle azioni di mitigazione sostenibili sia in corrispondenza della base dei tratti subverticali che in quelli convessi. Nel primo caso si dovrebbe impedire di perdere l'accumulo basale che attenua l'onda battente, nel secondo si dovrebbe porre attenzione a ciò che può ancora compromettere la stabilità di quel versante.

### Bibliografia

- Aloia A., Burlando M. (eds), 2013a. Geoparchi Italiani – Italian Geopark, Forum Nazionale dei Geoparchi Italiani.
- Aloia A., Calcaterra D., De Vita A., Guida D. (eds), 2013b. Acque e terra: risorse e rischi naturali. Quaderno del Geoparco n.2, Parco Nazionale del Cilento, Vallo di Diano e Alburni.
- Antonoli F., Silenzi S., 2007. Variazioni relative del livello del mare e vulnerabilità delle pianure costiere italiane. Quaderni della Società Geologica Italiana, 2.
- Aronne G., De Micco V., Santangelo A., Santangelo N., Santo A., Buonanno M., 2014. Coastal vertical cliffs of the National Park of Cilento: reservoirs of endemic species. In: G. Viccione and Guarnaccia, C. (Eds.) Latest Trends in Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology. Proceedings of the 7th International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '14), Salerno, Italy, June 3–5, 2014, 77–85.
- Ashton A., Walkden M., Dickson M., 2011. Equilibrium responses of cliffed coasts to changes in the rate of sea level rise. *Marine Geology*, 284, 217-229
- Autorità di Bacino Sinistra Sele, 2007, Piano Stralcio per l'erosione costiera (P.S.E.C.). Disponibile on line: <http://www.difesa.suolo.regione.campania.it/content/view/190/38/>
- Bird E., 2000. Coastal Geomorphology: an introduction. John Wiley & sons.
- Budetta P. 2008. Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach. *Geomorphology*, 94, 340-352.
- Cammarosano A., Cavuoto G., Danna M., De Capoa P., De Rienzo F., Di Staso A., Giardino S., Martelli L., Nardi G., Sgrosso A., Valente A., 2004. Nuovi dati e nuove interpretazioni sui flysch terrigeni del Cilento (Appennino meridionale, Italy). *Boll. Soc. Geol. It.*, 123, 253–273.
- Carpenter N. E., Dickson M. E., Walkden M. J. A., Nicholls R. J., Powrie W., 2014. Effects of varied lithology on soft-cliff recession rates. *Marine Geology*, 354, 40-52.
- Cavuoto G., Valente A., Nardi G., Martelli L., Cammarosano A., 2008. A Prograding Miocene Turbidite System, Tempa Rossa Cliffs, Italy. In: T.H. Nilsen, R.D. Shew, G.S. Steffens and J.R.J. Studlick (eds), Atlas of Deep-Water Outcrops, AAPG Studies in Geology, 56, 54.

- Cocco E., De Pippo T., Valente A., 1986. Sedimentologia del Flysch del Cilento: Le arenarie di Tempa Rossa, *Geol. Rom.*, 25, 25-32.
- Corbetta F., Pirone G., Frattaroli A.R., Ciaschetti G., 2004. - Lineamenti vegetazionali del Parco Nazionale del Cilento e Vallo di Diano. *Braun-Blanquetia*, 36, 1-61.
- Dramis F., Guida D., Cestari A., 2011. Nature and aims of geomorphological mapping. In: Smith, M., Paron, P., Griffiths, J.S., *Geomorphological mapping. Methods and applications*; Elsevier, Amsterdam, 39-73.
- Google Earth, 2015. Disponibile online: <https://google-earth-pro.com>
- Griggs G.B., Trenhaile A.S., 1994. - Coastal cliffs and platforms. In: Carter R.W.G., Woodroffe C.D. (Eds.), *Coastal Evolution: Late Quaternary Shoreline Morphodynamics*, Cambridge, Cambridge University Press, 425-476.
- Guida D., Aloia A., Cestari A., Maffia T., 2017. Geomorphological Map of the “Ripi Rosse” Complementary Geosite. National Park of Cilento, Vallo di Diano and Alburni – UNESCO Global Geopark.
- Guida D., Valente A., 2019. - Terrestrial and marine landforms along the Cilento coastland (Southern Italy): A framework for landslide hazard assessment and environmental conservation. *WATER*, 11 (12), 2618.
- ISPRA, 2011. Atlante delle coste “Il moto ondoso a largo delle coste italiane”. Disponibile online [www.isprambiente.gov.it/it/servizi/stato-delle-coste/atlane-delle-coste](http://www.isprambiente.gov.it/it/servizi/stato-delle-coste/atlane-delle-coste)
- ISPRA, 2013. Geological Map and Submerged Landscape Map of the National Park of Cilento, Vallo di Diano and Alburni.
- ISPRA, 2015. Note illustrative della Carta Geologica d’Italia alla scala 1:50.000. Foglio 502 “Agropoli”. Regione Campania.
- Pennetta M., Bifulco A., Savini A., 2013. Ricerca di depositi di sabbia sottomarina relitta sulla piattaforma continentale del Cilento (SA) utilizzabile per interventi di ripascimento artificiale dei litorali. *Geologia dell’Ambiente*, n.1 suppl., 1-22.
- Portale Cartografico Nazionale del Ministero Italiano dell’Ambiente, 2012. Disponibile online: <http://www.pcn.minambiente.it/>
- Pranzini E., 2004. La forma delle coste, Zanichelli
- SCAPE (Scalable Preservation Environments) Open Source Software. Disponibile online: <https://scape-project.eu/software/scape-open-source-software>
- Trenhaile A.S., 2010. The effect of Holocene changes in relative sea level on the morphology of rocky coast. *Geomorphology*, 114, 30-41.
- Valente A., Magliulo P., Russo F., 2017. The coastal landscape of Cilento (southern Italy): a challenge for protection and tourism valorisation. In: M. Soldati, M. Marchetti (eds), *Landscapes and Landforms of Italy*, Springer International Publ., 35, 409 – 419.
- Walkden M., Hall J., 2011. A Mesoscale Predictive Model of the Evolution and Management of a Soft-Rock Coast. *Journal of Coastal Research*, 27 (3), 529-543

**Ricevuto il 04/11/2021, Accettato il 23/12/2021**