



Interreg



UNIONE EUROPEA



MARITTIMO-IT FR-MARITIME

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

# GESTIONE E TUTELA DELLE COSTE

PRIMO INCONTRO TERRITORIALE

Pula 15 febbraio 2019

## Metodologie di indagine per la valutazione delle dinamiche evolutive e del rischio per le coste alte

Gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche

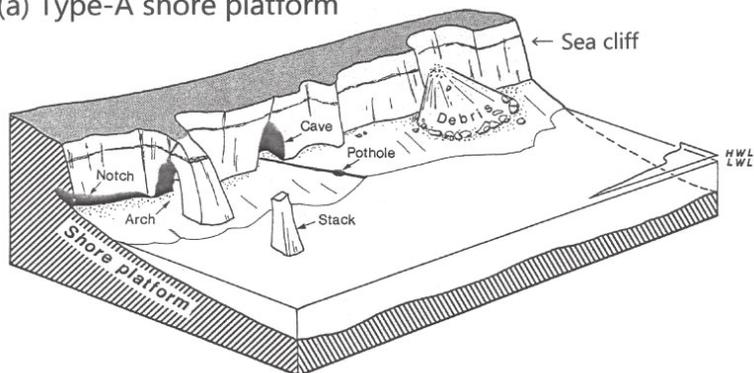


Università degli Studi di Cagliari

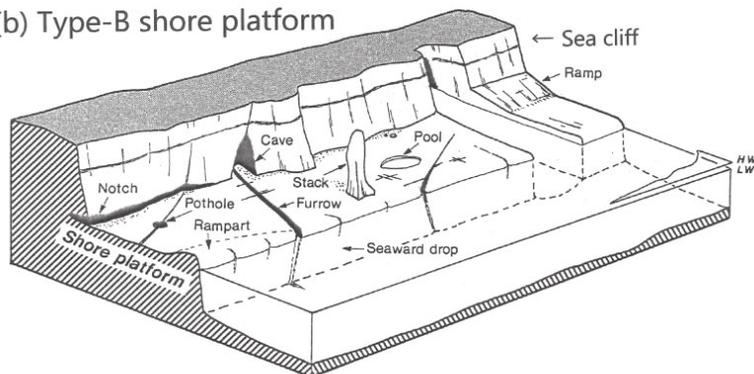
*Giacomo Deiana, Stefania Da Pelo, Antonio Funedda, Giorgio Ghiglieri, Maria  
Teresa Melis, Mattia Alessio Meloni, Luca Naitza, Paolo Orrù, Andrea Sulis*

La cooperazione al cuore del Mediterraneo

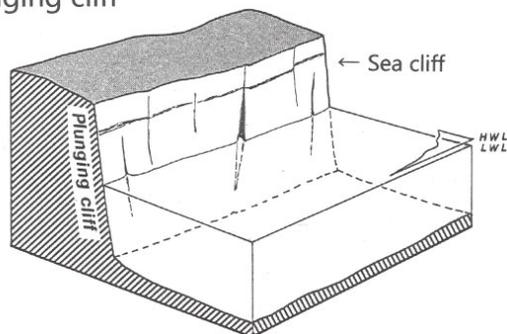
(a) Type-A shore platform



(b) Type-B shore platform



(c) Plunging cliff



Sunamura, 2015

## Cos'è una costa alta rocciosa?

**Caratteristica fondamentale:** è un tratto di costa dove i processi erosivi non sono reversibili.

Lo studio dei processi che modellano le coste alte, e l'acquisizione dei dati, è particolarmente complicato.

- (1) bassa velocità dei cambiamenti;
- (2) difficoltà nel misurare l'effetto del moto ondoso, l'energia trasmessa alla costa emersa e sommersa quando si innescano i fenomeni improvvisi di arretramento;
- (3) la difficoltà e spesso pericolosità nell'accesso alla zona da studiare per l'esplorazione;
- (4) investimenti nella ricerca insufficienti;
- (5) complessità geologica del sistema costiero dove si sovrappongono processi attuali che agiscono su strutture e forme acquisite in un passato non recente (da Griggs and Trenhaile, 1994, modificato).

## Obiettivi dello studio delle coste alte rocciose nell'ambito del progetto MAREGOT

### Perché studiarle

Rilevanza dei processi che agiscono sulle coste alte.



*Santa Catalina cliff (Puerto de Santa María-Portogallo) DelRio & Gracia, 2009.*



*Happisburg GB, British Geological Service*

### Come studiarle

Elaborazione di una metodologia per il rilevamento e la caratterizzazione delle coste alte rocciose soggette a erosione e instabilità per individuare le diverse suscettività al dissesto.

Integrazione tra diversi metodi di indagine: Rilevamento multidisciplinare e *multi-scaling* (geologico-strutturale, geomorfologico, idrogeologico, geomeccanico) e tecnologie avanzate.

Sviluppo di un database che consenta la confrontabilità dei dati.

## Obiettivi dello studio delle coste alte rocciose nell'ambito del progetto MAREGOT

### Perché studiarle

Rilevanza dei processi che agiscono sulle coste alte.



*Example of rock fall before (a) and after (b) the development of the failure plane in response to a large sea storm (January 1999). The rock mass movement involved two free falling blocks with two different detachment surfaces on the cliff (1 and 2).*

*Andriani & Walsh, 2007*



*Santa Caterina di Pittinuri*



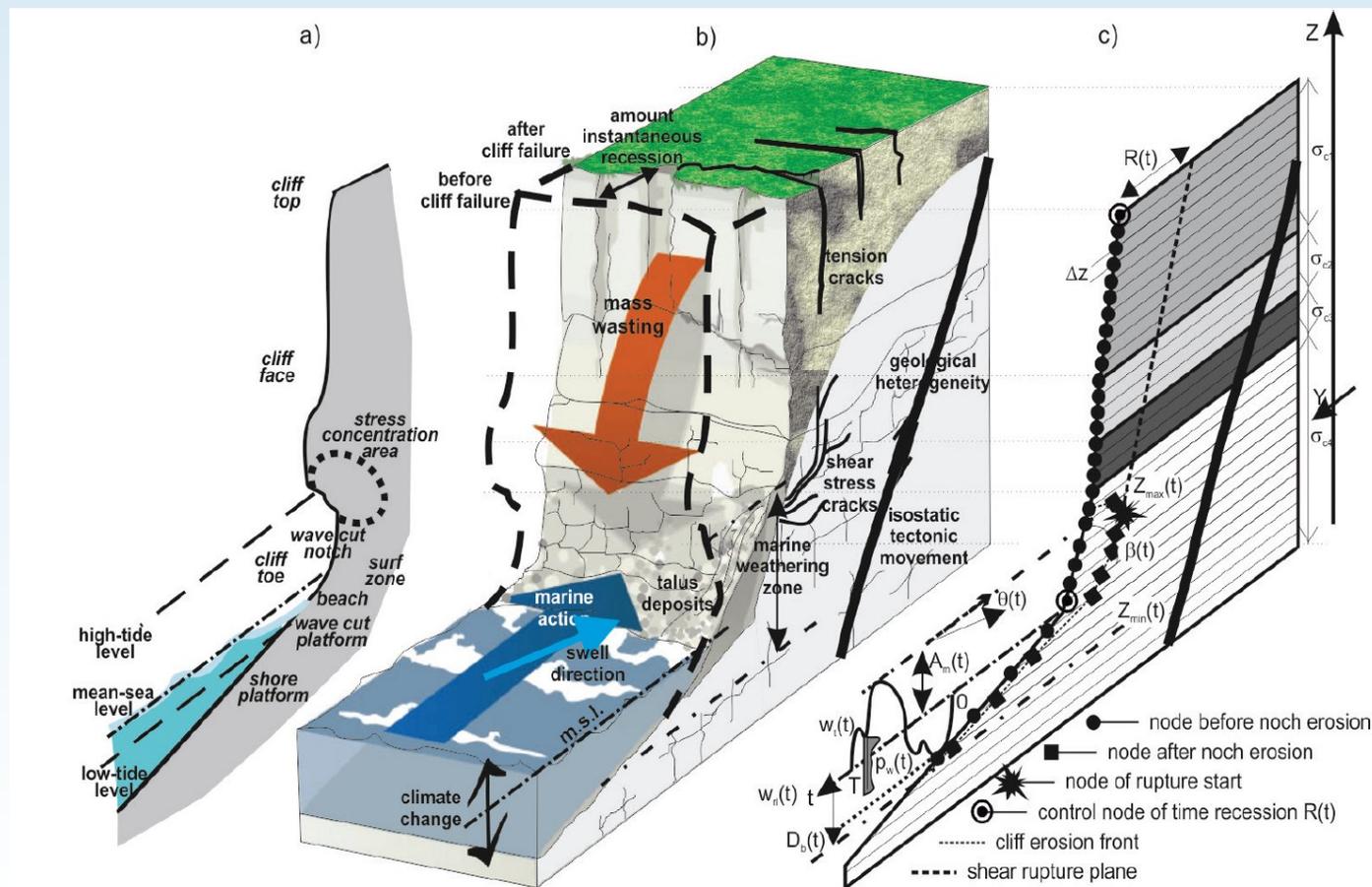
## Elementi che condizionano l'evoluzione delle coste

Evoluzione attuale:

*Interazione tra fenomeni "terrestri" e fenomeni "marini"*

L'instabilità delle pareti rocciose costiere è legata ai seguenti fenomeni di modifica della struttura mineralogica, petrografica e strutturale delle rocce:

- processi di alterazione e *weathering* dovuti alla presenza dell'acqua anche ricca di componenti saline provenienti dall'aerosol marino;
- processi di erosione, ossia asportazione di materiale disgregato sia ad opera dell'acqua che del vento;
- processi gravitativi, in particolare frane;
- processi di arretramento delle falesie per modifica del solco di battente e della piattaforma di abrasione emersa e sommersa;
- effetto delle acque sotterranee sull'indebolimento della resistenza meccanica delle rocce.

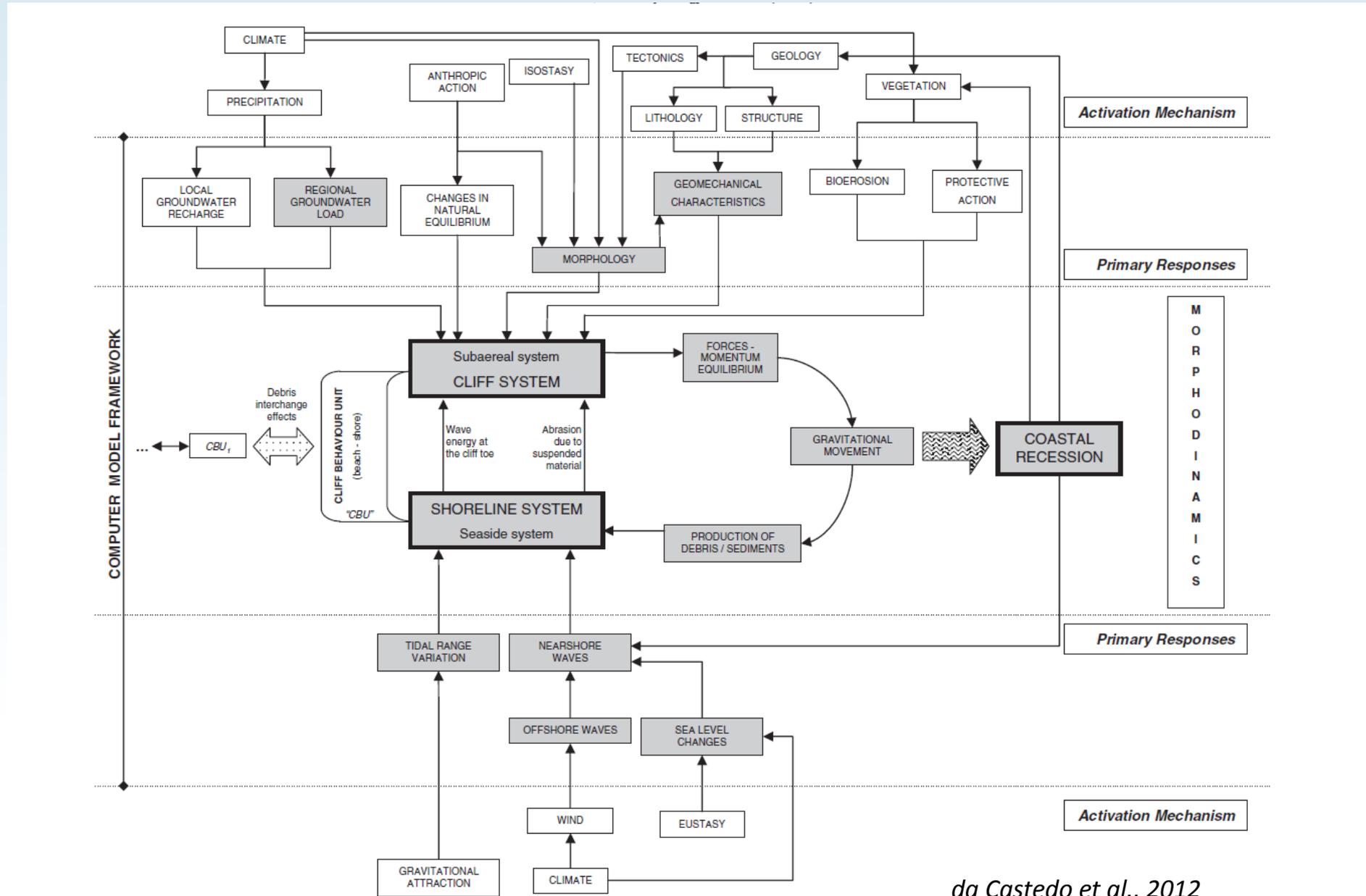


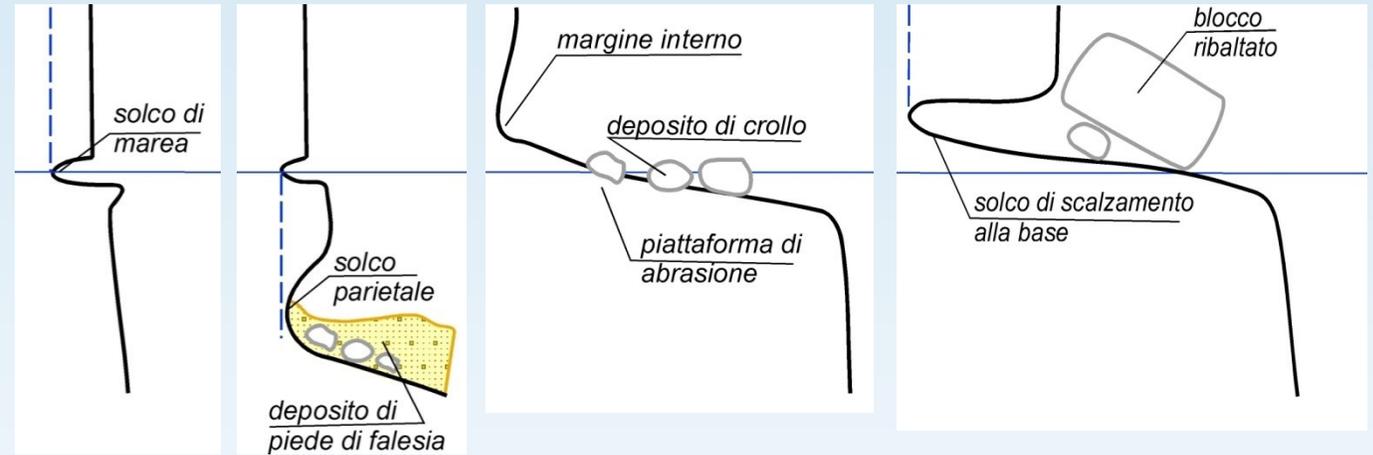
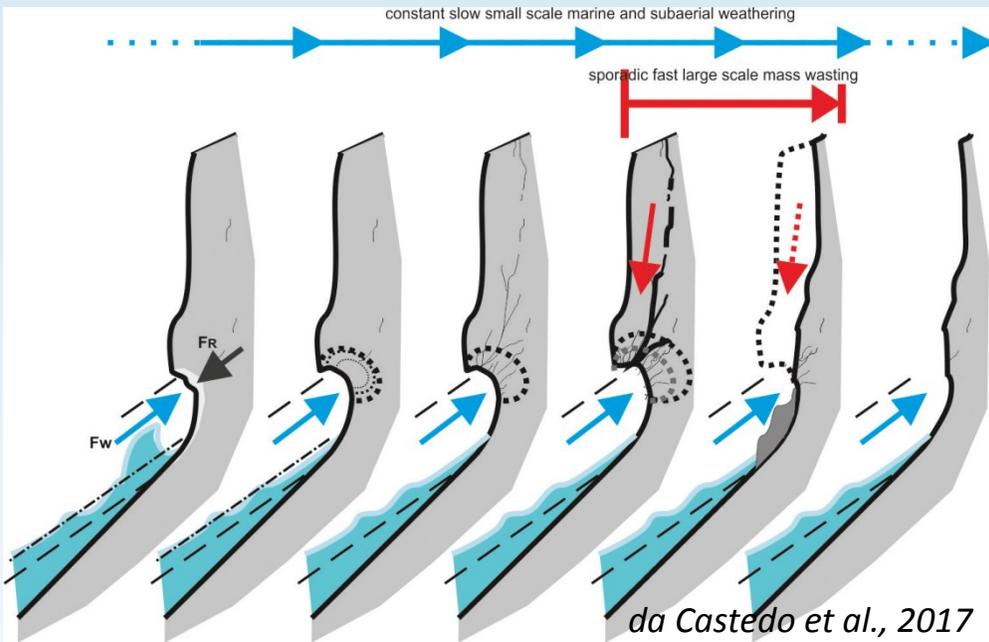
Blocco diagramma di una falesia: (a) aspetti morfologici di una falesia; (b) unità costiera omogenea (CBU), che presenta condizioni geologiche ed oceanografiche omogenee; (c) discretizzazione di una sezione litorale su falesia con gli elementi principali coinvolti, da (Castedo et al., 2017).

# Elementi che condizionano l'evoluzione delle coste

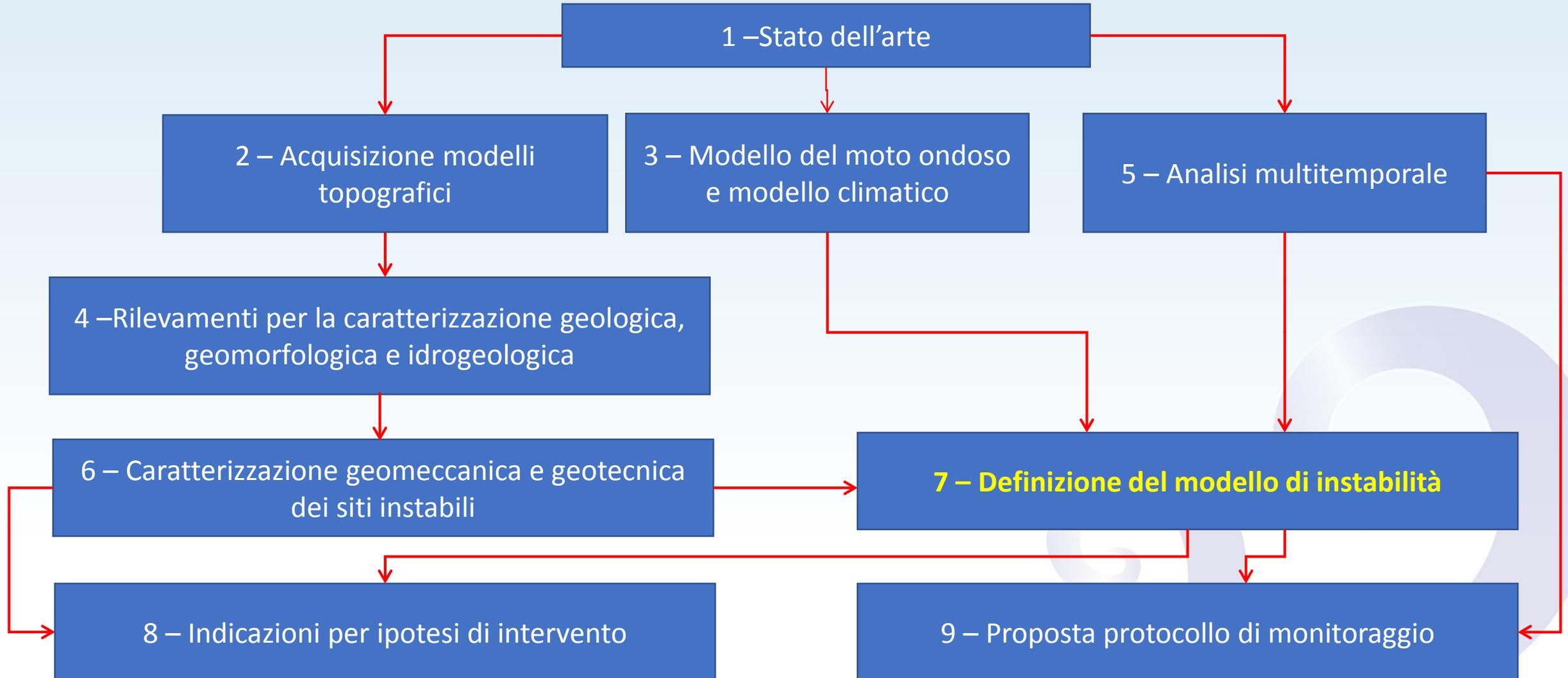
Evoluzione attuale:

*Interazione tra fenomeni "terrestri" e fenomeni "marini"*





## PROTOCOLLO D'INDAGINE DELLE COSTE ROCCIOSE

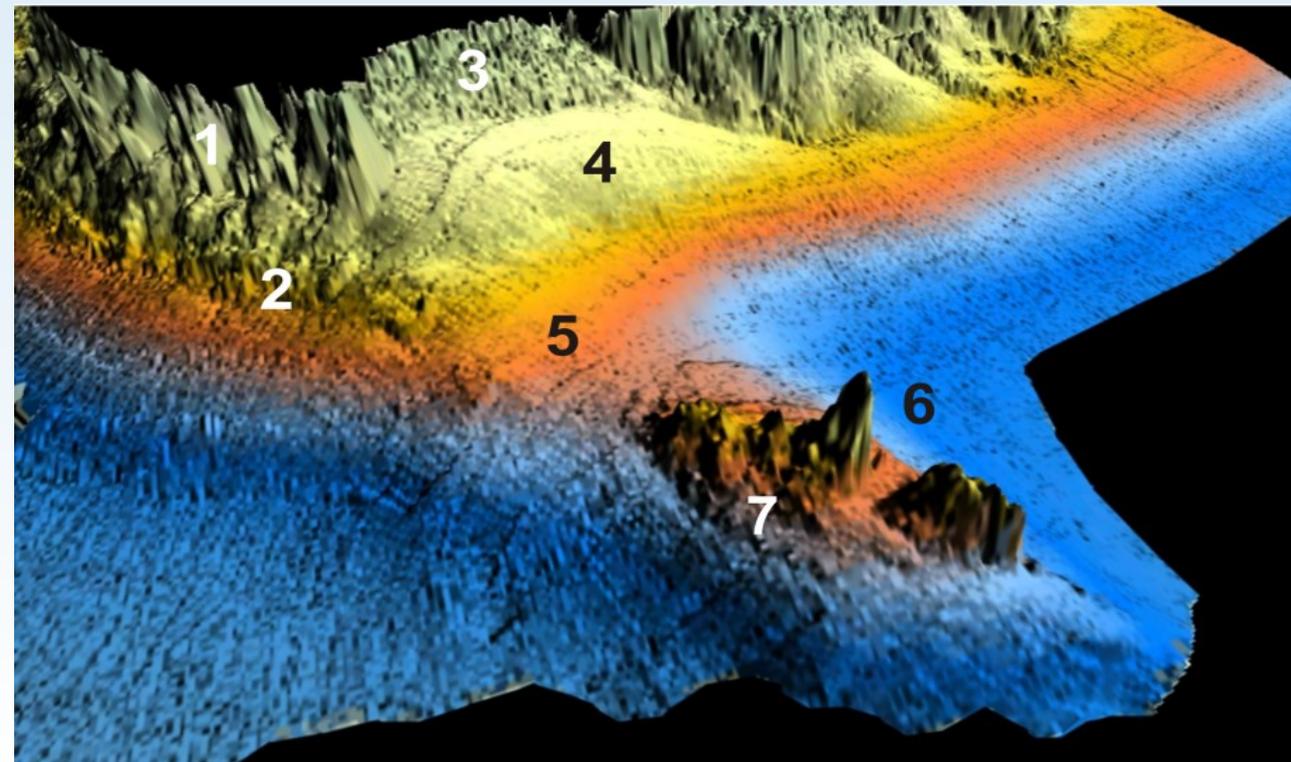
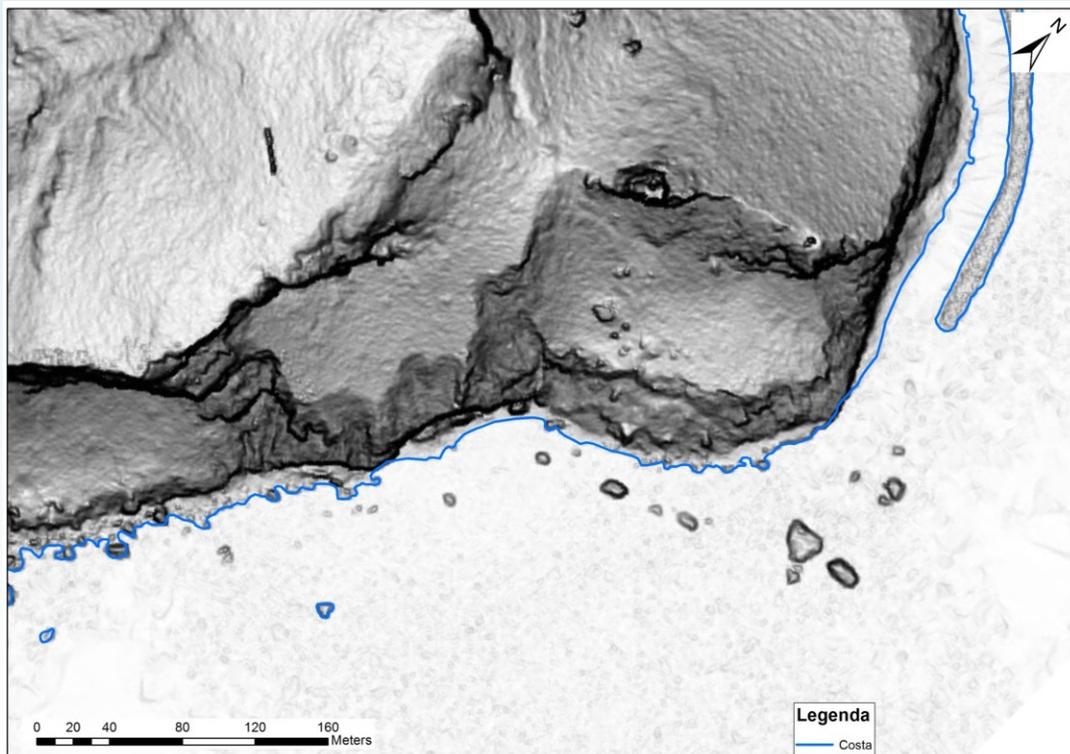


## PROTOCOLLO D'INDAGINE DELLE COSTE ROCCIOSE

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

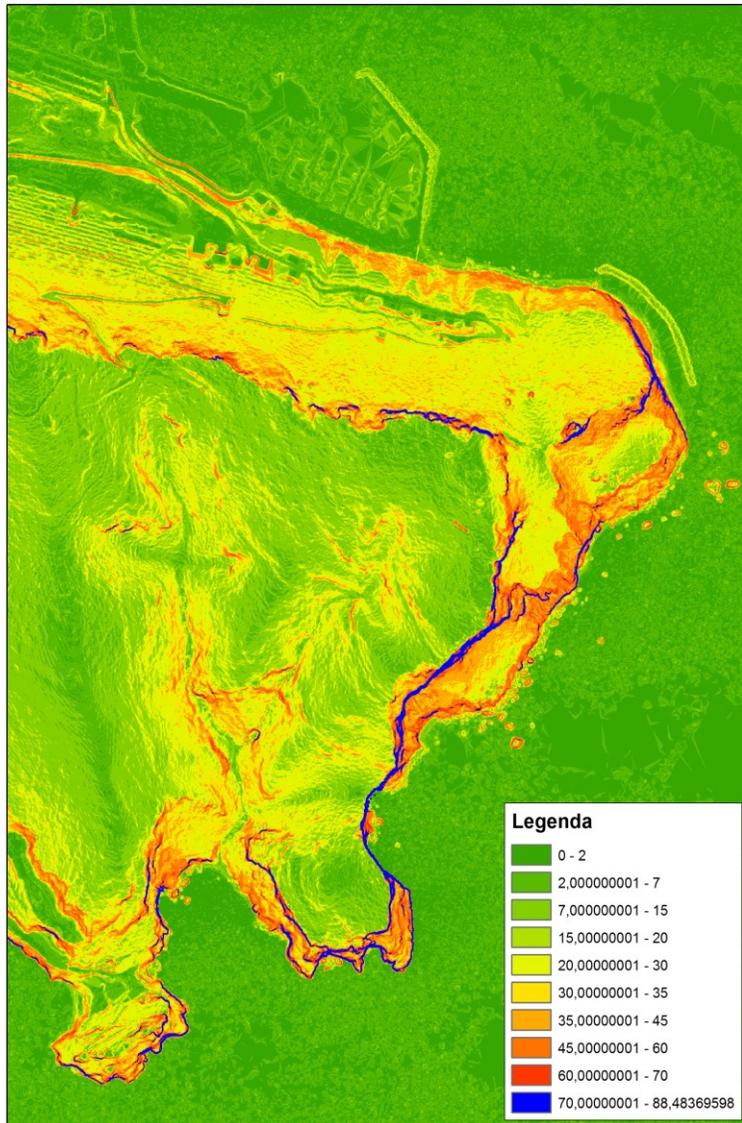
*Sintesi delle indagini e dei prodotti tecnici da realizzare per l'indagine alla scala locale dei tratti di costa che presentano una **propensione allo sviluppo di fenomeni franosi***

## 2 – Acquisizione modelli topografici

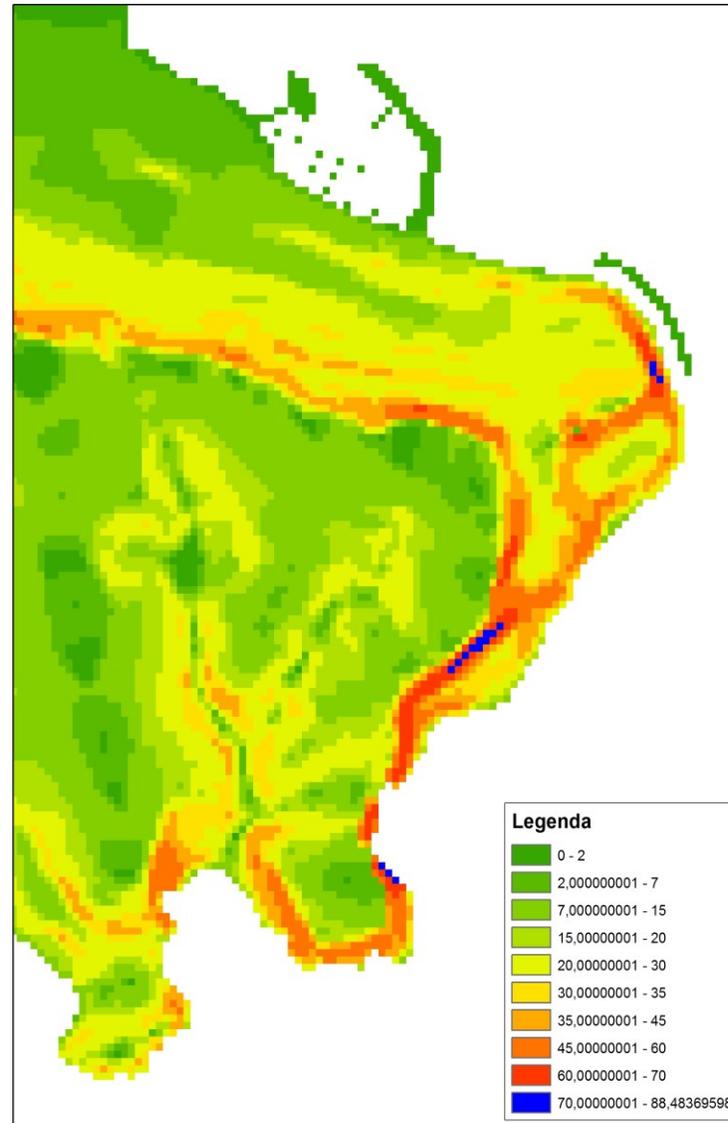


## 2 – Acquisizione modelli topografici

1 m



10 m



### Accuratezza del modello

Dato il reale assetto topografico della maggior parte dei versanti dell'isola, il gruppo di lavoro ha potuto verificare che l'utilizzo del **DTM a 10 m** porta con sé una significativa approssimazione nella determinazione della pendenza percentuale delle aree a pendenza più elevata, con una approssimazione in certi casi importante.

Di seguito è riportato il confronto tra le carte elaborate da DTM a 1 m e 10 m per l'area della Sella del Diavolo di Cagliari, dove sono presenti delle pareti rocciose verticali o sub-verticali.

### 3 – Modello del moto ondoso e modello climatico

Un modello semplificato di valutazione dell'effetto delle onde sulla instabilità delle coste alte è quello proposto da Sunamura (1992) e Budetta et al. (2000).

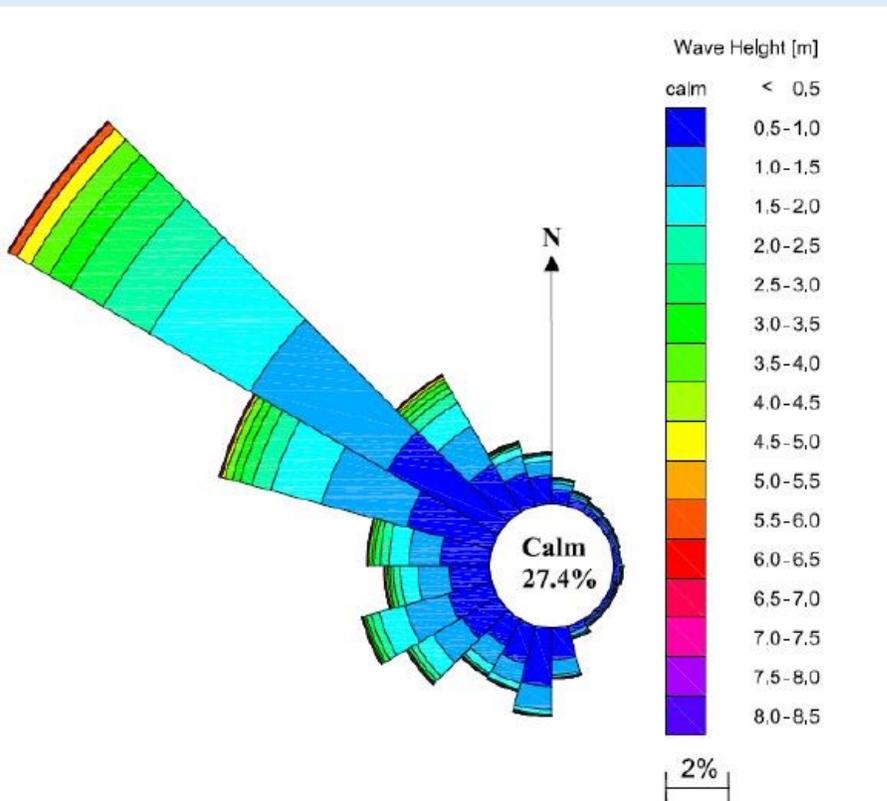


Diagramma a rosa del clima ondometrico RON a largo di Alghero (Sulis & Annis, 2014)

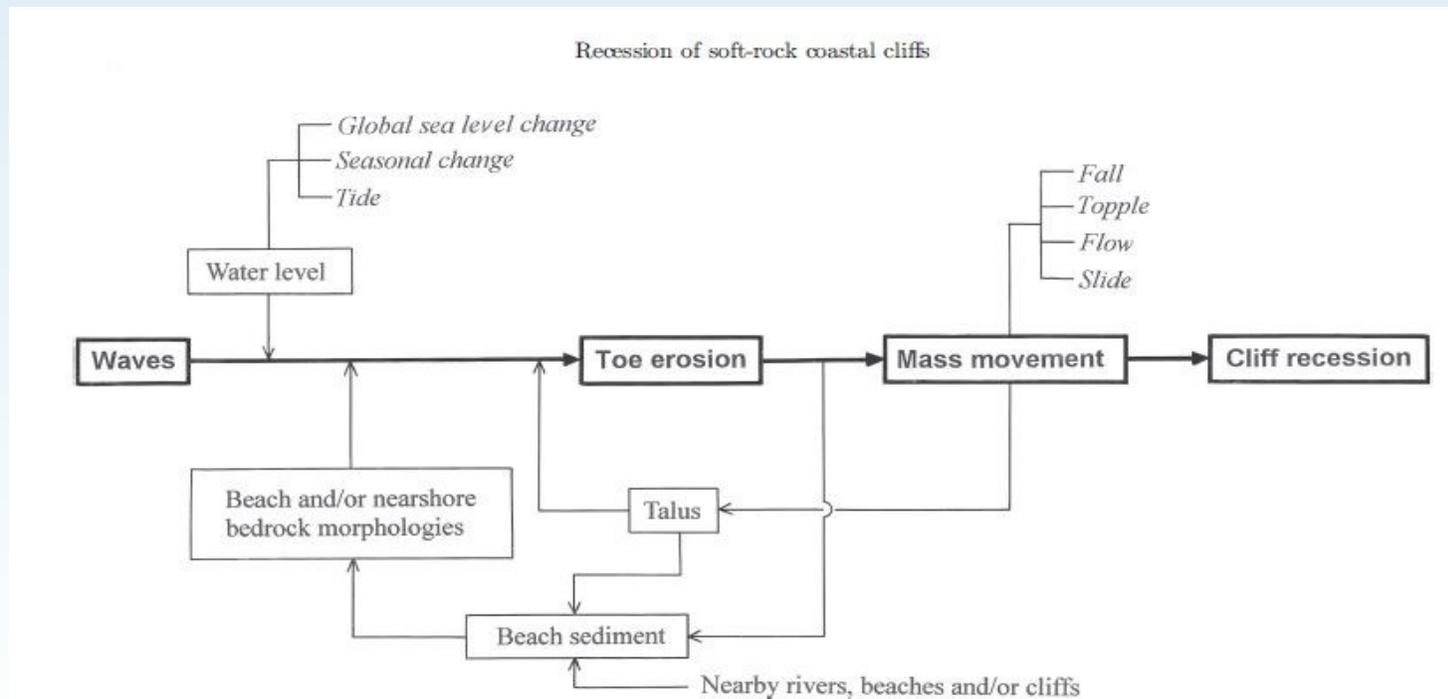


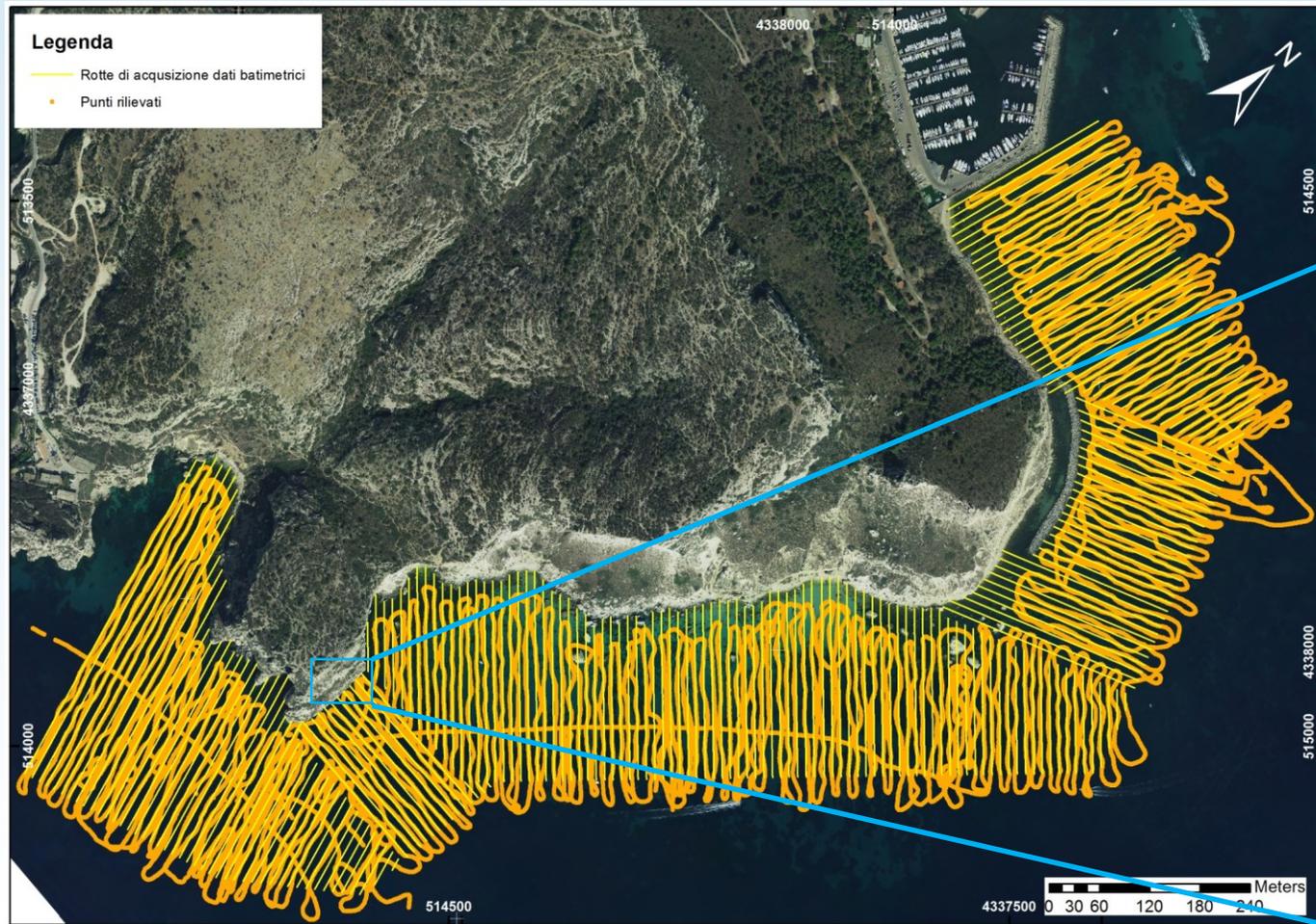
Fig. 2. The interaction of controlling factors for the toe erosion of sea cliffs. Modified from Sunamura.<sup>1)</sup>

Vulnerability Index (VI) as a function of offshore (real) waves

$$VI = \frac{F_W}{F_R} = \frac{A \rho g H_{bs}}{B \sigma_c}$$

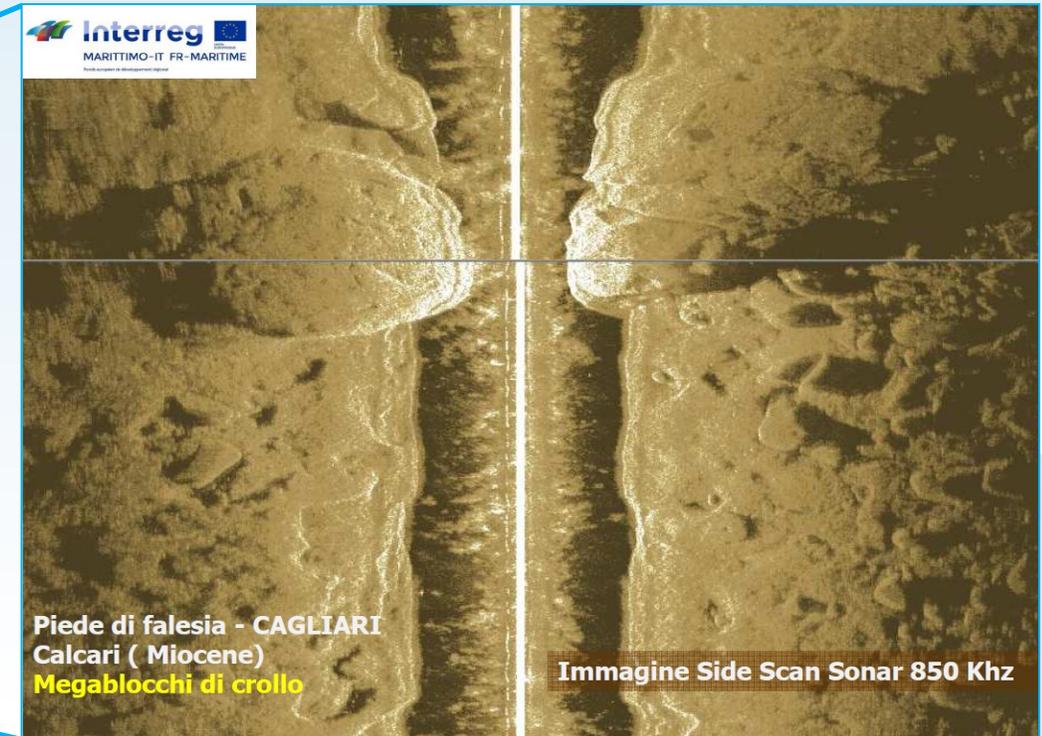


## 4 –Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi



Sella Del Diavolo

RILIEVO SIDE SCAN SONAR DEL SETTORE SOMMERSO



Piede di falesia - CAGLIARI  
Calcari ( Miocene)  
Megablocchi di crollo

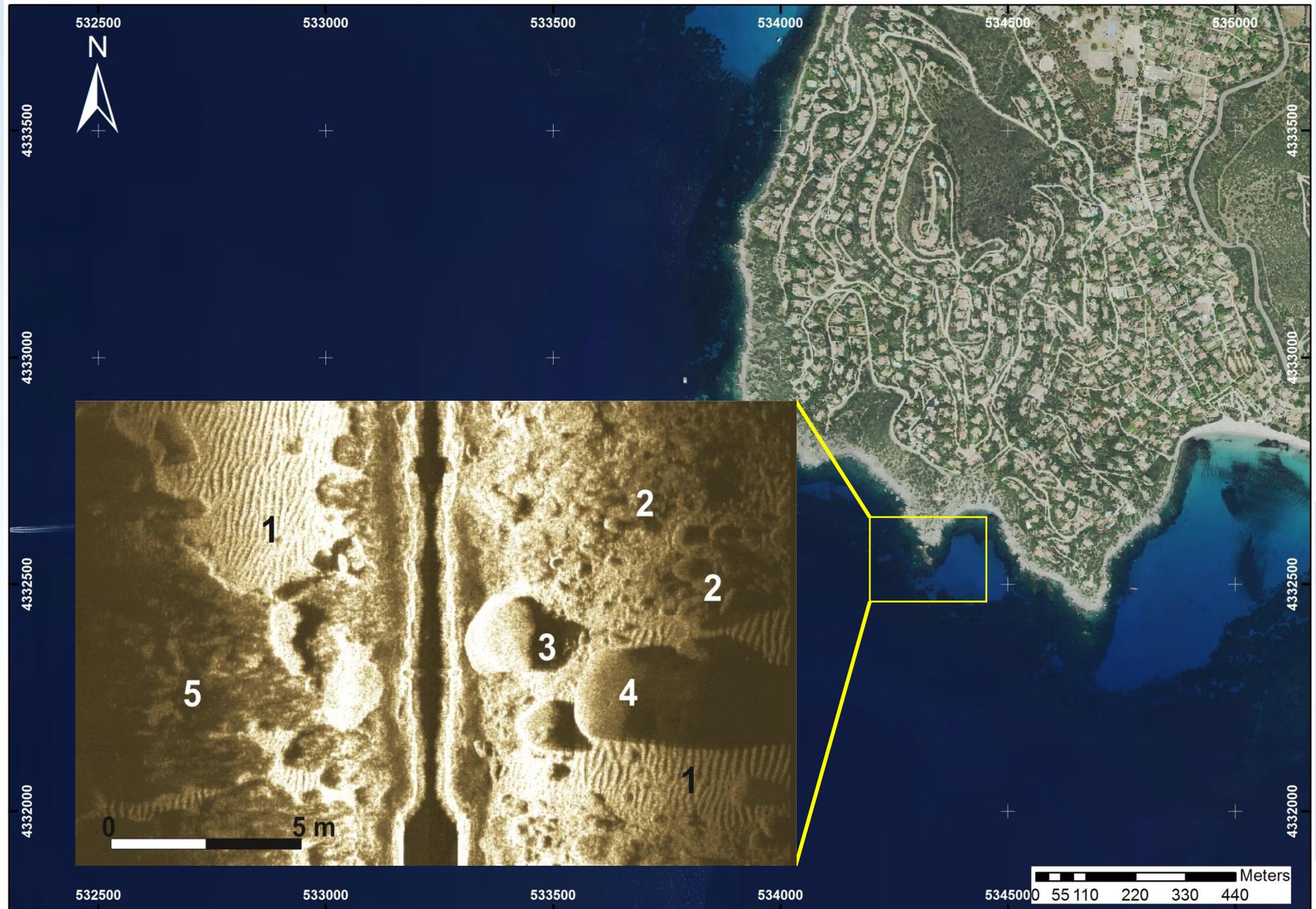
Immagine Side Scan Sonar 850 Khz

Rotte ortogonali alla costa, equidistanti 20 metri e fino a 250 metri a largo

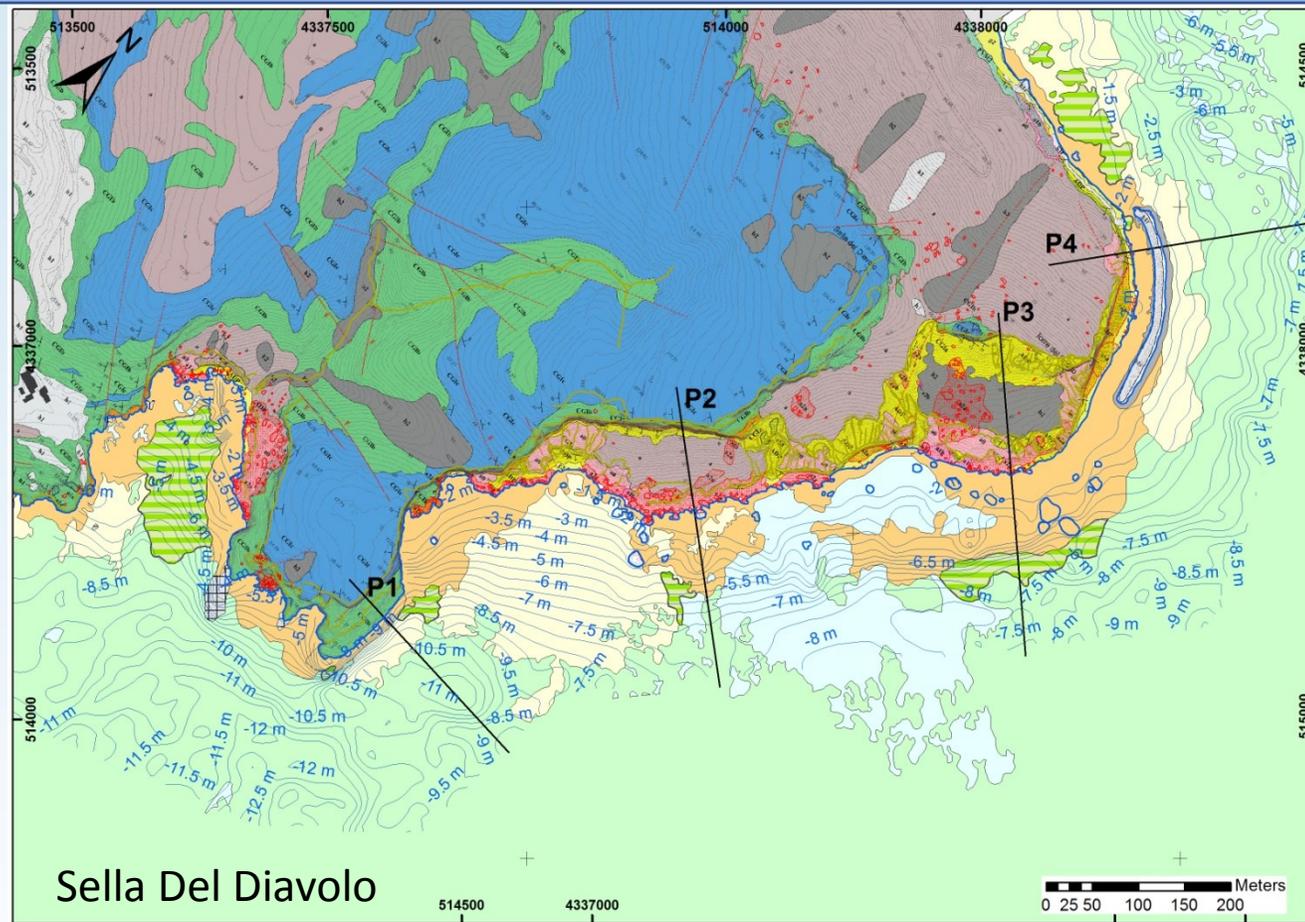
## 4 – Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi

### Torre delle Stelle

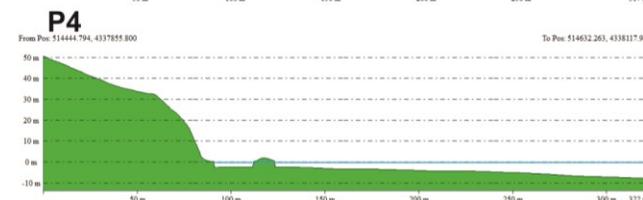
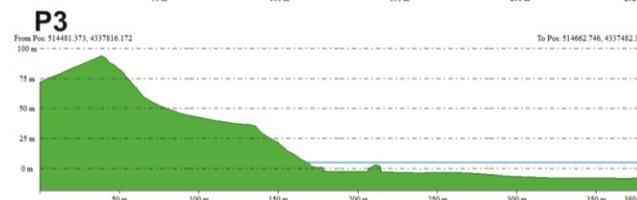
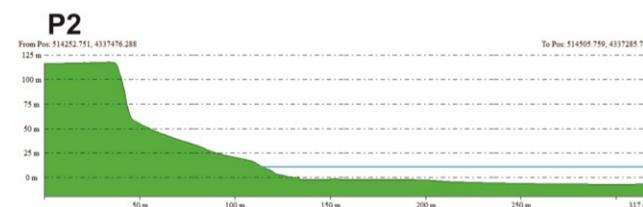
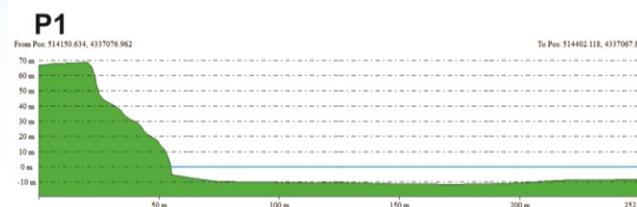
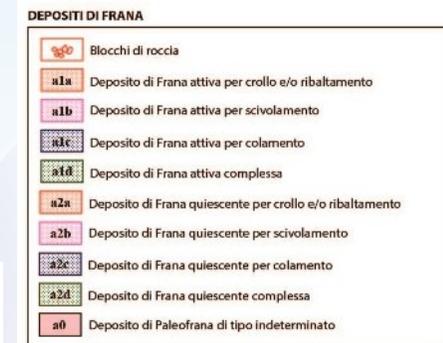
- 1) Strutture sedimentarie a megaripples ( $\lambda = 0,5 \div 1$  m);
- 2) Deposito di frana elaborato dalla dinamica marina;
- 3) Blocchi di frana ( $d=4$  m,  $h=3$  m);
- 4) Blocchi di frana ( $d=6$  m,  $h=5$  m);
- 5) Posidonia oceanica su piattaforma di abrasione marina.



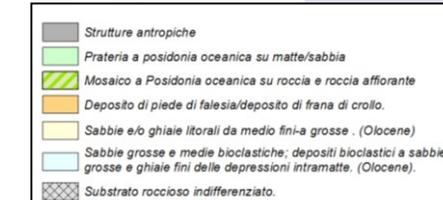
## 4 – Rilevamenti per la caratterizzazione geologica dei settori emersi e sommersi



### SETTORE EMERSO



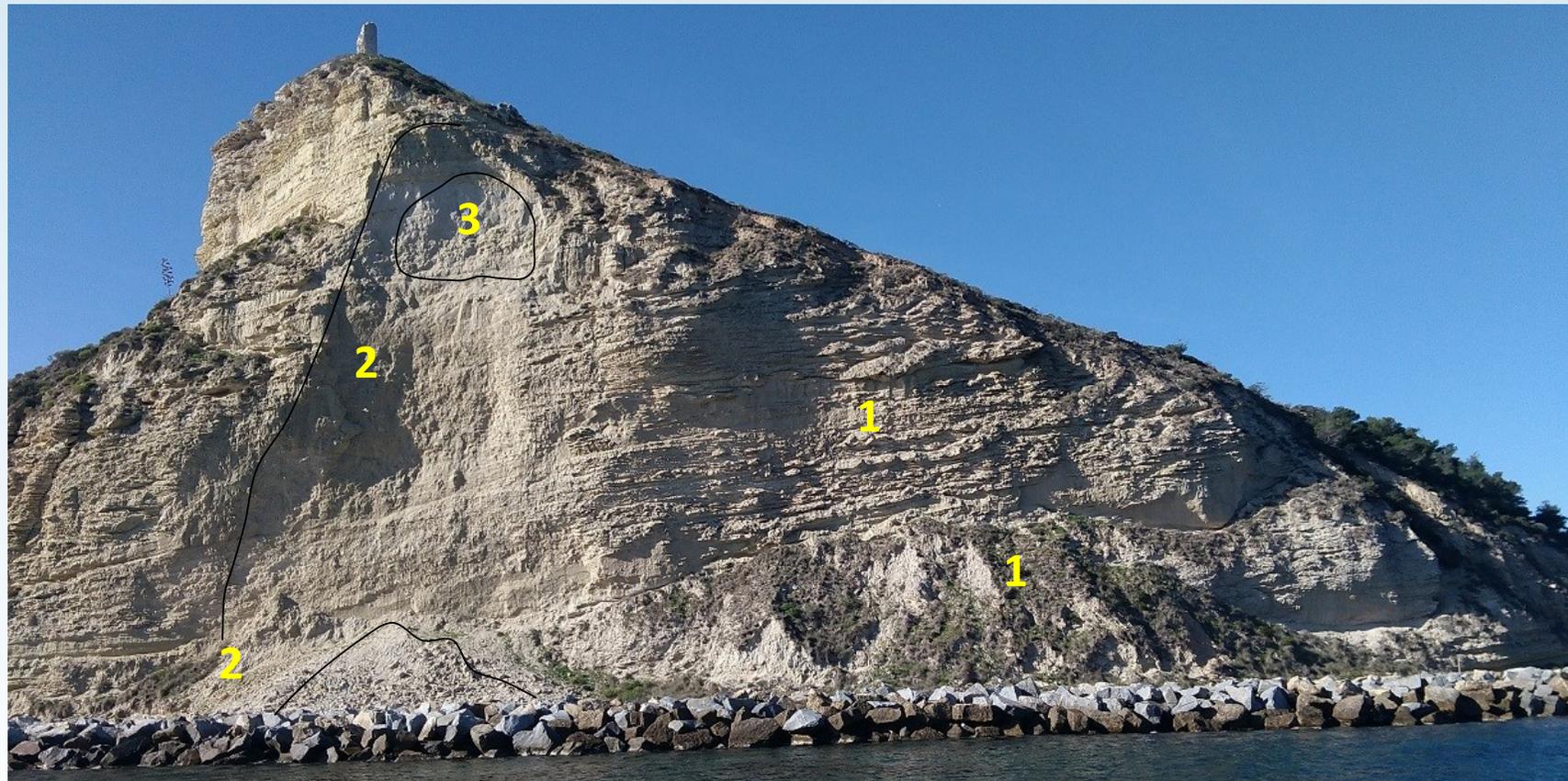
### SETTORE SOMMERSO



## 5 – Analisi multitemporale



## 5 – Analisi multitemporale



*Depositi di frana di crollo località Marina Piccola: 1) nicchie di distacco alterate e deposito colonizzato dalla vegetazione evolutasi tra 1940 e 1950; 2) nicchia di distacco e deposito al piede della frana del 2/07/1987; 3) nicchia di distacco e deposito del 21/02/2017. In primo piano la barriera di massi protettiva messa in opera successivamente all'evento del 1987.*

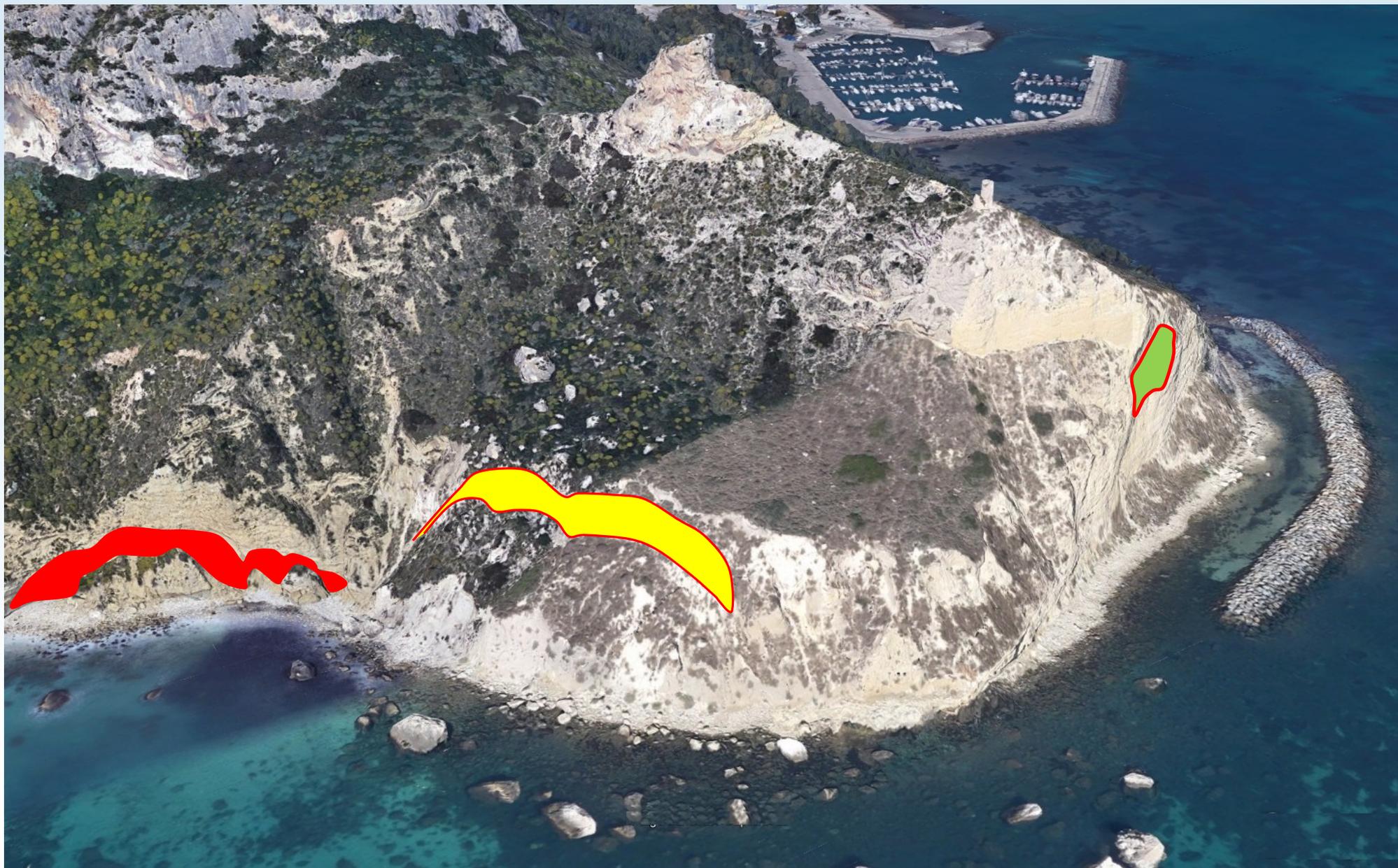
## 5 – Analisi multitemporale

La caratterizzazione accurata dell'assetto geologico permette di verificare la tendenza evolutiva e quindi meglio definire le aree potenzialmente maggiormente instabili.





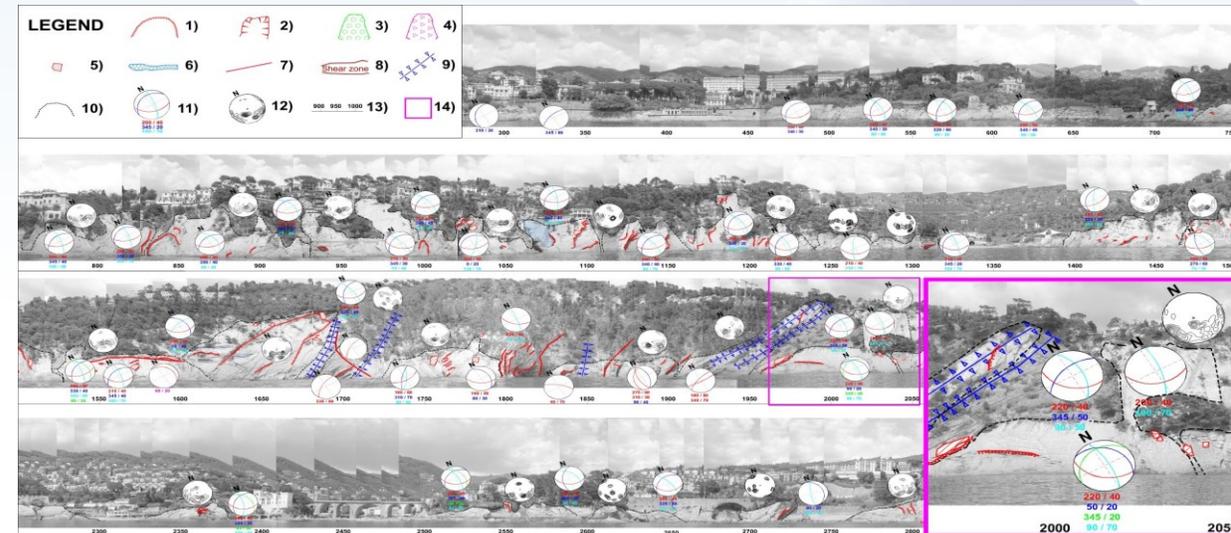
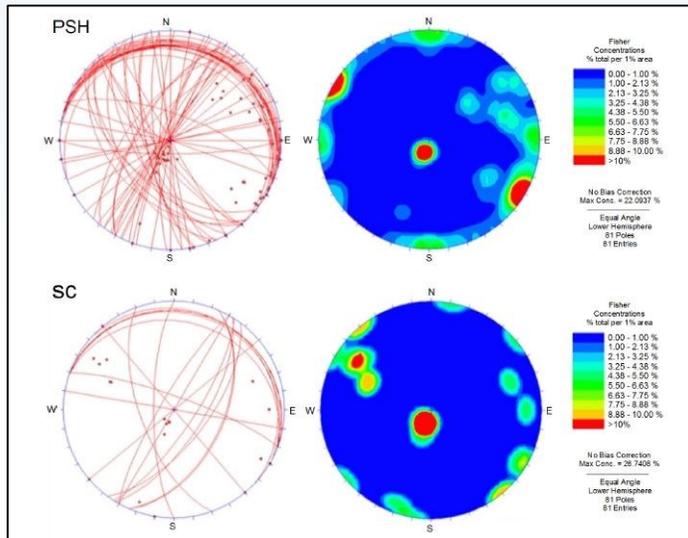
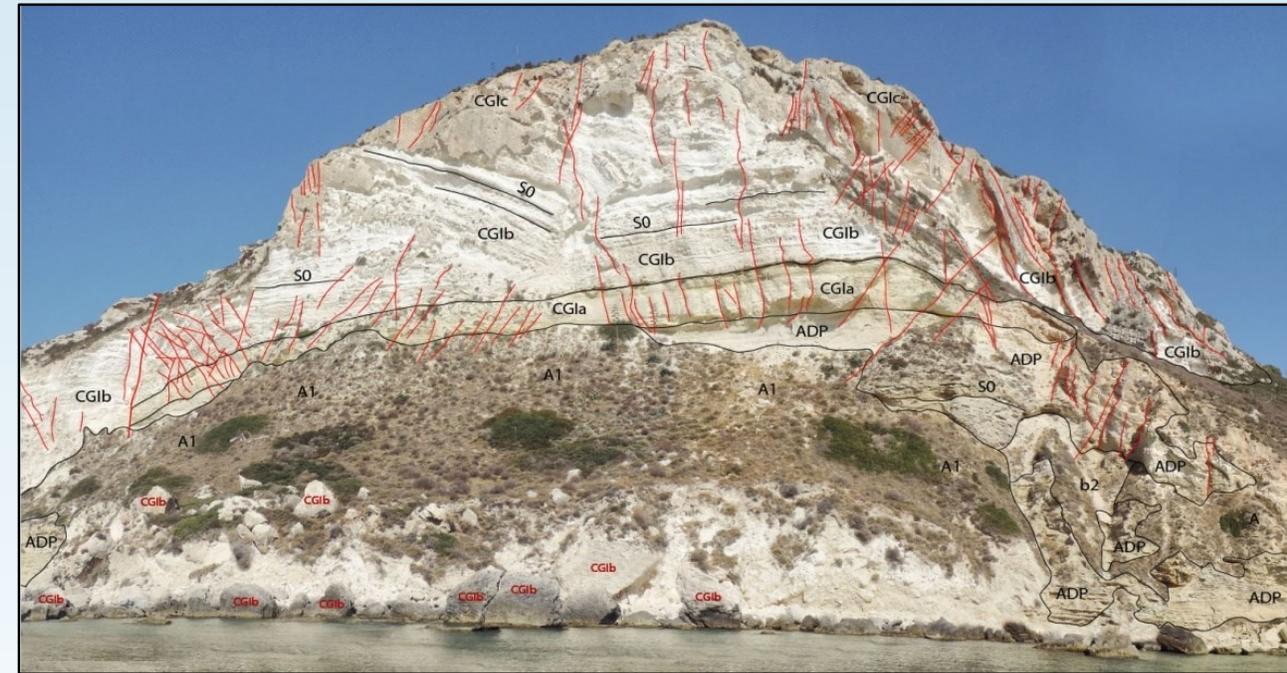




## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

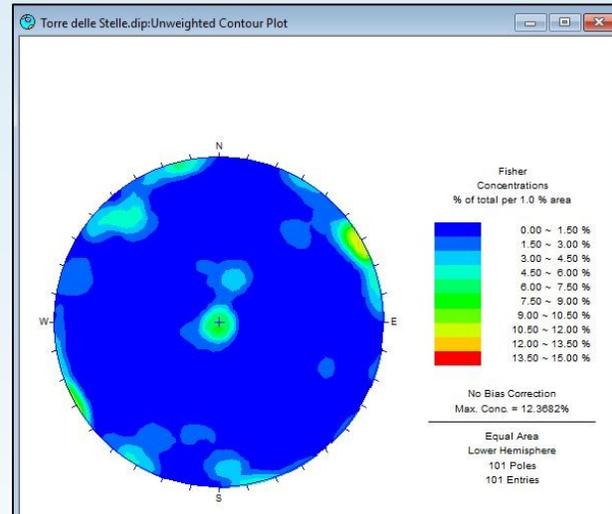
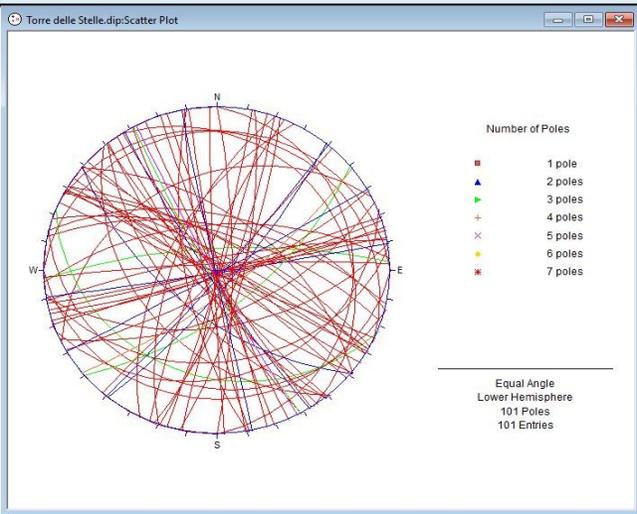
**CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE**  
(Discontinuità, angolo di attrito, coesione, volume di roccia unitario)

Intersezione	Giacitura		Semitracciata		Terminazione		JRC	Curvat.	Tipo	Apertura	Riempim.	
	D.i.	Incl.	Sotto/sin	Sopra/dx	Frattura	Finestra						
N	m	°	°	m	m	I.A.O.	T.I.C.**	1-20	mm	***	mm	****
1	0,10	N40	85	0,10	2,50	O	T	15	40	3	2	NO+Ca
2	0,20	N30	80	0,10	4,00	O	T	12	40	3	10	I
3	0,60	N42	85	0,10	0,50	I	C	13	20	3	1	NO+Ca
4	0,80	N50	85	0,20	0,45	I	C	12	20	3	1	NO+Ca
5	1,30	N52	83	0,16	0,10	I	C	10	10	3	1	NO+Ca
6	1,60	N28	82	0,50	4,00	O	T	12	30	3	5	Ca
7	2,00	N40	82	1,00	3,50	O	T	10	20	3	4	Ca
8	2,20	N50	82	0	2,00	I	C	14	30	3	3	Ca+I
9	2,40	N30	80	0	2,00	O	T	12	20	3	4	NO
10	2,70	N40	85	1,50	0,35	I	C	17	50	3	10	NO+Ca
11	3,25	N36	88	0,50	2,20	O	T	18	50	3	10	Ca+NO
12	3,60	N32	84	0,60	2,00	O	T	16	30	3	5	Ca+NO
13	4,00	N52	85	0	1,50	O	T	14	30	3	20	Ca+NO
14	4,90	N32	82	0,50	2,00	O	T	16	30	3	10	Ca+NO



## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

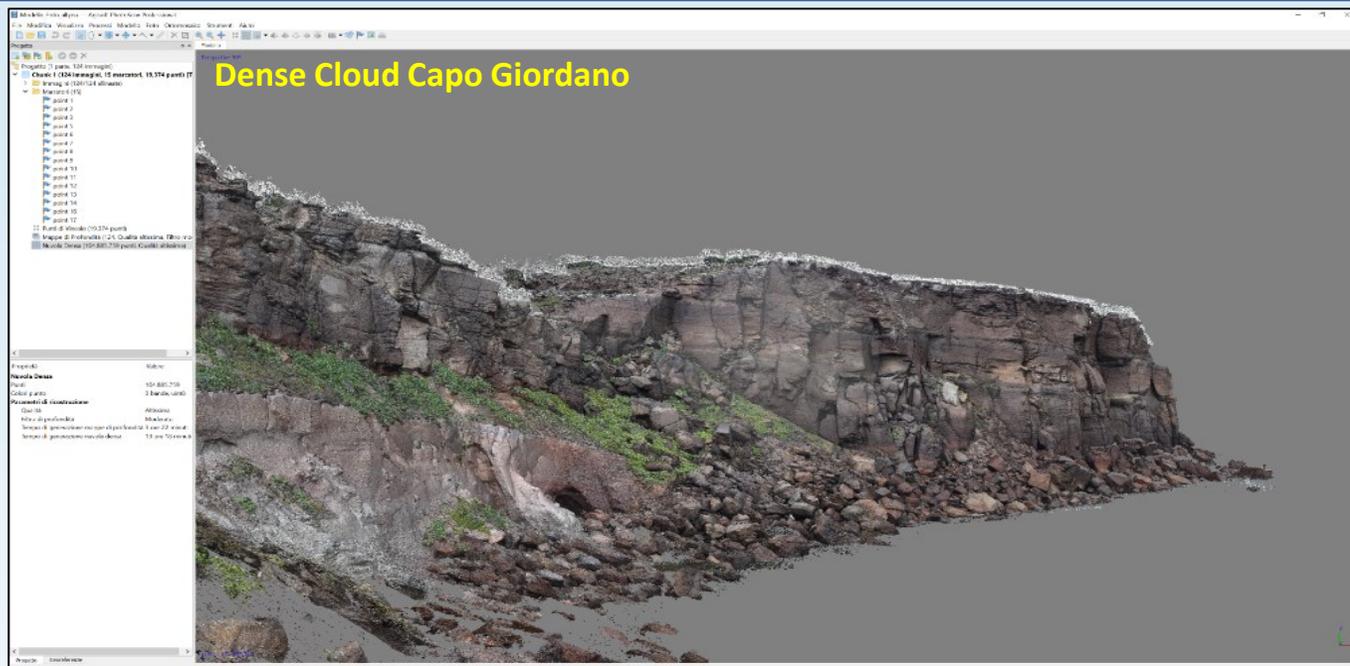
### RILIEVI GEOMECCANICI



## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

### RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO

Rilievo Laser Scanner Torre delle Stelle

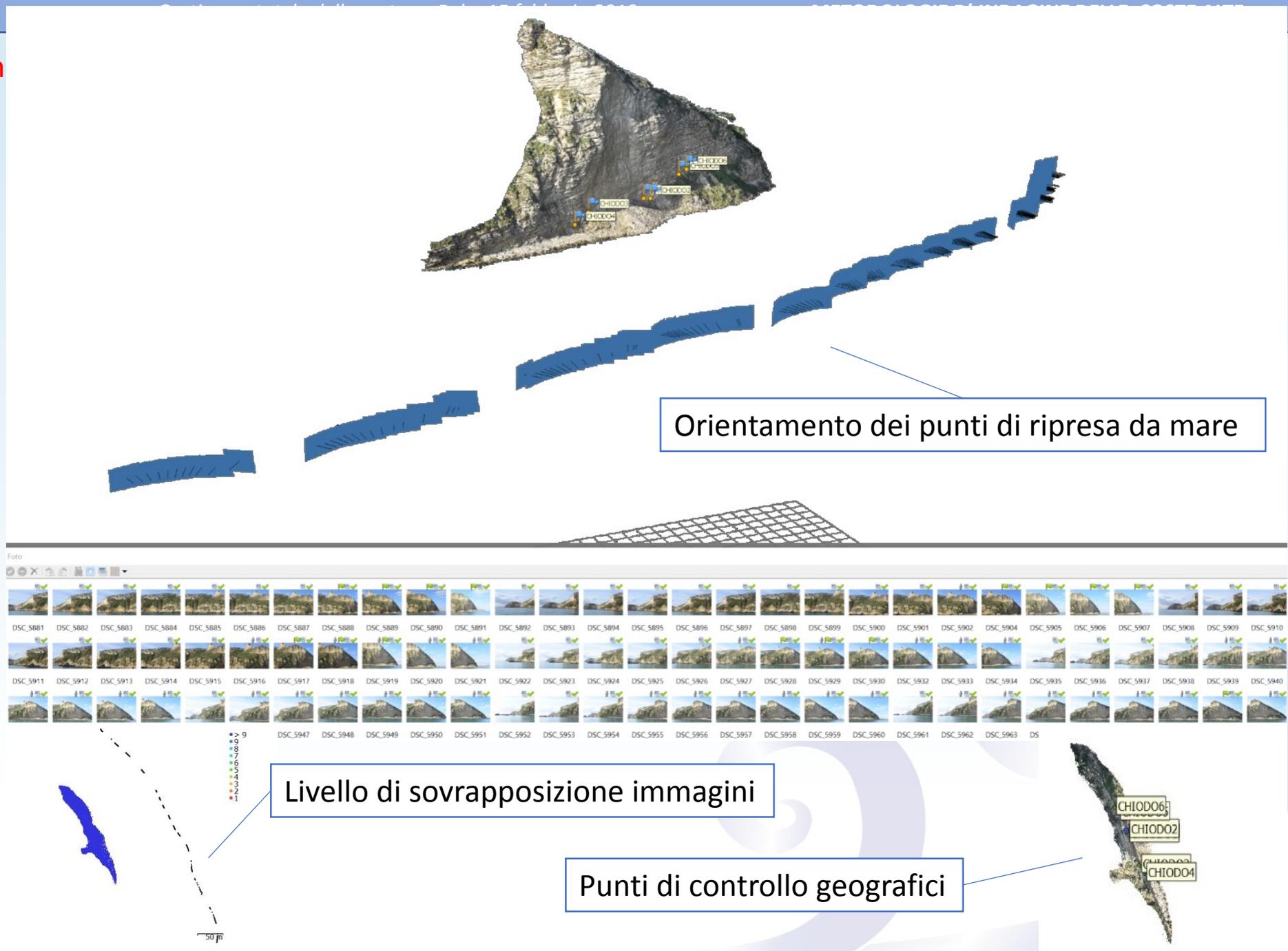


Rilievo Laser Scanner Capo Giordano



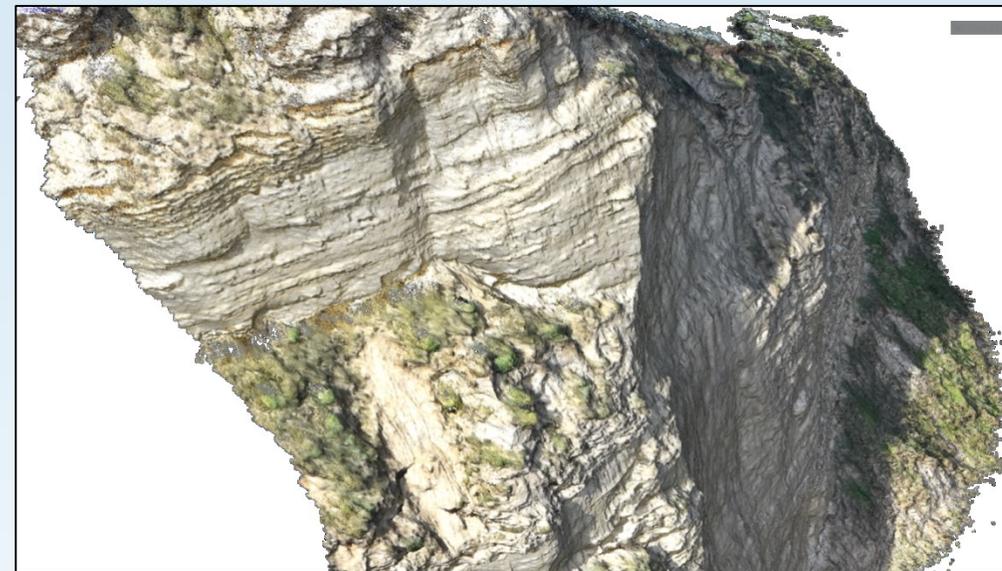
## 6 - Caratterizzazione geomeccanica

### RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO

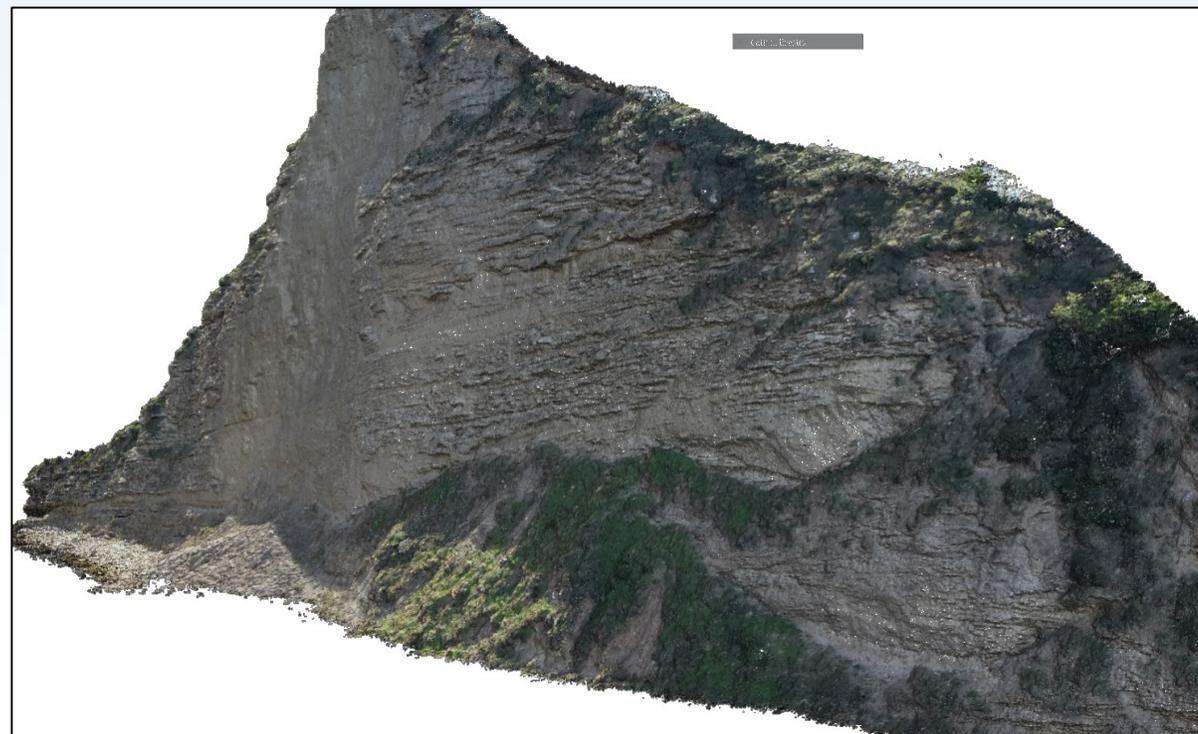


## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

### RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO



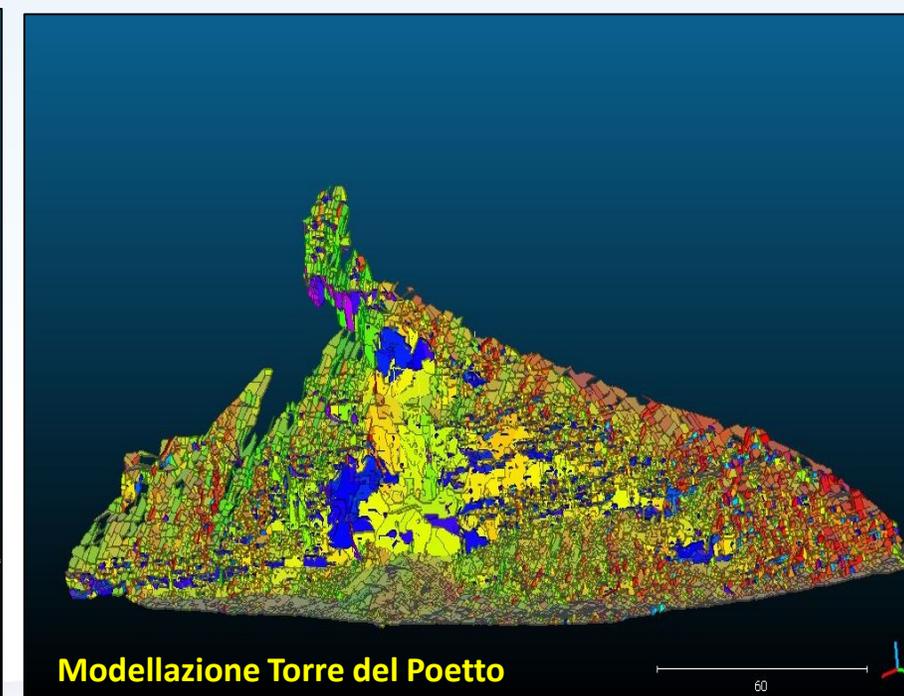
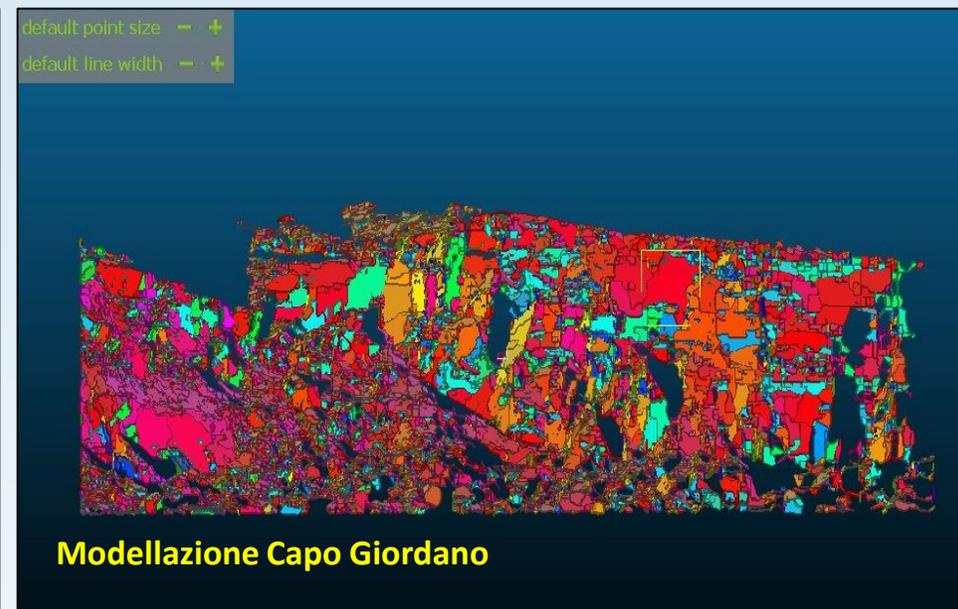
Visione in 3D della punti di vista  
ortogonali (Sella del Diavolo)



## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

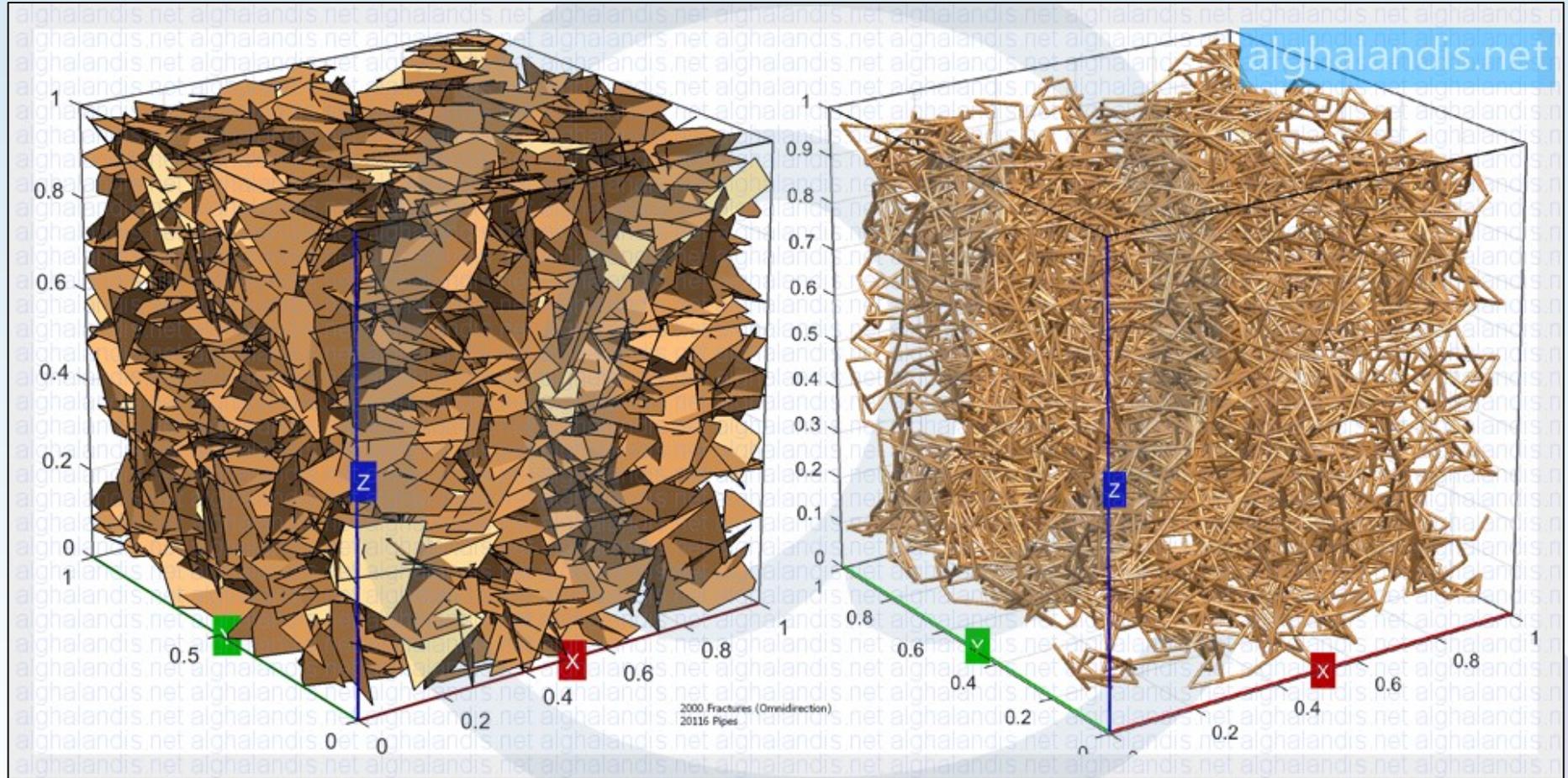
### RILIEVI GEOMECCANICI DA REMOTO

NUVOLA DI PUNTI E  
MODELLAZIONE DELLE  
SUPERFICI



## 6 - Caratterizzazione geomeccanica e geotecnica dei siti instabili

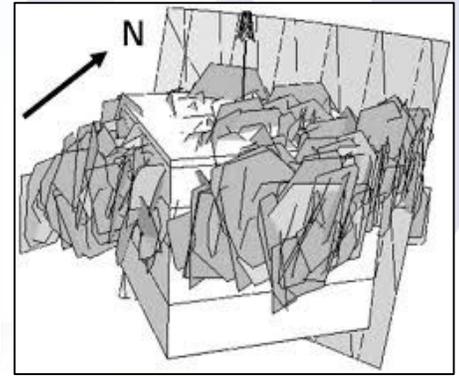
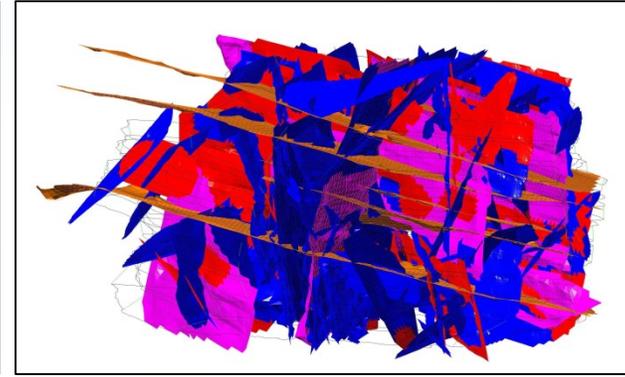
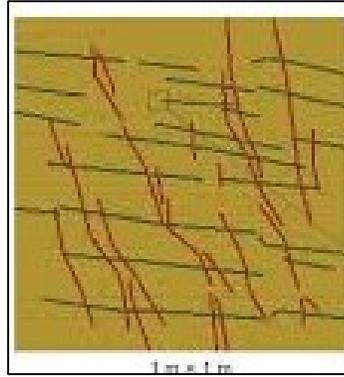
### Modellazione Geomeccanica DFN (Discrete Fracture Network)



Dershowitz and Herda, 1992

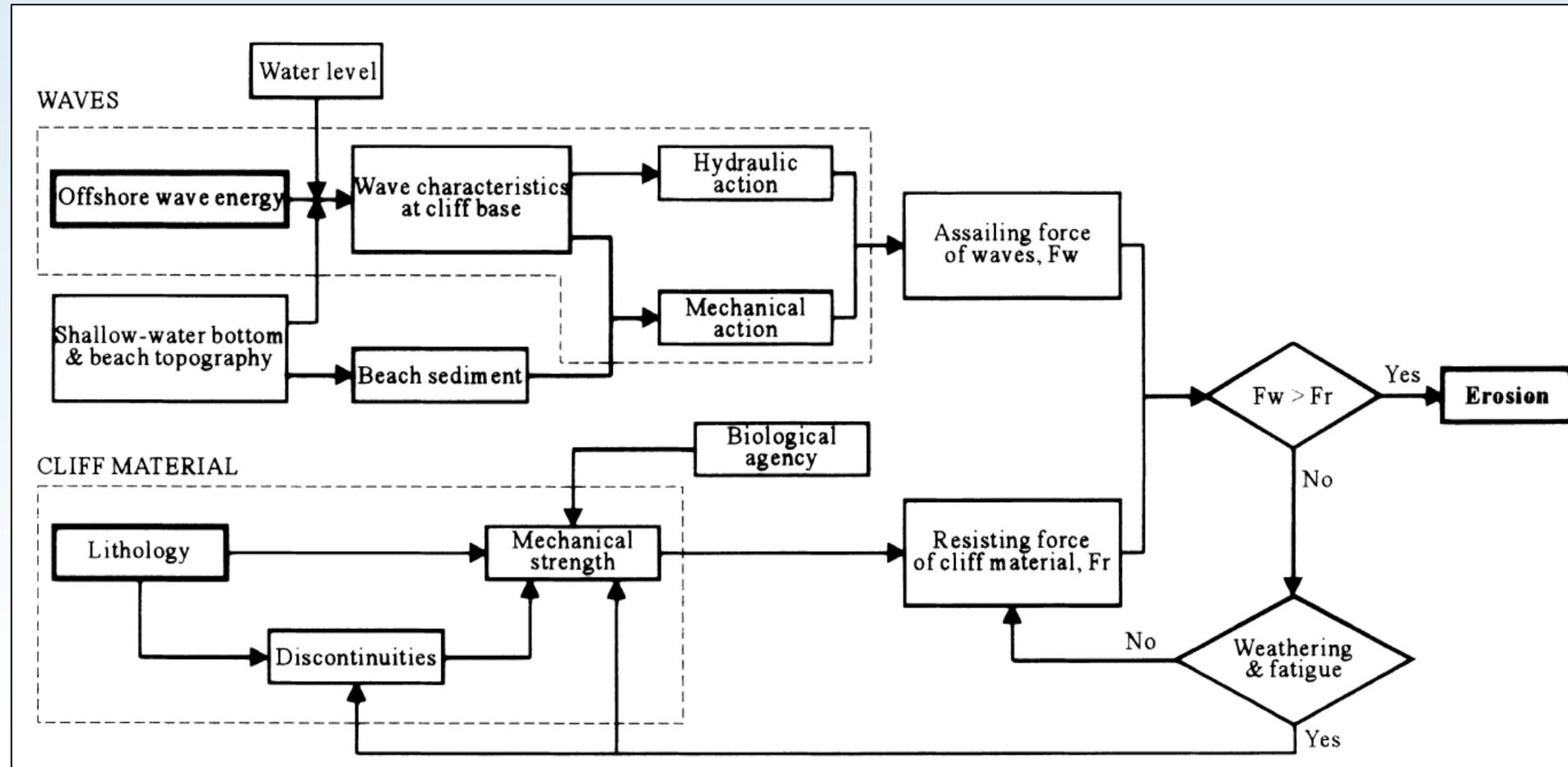
	0	1	2	3	
Dimension of Sampling Region	0	<b>P<sub>00</sub> Length<sup>0</sup></b> Number of Fracture Samples per Point Length of Rock Mass			POINT MEASURES
	1	<b>P<sub>10</sub> Length<sup>1</sup></b> Number of Fractures per Unit Length of Sampling Area (Linear Density)	<b>P<sub>11</sub> Length<sup>1</sup></b> Length of Fracture Intersections per Unit Length of Sampling Area (Linear Porosity)		LINEAR MEASURES
	2	<b>P<sub>20</sub> Length<sup>2</sup></b> Number of Fracture Centers per Unit Sampling Area (Area Density)	<b>P<sub>21</sub> Length<sup>2</sup></b> Length of Fractures (Fracture per Unit Sampling Area (Linear Porosity))	<b>P<sub>22</sub> Length<sup>2</sup></b> Area of Fractures per Unit Sampling Area (Area Porosity)	AREAL MEASURES
	3	<b>P<sub>30</sub> Length<sup>3</sup></b> Number of Fracture Centers per Unit Rock Volume (Volume Density)	<b>P<sub>31</sub> Length<sup>3</sup></b> Length of Fractures per Unit Volume of Rock (Volume Porosity)	<b>P<sub>32</sub> Length<sup>3</sup></b> Area of Fractures per Unit Volume of Rock (Volume Porosity)	VOLUMETRIC MEASURES

DENSITY ← INCREASING → POROSITY



## Elaborazione dei dati

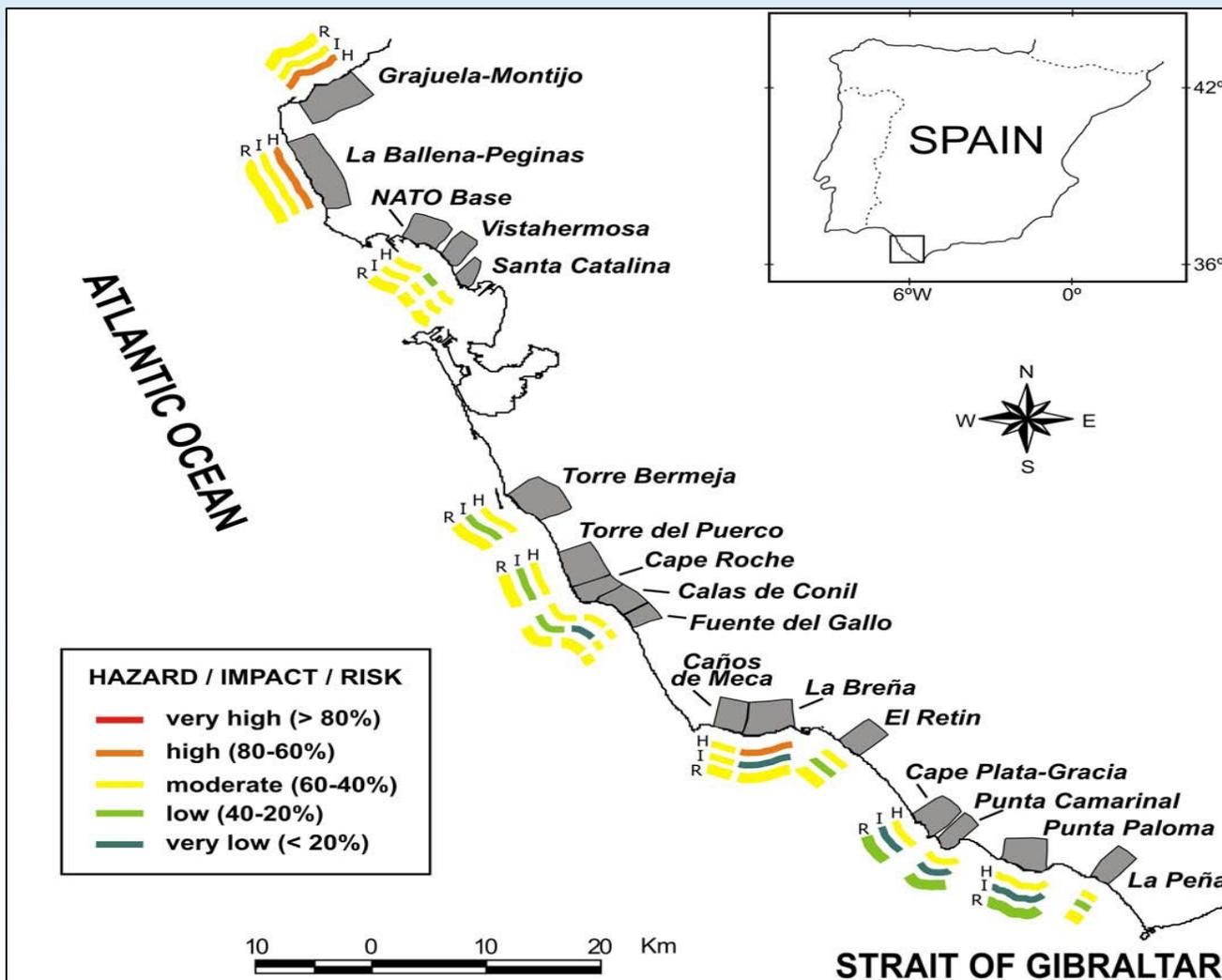
### Modelli erosionali + Analisi di stabilità integrate (equilibrio limite, FEM, DFN, ecc.)



*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).*

## Elaborazione dei dati

### Metodi semi-quantitativi



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.

Fattori naturali considerati: 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

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.

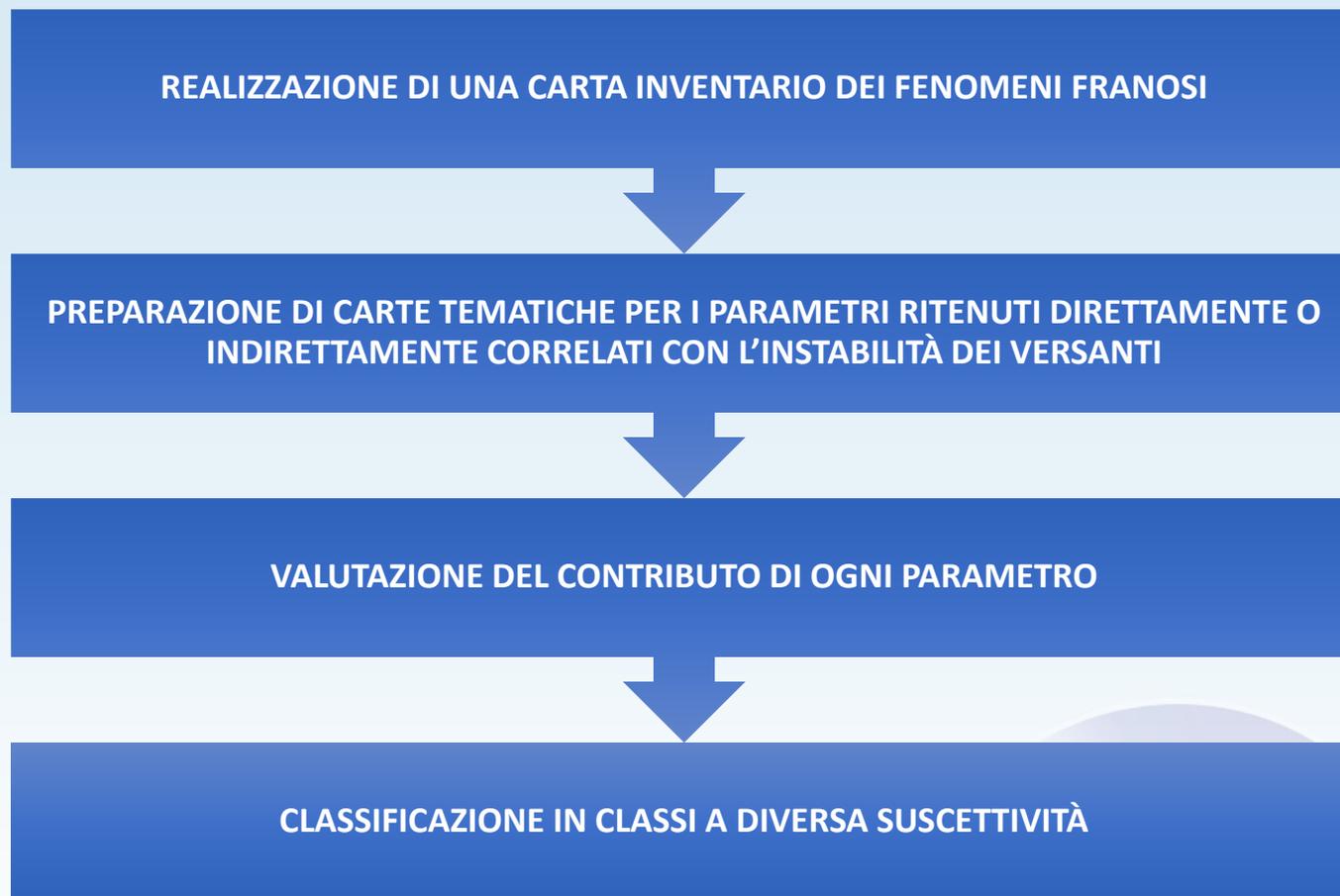
## Elaborazione dei dati

### Metodi probabilistici

#### Metodo del Certainty Factor (CF)- Fattore di Certezza:

metodo diretto statistico di tipo probabilistico

- Limita alcuni eccessi dell'approccio euristico tipici della geologia, ma conservandone la filosofia;
- Quantifica il peso dei diversi fattori geologici.



L'assunto di partenza sta nel fatto che la combinazione dei diversi fattori responsabili del franamento nel passato, possa essere estesa a zone non interessate da frane ma aventi condizioni simili per individuare e localizzare le aree dove si possono verificare nel futuro nuovi movimenti di versante.

Il metodo scelto 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”.

## Elaborazione dei dati

### Metodo del Certainty Factor

Il valore di CF esprime la variazione in termini di probabilità al verificarsi di una certa ipotesi (area suscettibile al franamento) relativamente alla presenza o assenza di evidenze note in un intervallo di variazione che varia tra -1 e +1. Valori positivi del CF indicano una maggiore certezza dell'ipotesi fatta, mentre valori negativi determinano una diminuzione delle 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.

I valori di  $pp_a$  e  $pp_s$  sono i valori di probabilità che vengono utilizzati per il calcolo del CF. 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 di basalto/area basalto). 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.: classe basalti nel tema litologia)
4. Area interessata da frana di ogni classe per singolo tematismo (es.: frana composta di basalto)

I valori numerici utilizzati sono misurati come numero di *pixel*.

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

## Alcune considerazioni finali

- L'implementazione tecnologica permette di ovviare alle difficoltà di studio delle coste alte rocciose.
- E' in fase di studio la relazione diretta tra moto ondoso e instabilità dei versanti costieri in roccia.
- La verifica delle relazioni tra i diversi parametri, opportunamente spazializzati, permette di verificare la diversa propensione al dissesto dei vari tratti di costa.
- L'approccio geologico accompagnato da un'analisi statistica può essere il sistema di valutazione della propensione a scala regionale.
- La caratterizzazione geologica dettagliata fornisce un'importante chiave d'interpretazione della tendenza evolutiva di un tratto di costa, nel senso della pericolosità.
- La pianificazione degli interventi non può però prescindere dallo studio dettagliato a scala del singolo versante da parte del geologo.

