

## Rischio all'erosione costiera del settore meridionale della costa molisana

<sup>1</sup>Aucelli Pietro P.C., <sup>2</sup>Di Paola Gianluigi, <sup>1</sup>Rizzo Angela, <sup>2</sup>Roskopf Carmen M.

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze e Tecnologie, Università degli Studi di Napoli "Parthenope", Centro Direzionale, Isola C4, Napoli  
e-mail [pietro.aucelli@uniparthenope.it](mailto:pietro.aucelli@uniparthenope.it)

<sup>2</sup>Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Università degli Studi del Molise, C.da Fonte Lappone, Pesche (IS),  
e-mail [gianluigi.dipaola@unimol.it](mailto:gianluigi.dipaola@unimol.it)

### Riassunto

La costa molisana si estende per circa 36 km tra lo sbocco del canale Formale del Molino, a nord, e la foce del Torrente Saccione, a sud. Nel corso dell'ultimo secolo, l'evoluzione di questo tratto di litorale è stata fortemente controllata dall'erosione che ha portato al completo smantellamento dei delta a cuspidi dei Fiumi Trigno e Biferno. Ancora oggi questo fenomeno causa un arretramento articolato della linea di riva in diverse aree della costa molisana. È evidente che l'erosione costiera possa perdurare anche in futuro, specie se si tiene conto degli scenari di innalzamento del livello del mare ben noti in letteratura, esponendo le attività economiche e turistiche presenti sul litorale molisano a potenziali gravi danni. A tale scopo, il presente studio si propone di valutare il rischio all'erosione del settore compreso tra il promontorio di Termoli (CB) e il Torrente Saccione, particolarmente sensibile all'arretramento della linea di costa.

La metodologia adottata per il calcolo del rischio costiero è basata sulla valutazione di due indici sintetici. Il primo riguarda la stima della suscettibilità all'erosione (ISE) e permette di suddividere la costa analizzata in classi di suscettibilità all'erosione attraverso la correlazione lineare di quattro sub-indici che caratterizzano il sistema costiero in termini di morfologia della spiaggia e del sistema dunale, evoluzione della linea di riva ed effetto del clima ondosio. Il secondo indice analizza i beni potenzialmente esposti all'erosione attraverso la valutazione del valore socio-economico S (popolazione, grado di urbanizzazione e aree ad alto valore ecologico) e del danno potenziale D (in termini economici e di vite umane) la cui combinazione porta alla stima dell'indice del valore esposto Ex. L'indice del rischio all'erosione R è infine valutato attraverso il prodotto matriciale tra l'indice di suscettibilità e l'indice del valore esposto con l'individuazione di quattro diversi livelli di rischio.

L'applicazione di questa metodologia ha permesso di suddividere la costa meridionale del Molise in 33 settori a diverso livello di rischio all'erosione. In particolare, nelle classi R4 (rischio molto alto) e R3 (rischio alto) ricadono rispettivamente 2 km e 6 km di costa, corrispondenti al 15% e al 41% dell'area analizzata, localizzati principalmente a sud della foce del Biferno (Lido di Campomarino) e a sud del Porto di Campomarino (Nuova Cliternia). Questi settori costieri sono caratterizzati da un elevato valore socio-economico e ambientale data la presenza di infrastrutture turistiche (Campomarino Lido) e di aree ecologiche protette (SIC IT7222216 e SIC IT7222217). L'alto livello di rischio valutato per questi settori comporta dunque un elevato impatto sia sulle attività antropiche sia sulla conservazione della biodiversità e degli habitat dunali che ospitano diverse specie protette e a rischio estinzione.

I risultati ottenuti in questo studio mettono in evidenza la necessità di una gestione integrata del territorio, capace di tener conto non solo delle singole emergenze locali, ma anche dell'equilibrio globale della costa molisana. In questo contesto, la corretta manutenzione delle opere di difesa costiere presenti lungo il litorale

e la definizione di piani strategici per la difesa e il recupero delle dune, possono determinare un'importante diminuzione del valore di rischio e incrementare la capacità di resilienza dell'intero sistema costiero.

**Parole chiave:** suscettibilità all'erosione costiera, rischio all'erosione costiera, metodologia a indici, costa sabbiosa, litorale Adriatico

### **Abstract**

*The Molise coast extends for 36 km between the mouths of the Formale del Molino channel to the North and of the Saccione Stream to the South.*

*In the last century, the evolution of the Molise coast has been strongly influenced by erosion processes that have caused first the erosion of the Trigno and Biferno River deltas then widespread shoreline retreat. The Molise coast is still suffering erosion, which is actually causing the retreat of several coastal stretches.*

*This phenomenon is most likely to persist even in the future, especially when taking in account current sea level rise scenarios, exposing the economical and touristic activities to serious damages. The aim of this study is therefore to evaluate the erosion risk of the southern portion of the Molise coast, stretching from the Termoli promontory to the Saccione Stream mouth, a coastal zone characterized by intense shoreline evolution.*

*The methodology used for the overall estimation of coastal risk involves the evaluation of two synthetic indexes. The first concerns the evaluation of the susceptibility to erosion (ISE) obtained by the linear correlation of four sub-indexes, which characterize the coastal system in terms of morphologies of beach and dune systems, shoreline evolution and wave climate effect. The second index analyzes the exposure to erosion by means of a method that is based on the assessment of the socio-economic value  $S$  (population, degree of urbanization and high ecological value) and potential damage  $D$  (in economic terms and in human lives) whose combination leads to the estimation of the exposure value index  $Ex$ . Finally, the coastal erosion risk  $R$  is evaluated through the matrix product between susceptibility and exposure indexes. Based on obtained  $R$  values, the study area is divided into four risk classes.*

*The application of this methodology allowed dividing the southern coast of Molise in 33 sectors with different levels of erosion risk. In detail, 2 km and 6 km of the coastal area refer respectively to very high erosion ( $R4$  class) and high erosion risk ( $R3$  class). They correspond to 15 % and 41 % of the study area, respectively, and are mostly situated south of the Biferno River mouth (Lido di Campomarino) and south of the Campomarino harbor (Nuova Cliternia).*

*These coastal areas have a high socio-economic and environmental value due to the presence of tourist infrastructure (Campomarino Lido) and protected ecological areas (SCI IT7222216 and SCI IT7222217). Their high level of risk, therefore, has a high impact on both human activities and the biodiversity conservation of the dune systems that host protected and endangered species. The results obtained in this study have highlighted the need for an integrated territorial management that takes into account not only individual local needs and urgencies but also the global coastal equilibrium of the Molise coast. In this context, the proper maintenance of coastal defense structures along the littoral and the definition of strategic plans for the defense and recovery of dunes could contribute to an important risk value reduction and to the coastal system resilience increase.*

**Keywords:** coastal erosion susceptibility, coastal erosion risk, index-based assessment, sandy beach, Adriatic coast

### **Introduzione**

Le ricerche interdisciplinari sviluppatesi nell'ultimo ventennio hanno messo in evidenza che, a scala mondiale, gran parte delle pianure costiere è soggetta ad erosione ed inondazione costiera a causa dell'ingressione marina dovuta a fattori naturali (globali e locali) ed antropici. Basti pensare che attualmente il 10% della popolazione mondiale (634 milioni di persone) vive in aree comprese tra 0 m e 10 m sul livello del mare (Mc Granham et al, 2007), valore che sale fino al 75% nei paesi prospicienti il Mediterraneo (in Italia la percentuale è compresa tra il 60 e il 70%; Plan Bleu, 2005). L'IPCC (2014) ha messo in evidenza che il fenomeno del riscaldamento globale attualmente in corso porterà ad una sensibile risalita del livello del mare che potrà raggiungere, secondo

diversi autori (Overpeck et al., 2006; Rahmstorf, 2007; Pfeffer et al, 2008; Grinsted et al, 2010; Hansen e Sato, 2012), 1 metro o più nel corso di questo secolo, valore che però va ridimensionato per il Mediterraneo come mostrato da dati satellitari (Vigo et al., 2011). Altro effetto dei cambiamenti climatici globali è l'aumento di frequenza, intensità e distribuzione spaziale delle mareggiate, che potranno causare (e in parte già lo fanno) gravi conseguenze per le zone costiere basse già soggette ad inondazioni costiere o fluviali (Smith, 2013). Tra le conseguenze più evidenti dei cambiamenti climatici vi è l'erosione costiera, favorita dall'aumento dell'aggressività meteo-marina, dalla risalita del livello del mare e dalla forte diminuzione degli apporti sedimentari da parte dei corsi d'acqua (Klein e Nicholls, 1999). Data l'importanza e la fragilità di queste aree costiere si è sviluppata una forte sensibilità scientifica alle metodologie di valutazione del rischio costiero all'erosione, inteso come prodotto tra la suscettibilità costiera all'erosione, il danno atteso e il valore dell'elemento esposto (Crichton, 1999). A livello internazionale, numerosi strumenti sono stati sviluppati per la valutazione della Suscettibilità Costiera all'erosione (SC) dovuta ai cambiamenti climatici, considerando differenti scale spaziali e temporali. Le metodologie per la stima della suscettibilità si sono progressivamente evolute nel tempo e possono essere distinte in metodi ad indici e metodi basati su modelli dinamici (ETC/CCA Technical Paper - Ramieri et al, 2011). I metodi ad indici sono basati su specifiche variabili riferite a caratteristiche della zona costiera e risultano essere ampiamente utilizzati per la valutazione della SC. Essi si basano sulla stima semi-quantitativa e quantitativa delle caratteristiche fisico-geomorfologiche del sistema costiero (Del Río e Gracia 2009; Di Paola et al, 2011; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2015). Il *Coastal Vulnerability Index* (Indice di Vulnerabilità Costiera), ideato dall'USGS negli anni novanta (Gornitz et al, 1994; Thieler et al, 1999), è il più noto indice di valutazione costiera ed è stato adeguatamente adattato a diversi contesti costieri mondiali (Diez et al, 2007; Ojeda-Zújar et al, 2009; Özyurt e Ergin, 2010). Per quanto riguarda i metodi basati su modelli dinamici, lo sviluppo, nel corso degli ultimi decenni, di modelli di simulazione e l'uso di sistemi informativi territoriali e geografici (SIT-GIS), hanno permesso di migliorare la valutazione della SC, dando la possibilità di ottenere mappature dettagliate delle aree maggiormente suscettibili a fenomeni di inondazione e di erosione marina (Mc Laughlin et al, 2002; Snoussi et al, 2008; Aucelli et al, 2016; Perini et al, 2016; Vousdoukas et al, 2016).

Per quanto riguarda la valutazione del danno atteso e del valore socio-economico degli elementi potenzialmente esposti ai rischi costieri, l'Agenzia Europea per l'ambiente (EUROSION, 2004) ha ideato una metodologia basata sul concetto che i cambiamenti forzati su un sistema costiero determinino pressioni consistenti sia sul contesto ambientale sia su quello sociale. I cambiamenti di queste condizioni hanno un impatto ambientale ed economico sugli ecosistemi, come per esempio l'alterazione della biodiversità, e quindi sulle caratteristiche sociali dell'intera comunità (Rogers e Greenaway 2005; Kristensen, 2004; Gabrielsen e Bosch, 2003).

Nel presente lavoro si è scelto di valutare il rischio all'erosione della costa meridionale della regione Molise, poiché caratterizzata dalla presenza di importanti aree d'interesse ecologico (SIC IT7222216 and SIC IT7222217), turistico (Campomarino Lido) ed urbanistico (Città di Termoli), utilizzando una metodologia ad indici, che si basa sulla stima alla suscettibilità all'erosione delle coste basse e sabbiose. Questa metodo, pur ispirandosi a precedenti modelli ad indici di valutazione della suscettibilità costiera applicati in diverse zone costiere (Del Río e Gracia, 2009; Özyurt e Ergin, 2010; Rangel-Buitrago e Anfuso, 2015) introduce elementi di novità e informazioni ad una scala di dettaglio maggiore.

### Area di studio

La costa molisana si estende per circa 36 km tra lo sbocco del canale del Formale del Molino, a nord, e la foce del Torrente Saccione, a sud (Fig. 1). Essa è riferibile ad un'unica grande unità fisiografica, delimitata a nord da Punta Penna e a sud da Punta Pietre Nere (Girardi et al, 1985). La presenza del promontorio di Termoli, che rappresenta un chiaro elemento di separazione, porta a suddividere il litorale molisano in due porzioni principali, dotati di elevata indipendenza per quanto riguarda il bilancio sedimentario e caratterizzati da una linea di costa orientata in direzione WNW-ESE e NW-SE (Aucelli et al, 2009). Il trasporto litoraneo ha un andamento prevalente nord-sud, come già osservato da Aucelli et al (2007).

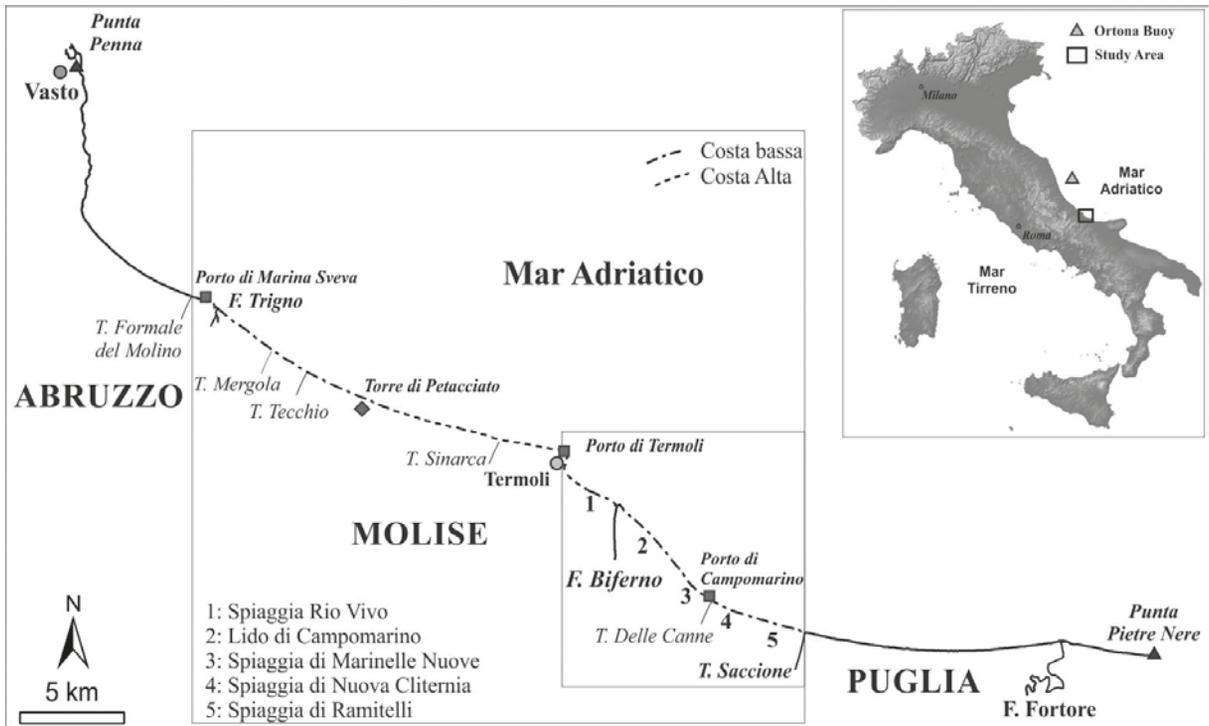


Figura 1. Costa adriatica tra Punta Penna e Punta Pietre Nere. Nel quadrato più grande è evidenziata l'area ricadente nel territorio della Regione Molise, in quello più piccolo l'area di studio.

Le spiagge molisane sono generalmente sabbiose e larghe da alcune decine di metri fino ad un massimo di circa 200 m. Verso l'interno sono delimitate da dune, dai rilievi terrazzati o collinari digradanti, dalle piane alluvionali costiere, o dai terreni interessati da strutture ed attività antropiche legate soprattutto all'occupazione edilizia e alla fruizione balneare. Il litorale molisano è fortemente esposto ai venti dei quadranti settentrionali (Maestrale, Tramontana e Grecale) e in particolare ai venti provenienti dal I e VIII ottante che rappresentano rispettivamente i venti prevalenti e dominanti di questo tratto della costa adriatica. A quest'ultimi sono associati valori di intensità molto elevati e in alcuni casi anche superiori ai 15 m/s, cui corrispondono ondate che superano i 5 metri di altezza (Aucelli et al., 2007). Il bilancio sedimentario della costa molisana dipende strettamente dagli apporti solidi dei fiumi Trigno e Biferno e dei torrenti Sinarca e Saccione, che rappresentano i maggiori corsi d'acqua che sfociano in essa (Fig. 1). I loro apporti solidi, tuttavia, sono di natura prevalentemente pelitico-sabbiosa, essendo le zone medio-basse dei rispettivi bacini idrografici impostati in prevalenza su terreni arenaceo-marnosi e pelitico-argillosi; essi sono quindi di utilità limitata per il ripascimento naturale del litorale. Nel corso degli ultimi cinquanta anni, i corsi d'acqua molisani hanno inoltre subito dei forti cambiamenti morfologici (Aucelli et al., 2011; Roskopf e Scorpio 2013; Scorpio et al., 2015) ed una progressiva riduzione di sedimenti (Scorpio et al., 2015) dovuta soprattutto alla costruzione di dighe (di Ponteliscione e di Chiauci rispettivamente sul fiume Biferno e sul fiume Trigno) insieme a numerosi interventi di sistemazione idraulica lungo i fiumi e i tributari, e all'attività di estrazione di inerti (Aucelli et al., 2004; Aucelli et al., 2006). Ciò ha causato un forte disequilibrio nel bilancio costiero e conseguente erosione costiera che si è concentrata soprattutto nei tratti costieri che includono le foci del Trigno e Biferno. È evidente che l'erosione costiera possa perdurare anche in futuro, specie se si tiene conto degli scenari di innalzamento del livello marino ben noti in letteratura, esponendo le attività economiche e turistiche impiantate sul litorale molisano a potenziali gravi danni. Questo studio si propone di valutare il rischio all'erosione del settore meridionale della costa molisana, compreso tra il promontorio di Termoli (CB) e il Torrente Saccione. (Fig. 1).

## Metodologia

La metodologia adottata per il calcolo del rischio costiero prevede la valutazione di due parametri attraverso un approccio ad indici: l'Indice di Suscettibilità all'Erosione Costiera (ISE) e l'Indice di Esposizione Costiera (IEC).

### *Indice di Suscettibilità all'Erosione costiera (ISE)*

Il nuovo indice proposto in questo lavoro (Indice di Suscettibilità all'Erosione – ISE) punta a caratterizzare la fascia costiera indagata e a suddividerla in classi di suscettibilità all'erosione attraverso la definizione e la combinazione lineare di alcuni indicatori morfologici. Sulla base delle valutazioni effettuate in numerosi lavori riguardanti la suscettibilità costiera (Mc Laughlin e Cooper, 2010; Özyurt e Ergin, 2010; Dominguez et al, 2009; Gornitz et al, 1994), e come già proposto da Pappone et al (2011), l'indice ISE viene definito attraverso la valutazione di quattro indicatori che caratterizzano il litorale in base alle morfologie della spiaggia e del sistema dunale, l'evoluzione della linea di riva e l'effetto del clima ondoso (Tab. 1).

**Tabella 1. Indicatori che costituiscono l'indice di suscettibilità all'erosione, con le rispettive variabili e classi di valutazione. IMS: Indice Morfologico della Spiaggia; IMS: Indice Morfologico della Duna; ELR: Indice di Evoluzione della Linea di riva; IR: Indice di Run-up costiero. ISE: Indice di Suscettibilità all'Erosione costiera; Per le restanti sigle si rimanda al testo, per \* vedi Equazione 9.**

Indici	Indicatori	1	2	3	4	5
IMS	SMP (se RTR $\leq$ 3)	Dissipativa	Intermedia			Riflettiva
		$\Omega > 5$	$4 < \Omega \leq 5$	$3 < \Omega \leq 4$	$3 < \Omega \leq 2$	$\Omega < 2$
	SMP (se RTR $>$ 3)	Ultra - dissipativa	Intermedia			Riflettiva
		$\Omega > 5$	$4 < \Omega \leq 5$	$3 < \Omega \leq 4$	$3 < \Omega \leq 2$	$\Omega < 2$
	EE	Ampiezza 5 ICZ o no erosione	Ampiezza 4 ICZ	Ampiezza 3 ICZ	Ampiezza 2 ICZ	Ampiezza $\leq 1$ ICZ
BS	$> 1$		1		Assenti	
IMD	EMD	$> 6$	$> 3$	$> 2$	$\geq 1$	$< 1$ oppure assente
	AMD	$> 100$	$> 75$	$> 50$	$> 25$	$< 25$ oppure assente
	SV	Completa con specie arboree	Completa con specie arbustive	Semi-completa senza dune fisse	Semi-completa senza duna embrionale	Incompleta oppure assente
ELR	TEB (m/anno)	$> 2$	$2 \div 1$	$1 \div -1$	$-1 \div -2$	$< -2$
	TEM (m/anno)	$> 2$	$2 \div 1$	$1 \div -1$	$-1 \div -2$	$< -2$
	TEL (m/anno)	$> 2$	$2 \div 1$	$1 \div -1$	$-1 \div -2$	$< -2$
IR	$R_{max}$ e $R_m$ (%)*	$0 \div 20$	$20 \div 40$	$40 \div 60$	$60 \div 80$	$80 \div 100$
<b>ISE</b>	<b>(%)</b>	<b><math>0 \div 20</math></b>	<b><math>20 \div 40</math></b>	<b><math>40 \div 60</math></b>	<b><math>60 \div 80</math></b>	<b><math>80 \div 100</math></b>

L'analisi spaziale degli indicatori e il relativo calcolo dell'ISE è stato effettuato in ambiente GIS attraverso l'uso dei Tool Spatial Analyst e 3D Analyst presenti in ArcGis 10 (ESRI) e del Digital Shoreline Analysis System (DSAS), un'estensione sviluppata dall'USGS (Thieler et al, 2009). La combinazione dei singoli indicatori

per il calcolo dell'indice di suscettibilità è stata eseguita attraverso la formula proposta da Rangel-Buitrago e Anfuso (2015):

$$ISE = \frac{\sum (S - n)}{n \cdot 4} \cdot 100 \quad (1)$$

Dove S rappresenta il punteggio associato ad ogni indicatore e n è il numero di indicatori utilizzati. Seguendo i criteri metodologici proposti in letteratura (Gornitz et al, 1997; Thieler et al, 1999), a ciascun indicatore viene assegnato un punteggio da 1 a 5, dove 1 indica il minimo contributo e 5 il contributo massimo.

#### *Indice Morfologico della Spiaggia (IMS)*

Le principali caratteristiche morfologiche, quali pendenza e sedimentologia della battigia, presenze di barre e ampiezza della spiaggia emersa, sono valutate attraverso l'Indice Morfologico della Spiaggia (IMS). Infatti, per la valutazione di questo indice sono state considerate tre variabili:

a) Stato Morfologico Predominante (SMP). Questo indicatore è valutato in differente modo a seconda del regime tidale dell'area studiata. In particolare Masselink e Short (1993) e successivamente Short (1996) propongono di valutare il Relative Tide Range, ossia il rango mareale (RTR) a partire dal valore di MSR (Main Spring Rate – variazione di marea) e dell' $H_b$  (altezza d'onda al frangimento, espressa in m):

$$RTR = \frac{MSR}{H_b} \quad (2)$$

In quest'ultima formulazione si è considerato che:

$$H_b = 0,39 \cdot g^{0,2} \cdot (T \cdot H_0^2)^{0,4} \quad (3)$$

dove  $H_0$  è l'altezza d'onda significativa media giornaliera (espressa in m), g la costante gravitazionale (espressa in  $\text{ms}^{-2}$ ), T il periodo associato a  $H_0$  (espresso in s) (Komar e Gaughan, 1972). Sulla base di  $H_b$ , del periodo dell'onda associato T e della velocità di caduta del sedimento calcolato come

$$w_s = 273 \cdot D50^{1,1} \quad (4)$$

(van Rijn, 1993; Benavente et al, 2015), si ottiene il valore di  $\Omega$  che dà informazione sullo stato morfologico della spiaggia per differenti RTR:

$$\Omega = \frac{H_b}{w_s \cdot T} \quad (5)$$

In base a questo parametro il termine SMP viene classificato come riportato in Tabella 1.

b) Esposizione all'erosione (EE). Questo indicatore si basa sulla valutazione della *Imminent Collapse Zone* (ICZ) proposta da Crowell et al (1999), definita come area soggetta a erosione imminente estesa verso terra dalla linea di costa per una distanza uguale a 5 volte il tasso di erosione annuale calcolato sul medio termine al quale vanno sommati 3 metri.

$$ICZ = 5 \cdot (ErosionRate) + 3 \quad (6)$$

Seguendo l'approccio proposto da Rangel e Anfuso (2015), l'ampiezza della spiaggia emersa è valutata come multiplo della ICZ. In questo modo, entrambi i parametri (ampiezza della spiaggia emersa (in m) e tasso di erosione a medio termine (in m/a) non sono calcolati in modo assoluto ma relativamente all'estensione della spiaggia stessa, che viene dunque considerata come naturale elemento di protezione (Tab. 1).

c) Barre sabbiose (BS), sommerse e/o emerse. Quest'ultimo termine è valutato considerando che la presenza di barre agisce come ostacolo fisico all'erosione, favorendo la dissipazione dell'energia del moto ondoso. L'indicatore viene classificato seguendo la proposta di Gracia et al (2009) che in assenza di altre informazioni valuta la semplice presenza di barre da foto aeree e/o rilievi batimetrici (Tab. 1).

*Indice Morfologico della Duna (IMD)*

L'Indice Morfologico della Duna (IMD) viene utilizzato per valutare le principali caratteristiche morfologiche del sistema dunale, considerando che sistemi con un buono stato costituiscono una riserva di sedimenti in grado di alimentare la spiaggia antistante e quindi diminuiscono la suscettibilità all'erosione. Per la valutazione di questo indice vengono considerate tre variabili:

- Altezza media della duna (EMD) espressa in m e classificata secondo con Gracia et al (2009) (Tab. 1).
- Ampiezza media della duna (AMD), espressa in m e classificata modificando gli intervalli proposti da Garcia et al. (2009) in modo da adattarli anche a contesti microtidali (Tab. 1).
- Continuità della successione vegetazionale (SV) presente sul sistema dunale attivo. Un sistema è considerato "completo" quando è possibile individuare la seguente successione: la duna embrionale costituita da specie pioniere quali *Cakile maritima*, *Salsola kali*, l'avanduna costituito da *Ammophila arenaria*, *Pancratium maritimum* e la duna fissa costituita da specie arboree quali *Pinus pinaster*, *Pinus pinea* e *Quercus ilex* o da specie arbustive quali *Juniperus communis*, *Hippophae rhamnoides*. In questi casi il sistema è considerato a suscettibilità molto bassa o bassa. Un sistema è considerato a suscettibilità moderata quando la successione è semi-completa in quanto manca la duna fissa e la vegetazione dell'avanduna e della duna embrionale copre una superficie del 30-60 %. Un grado alto di suscettibilità è invece associato ai sistemi dunali con successione della vegetazione incompleta cioè in assenza del sistema embrionale e con l'avanduna molto limitata (Tab. 1).

*Indice di Evoluzione della linea di riva (ELR)*

L'andamento della linea di costa è analizzato attraverso l'Indice di Evoluzione della Linea di Riva (ELR), espresso in m/a. Esso è calcolato come la somma pesata di tre variabili: trend evolutivo (espresso in m/a) a breve termine (TEB), corrispondente agli ultimi 10 anni, a medio termine (TEM), relativo agli ultimi 10-30 anni, e a lungo termine (TEL), corrispondente a un periodo superiore a 30 anni. Le singole variabili vengono valutate seguendo la classificazione proposta da Gornitz et al (1997) ed in seguito relazionati attraverso la seguente formula:

$$ELR = 0,65 \cdot TEB + 0,25 \cdot TEM + 0,10 \cdot TEL \quad (7)$$

*Indice di Run-up costiero (IR)*

L'Indice di Run-up costiero (IR) valuta il potenziale run-up (espresso in m) che interessa un sistema spiaggia (Holman, 1986; Komar, 1998; Stockdon et al, 2006) e si calcola confrontando l'ampiezza del settore costiero potenzialmente soggetto all'azione del moto ondoso con l'ampiezza totale della spiaggia emersa. In questo lavoro è stata utilizzata la formulazione empirica di Stockdon et al (2006):

$$R_{up} = 1.1 \cdot \left( 0.35 \cdot \beta_f \cdot (H_s \cdot L_0)^{1/2} + \frac{[H_s \cdot L_0 \cdot (0.563\beta^2 + 0.004)]^{1/2}}{2} \right) \quad (8)$$

dove  $H_s$  = altezza significativa dell'onda in mare aperto per eventi di mareggiate superiori a 2 m di altezza,  $L$  = lunghezza dell'onda in mare aperto (calcolata come  $g / 2\pi T^2$ ), e  $\beta$  = pendenza della spiaggia intertidale. L'area interessata dal moto ondoso ( $L_{Rup}$ ) è valutata come rapporto tra il run-up stimato considerando i parametri dell'onda medi e massimi e la pendenza della spiaggia intertidale ( $L_{Rup} = Rup / \tan \beta$ ). Tale valore è successivamente confrontato con l'estensione massima della spiaggia emersa ( $L$ ), per ottenere il valore di  $I_{Rup}$  espresso in percentuale.

La formula che si propone per il calcolo di questo indice prevede di assegnare un peso maggiore (0,75) al valore di run-up ottenuto a partire da valori statistici medi del moto ondoso in quanto si ritiene che siano questi i processi che maggiormente influenzano l'evoluzione a breve termine di una spiaggia.

$$IR_{up} = \frac{0,25 \cdot R_{max} + 0,75 \cdot R_m}{L \cdot \tan \beta} \cdot 100 \quad (9)$$

### Indice di Esposizione Costiera (IEC)

Il valore socio-economico delle attività localizzate in una data area costiera e potenzialmente esposte all'erosione è valutato seguendo la metodologia proposta dall'Agenzia Europea per l'ambiente (EUROSION, 2004). Questo tipo di approccio considera quattro indicatori definiti sulla base della densità di popolazione e l'uso del suolo dei comuni ricadenti nell'area costiera analizzata (RICE - Radius of Influence of Coastal Erosion, definita come l'area che dista non più di 500 m dalla costa ed è posta a quote non superiori a 5 m sul livello del mare) e permette di calcolare l'indice socio-economico della costa (CSI), attraverso la seguente relazione:

$$CSI = P_{RICE} + U_{RICE} + E_{RICE} + U_{10km} \quad (10)$$

dove  $P_{RICE}$  è la popolazione residente nell'area RICE,  $U_{RICE}$  è la percentuale di area urbanizzata/industrializzata nell'area RICE,  $E_{RICE}$  è la percentuale di area ad alto valore ecologico compresa nell'area RICE, e  $U_{10km}$  è la percentuale di incremento di popolazione nell'area compresa in un raggio di 10 km dalla costa. L'uso del suolo è stato ottenuto attraverso l'utilizzo dei dati del progetto Corine Land Cover (CLC, 2001; 2012), mentre i parametri statistici relativi alla popolazione sono stati tratti dal dataset ISTAT (ISTAT, 2011). La Tabella 2 mostra i pesi assunti per ogni parametro, che sono stati classificati in accordo con Martinelli et al. (2010) e Benassai et al (2015).

Sulla base dei valori raggiunti da  $P_{RICE}$ ,  $U_{RICE}$ ,  $E_{RICE}$ ,  $U_{10km}$ , e in accordo con l'equazione (10), si è giunti alla valutazione del parametro CSI, dalla cui classificazione si ottiene il valore socio-economico (S), come mostrato in Tabella 3. In particolare, S4 corrisponde al livello più alto del valore socio-economico, S3 e S2 corrispondono a livelli medio-alti ed infine S1 corrisponde al livello minimo del valore socio-economico.

Il danno potenziale (D) rappresenta il valore sociale, economico e naturale dei beni situati nella zona costiera in termini di costi monetari o di vite umane. In questo lavoro, sono stati considerati i seguenti livelli di danno qui elencati in ordine decrescente:

D4 per aree urbane, con presenza d'infrastrutture permanenti e vie di comunicazione importanti;

D3 per piccoli agglomerati urbani, zone di protezione speciali, sia nazionali sia internazionali, edifici di interesse pubblico;

D2 per case sparse, zone rurali, strutture turistiche e ambienti dunali;

D1 per le aree naturali non protette.

L'indice di esposizione costiera ( $E_x$ ) indica la percentuale di perdita di un elemento o gruppo di elementi che potrebbe verificarsi. Questo parametro viene valutato come il prodotto matriciale tra il valore socio-economico (S) e il livello di danno potenziale (D) (Tab. 4).

**Tabella 2. Classificazione dei parametri PRICE, URICE, ERICE, U10km usati per la valutazione dell'indice CSI.**

Indici	0	1	2	3	4
$P_{RICE}$	<500	500 – 1500	1500 – 3000	3000 – 10000	>10000
$U_{RICE}$	<10%	10 – 20%	20 – 40%	40 – 60%	>60%
$E_{RICE}$	<5%	5 – 20%	20 – 30%	>30	-
$U_{10km}$	5%	5 – 10%	10 – 20%	>20%	-

**Tabella 3. Classificazione dell'indice socio-economico (CSI) per la definizione del valore socio-economico (S).**

	CSI			
	≤2	3 – 5	6 – 8	≥9
S	S1	S2	S3	S4

**Tabella 4. Calcolo dell'Indice di Esposizione Costiera (Ex), attraverso il prodotto matriciale tra l'indice del valore socio economico (S) e il livello di danno potenziale (D).**

	S4	S3	S2	S1
D4	E <sub>x</sub> 4	E <sub>x</sub> 4	E <sub>x</sub> 3	E <sub>x</sub> 2
D3	E <sub>x</sub> 4	E <sub>x</sub> 3	E <sub>x</sub> 2	E <sub>x</sub> 1
D2	E <sub>x</sub> 3	E <sub>x</sub> 2	E <sub>x</sub> 2	E <sub>x</sub> 1
D1	E <sub>x</sub> 2	E <sub>x</sub> 1	E <sub>x</sub> 1	E <sub>x</sub> 1

### Rischio all'Erosione Costiera

La commissione dell'Unione Europea (ISO/EC 2009) definisce il rischio come *la probabilità di conseguire danno o perdite (morti, feriti, perdita di mezzi di sussistenza, interruzione delle attività economiche o perdite ambientali), derivanti dall'interazione tra vulnerabilità e esposizione*. Il rischio è ottenuto attraverso il prodotto tra la Suscettibilità Costiera (da qui in poi H) e il valore dell'indice di esposizione costiera (E<sub>x</sub>). Il livello di rischio, valutato attraverso la matrice presentata in Tabella 5, è stato classificato come segue:

R4 (rischio molto alto): alto pericolo per vite umane e/o perdita permanente di strutture o attività sociali ed economiche;

R3 (rischio alto): gravi danni alla popolazione e/o perdita di strutture ed edifici;

R2 (rischio medio): perdita solo per le proprietà residenziali e alle infrastrutture;

R1 (rischio basso): possibili perdite, ma con bassi danni sociali ed economici.

**Tabella 5. Livello di Rischio Costiero (R) valutato attraverso il prodotto matriciale tra la pericolosità costiera (H) e il valore esposto (Ex).**

Rischio E <sub>x</sub> 4		Esposizione			
		E <sub>x</sub> 3	E <sub>x</sub> 2	E <sub>x</sub> 1	
Suscettibilità	H5	R4	R4	R3	R2
	H4	R4	R3	R2	R1
Erosione Costiera	H3	R3	R2	R2	R1
	H2	R2	R2	R1	R1
	H1	R1	R1	R1	R1

Al fine di valutare il rischio costiero all'erosione sono state indispensabili alcune indagini specifiche per l'applicazione dei diversi indici. Per quanto riguarda l'ISE, con una strumentazione DGPS della Trimble sono stati realizzati 10 profili topografici della spiaggia emersa, che sono stati poi agganciati ad altrettanti profili batimetrici ricavati da un rilievo con tecnologia multi-beam. Lungo ogni profilo sono stati prelevati dei campioni di sabbia sulla spiaggia intertidale sottoposte ad analisi granulometriche per l'individuazione del valore di D50.

Per quanto riguarda l'analisi dell'evoluzione della linea di costa ci si è avvalsi del confronto di ortofoto e foto aeree relativi al periodo 1954-2014. A tal fine è stato utilizzato il programma DSAS (Thieler et al., 2009), che ha permesso la valutazione dei trend di avanzamento/arretramento della linea di costa. I parametri riguardanti il regime meteo marino sono stati ricavati analizzando la serie storica registrata alla boa di Ortona, con dati ondametrici relativi al periodo 1989-2014. Per il calcolo del IEC è stata necessaria l'individuazione della copertura del suolo e delle maggiori aree ecologiche protette oltre che delle aree densamente abitate o sfruttate per uso turistico e/o economico, che è stata realizzata avvalendosi del Corine Land Cover per gli anni 2001 e 2012 (CLC, 2001; 2012) e della interpretazione di foto aeree e di ortofoto recenti, utili quest'ultime anche per la mappatura delle opere di protezione costiera e delle maggiori strutture marittime.

## Risultati

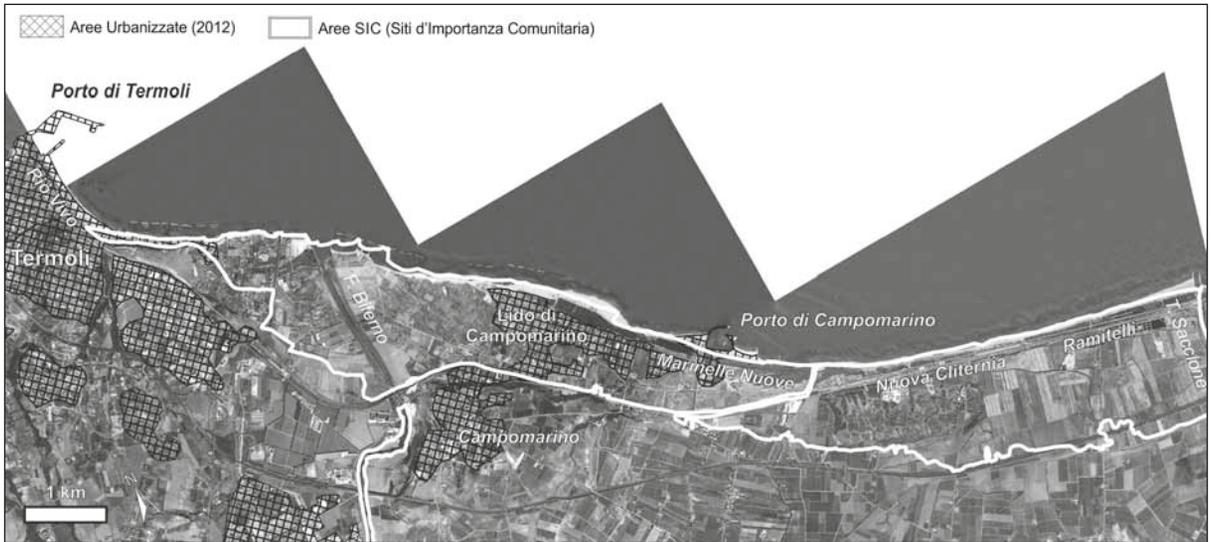
L'area presa in considerazione in questo studio si estende dalla città di Termoli alla foce del Torrente Saccione, al confine con la Regione Puglia, ed ha un'estensione di 20,8 km<sup>2</sup> (area RICE). Essa è caratterizzata da un'accentuata variabilità morfologica e sedimentologica, evidenziata dai profili di spiaggia realizzati, che condizionano notevolmente l'effetto del run-up lungo costa. In particolare, il tratto studiato è caratterizzato da spiagge riflesse aventi pendenze della battigia superiori all'1%, un'ampiezza della spiaggia emersa compresa tra 23 m (Nuova Cliternia) e 60 m (Marinelle Nuove) e una granulometria della zona intertidale costituita generalmente da sabbia grossolana-media (con valori di  $f$  che variano tra 1 e 1,5). Il sistema dunale risulta in parte compromesso nel tratto di litorale tra Rio Vivo e Marinelle Nuove, e solo sulle spiagge meridionali esso è più ampio di 20 m e alto anche 3 m. Per quanto riguarda la tendenza evolutive della linea di costa, notevolmente condizionata dalla costruzione di opere di mitigazione che coprono la totalità di alcuni zone (Lido di Campomarino e Marinelle Nuove) e sono completamente assenti in altri (Ramitelli), essa mostra una sostanziale stabilità, ad eccezione per le spiagge di Lido di Campomarino, dove si registra una tendenza erosiva a lungo termine di -2,7 m/anno (Tab. 6).

**Tabella 6. Caratteristiche principali delle spiagge meridionali della costa molisana.**

Zone costiere	Spiaggia		Duna			Evoluzione Linea di Riva			ID50 (Ø)	Opere (%)	Clima ondososo	
	Pendenza Battigia	Ampiezza (m)	Presenza/ Altezza (m)	Lunghezza (m)	Breve (m/anno)	Medio (m/anno)	Lungo (m/anno)	H <sub>0</sub> (m)			T <sub>0</sub> (s)	
Rio Vivo	0,10	37,7	Prevalentemente assente/<1	<5	0,2	0,6	0,1	1,1	75	3,5	6,6	
Lido di Campomarino	0,11	45,5	Prevalentemente assente/<1	<10	-0,9	-2,2	-2,7	1,5	100			
Marinelle Nuove	0,12	60,0	Prevalentemente assente/<1	<10	0,1	1,6	0,3	1,5	100			
Nuova Cliternia	0,13	22,6	In parte assente/2 ÷ 3	23	-0,2	-0,7	0,1	1,5	30			
Ramitelli	0,16	26,6	Presente/2 ÷ 3	61	1	0,6	0,5	1	0			

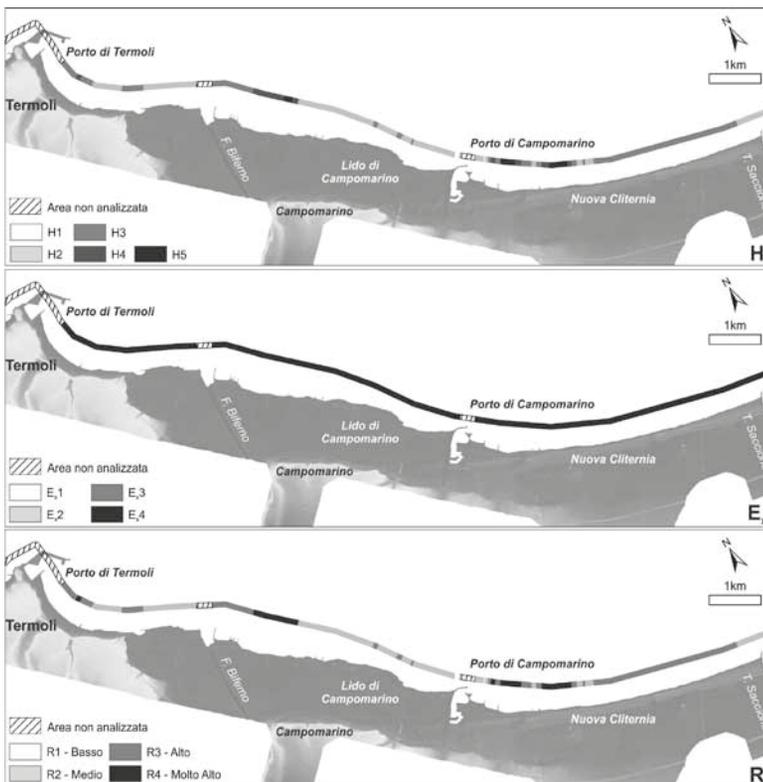
Questi dati hanno permesso di suddividere il tratto costiero in 5 classi di suscettibilità, con zone in classi H4 e H5 pari a 2 km, corrispondenti al 15% del tratto costiero analizzato (Fig. 3). Inoltre, l'area RICE è caratterizzata da ampie aree urbanizzate, specie tra il centro urbano di Termoli e il Lido di Campomarino, che occupano 10,4 km<sup>2</sup> (pari alla metà dell'intera area di studio). Anche le zone ad alto valore ecologico rappresentano una porzione sostanziale dell'area studio pari al 72% (15,0 km<sup>2</sup>) (Fig. 2). In particolare l'area è caratterizzata dalla presenza di due aree SIC estremamente importanti: Foce Biferno – Litorale di Campomarino (IT7222216) e Foce Saccione – Bonifica Ramitelli (IT7222217) (Regione Molise, 2016).

Entrambi i siti presentano un numero considerevole di habitat con elevato grado di conservazione e naturalità e costituiscono un'area ecologicamente importante per molte specie di ornitofauna e per la presenza della *Testudo Hermannii* (Tartaruga di Terra) ed della *Emys Orbicularis* (Testuggine palustre Europea), entrambe specie in declino nel territorio molisano (Berardo et al., 2015). Questo fa sì che per il tratto costiero esaminato l'Indice di esposizione costiera  $E_x$  sia estremamente alto (Fig. 3).



**Figura 2.** Tratto del litorale molisano compreso tra il promontorio di Termoli e il Torrente Saccione, con evidenziate le aree urbanizzate e le aree SIC.

Il calcolo del rischio costiero, basato sulla combinazione lineare della indice di suscettibilità e dell'indice di esposizione, ha permesso la suddivisione della costa meridionale del Molise in 33 segmenti. In particolare, 2 km e 6 km di costa ricadono rispettivamente nelle classi R4 (rischio molto alto) e R3 (rischio alto, corrispondenti al 15% e al 41% dell'area indagata, con aree maggiormente compromesse localizzate a sud della foce del Biferno (Lido di Campomarino) e a sud del Porto di Campomarino (Nuova Cliternia), mentre meno dell'1% ricade nella classe R1 (Fig. 3).



**Figura 3.** Suscettibilità (H), esposizione (E) e rischio (R) costiero all'erosione del settore meridionale della costa molisana.

## Discussione e conclusioni

La valutazione del rischio costiero all'erosione è stata effettuata attraverso l'applicazione di una metodologia ad indici che prevede la stima di due parametri: l'indice di suscettibilità all'erosione (ISE – H) e l'indice di esposizione costiera (IEC - E<sub>x</sub>). Per quanto riguarda l'indice di suscettibilità ISE, esso è basato sulla valutazione di indicatori che permettono la caratterizzazione fisica delle coste basse sabbiose, escludendo dunque dalla valutazione le variabili che caratterizzano i sistemi di costa alta. Tali indicatori sono stati scelti partendo dal principio che un buon indice deve essere composto da un numero di indicatori non elevato in modo da garantire la sua applicabilità ed evitare problemi di ridondanza di informazioni (Cooper and Mc Laughlin, 1998; Williams e Davies 2001; Villa e McLeod, 2002). Inoltre, a differenza di altri indici proposti in letteratura (Abuodha e Woodroffe, 2006; Özyurt e Ergin, 2009; 2010), sono stati esclusi parametri la cui variabilità dipende dalla scala spaziale analizzata, quale ad esempio l'innalzamento del livello del mare, in modo da rendere l'indice applicabile a scala regionale.

La metodologia proposta è stata usata in una zona costiera caratterizzata da una consistente presenza antropica e occupata da estese aree ecologiche di interesse comunitario, risultando quindi un'area con un potenziale di rischio all'erosione molto alto. Lo studio effettuato ha mostrato che più del 50% del litorale indagato ricade nelle classi di rischio alto e molto alto (R3 o R4) e ha permesso di individuare alcune aree (a sud del Porto di Campomarino e tra il Lido di Campomarino e la foce del fiume Biferno), che andrebbero indagate in modo mirato allo scopo d'individuare delle strategie di mitigazione. Inoltre, lo scenario di rischio emerso dallo studio potrebbe aggravarsi tenendo conto dell'effetto dell'innalzamento del livello del mare dovuto ai cambiamenti climatici in corso. Considerando l'elevato valore economico-ambientale del litorale molisano, caratterizzato da attività turistiche e da aree ecologiche importanti per la presenza di specie protette, appare fondamentale una gestione integrata del territorio, capace di tener conto non solo delle singole emergenze locali, ma dell'equilibrio globale della costa. In questo contesto, la corretta manutenzione delle opere di difesa costiere presenti lungo il litorale e la definizione di piani strategici per la difesa e il recupero delle dune, possono determinare un'importante diminuzione del valore di rischio e incrementare la capacità di resilienza dell'intero sistema costiero. Rispetto ad altre metodologie applicate per la valutazione del rischio costiero, come ad esempio quelle proposte da Pappone et al (2011), Santos et al (2013) e Rangel-Buitrago e Anfuso (2015), l'approccio presentato ha il vantaggio di non suddividere l'area da analizzare in segmenti con lunghezza prestabilita, ma di definirli attraverso una segmentazione automatica in ambiente GIS basata sull'elaborazione dei singoli indicatori rendendo l'analisi il più oggettiva possibile. Il metodo proposto, inoltre, non richiede intense e approfondite analisi di campo, ma si basa prevalentemente su dati ottenibili tramite fotointerpretazione e analisi dei dati. Infine, si adatta bene a studi a scala regionale riguardanti aree caratterizzate da spiagge sabbiose a differenza di quella del CVI di Gornitz et al (1994) che viene proposta per studi a scala di macroregioni. L'approccio ad indici resta utile per individuare aree costiere caratterizzate da criticità e che dunque necessitano di ulteriori analisi attraverso modellazioni e elaborazioni di dettaglio.

## Bibliografia

- Abuodha P., Woodroffe C.D., 2006. *Assessing vulnerability of coasts to climate change: a review of approaches and their application to the Australian coast*. In: Woodroffe C.D., Bruce E., Puotinen M., Furness R.A. (eds), GIS for the Coastal Zone: a selection of Papers from CoastGIS, 2006. Australian National Centre for Ocean Resources and Security University of Wollongong.
- Aucelli P.P.C., Di Paola G., Incontri P., Rizzo A., Vilaro G., Benassai G., Buonocore B., Pappone G., 2016. *Coastal inundation risk assessment due to subsidence and sea level rise in a Mediterranean alluvial plain (Volturno coastal plain – southern Italy)*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, in press.
- Aucelli P.P.C., Fortini P., Roskopf C., Scorpio V., Viscosi V., 2011. *Recent channel adjustments and riparian vegetation response: some examples from Molise region (Italy)*. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria, 34: 161-173.
- Aucelli P.P.C., Iannantuono E., Roskopf C.M., 2009. *Evoluzione recente e rischio di erosione della costa molisana (Italia meridionale)*. Ital. J. Geosci. (Boll. Soc. Geol. It.), 128(3): 759-771.

- Aucelli P.P.C., De Pippo T., Iannantuono E., Roszkopf C.M., 2007. *Caratterizzazione morfologico-dinamica e meteomarina della costa molisana nel settore compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Italia meridionale)*. Studi costieri. 13: 75-92.
- Aucelli P.P.C., Iannantuono E., Roszkopf C.M., 2006. *Le spiagge del Molise*. In: Lo stato dei litorali italiani. Studi Costieri, 10: 65-70.
- Aucelli P.P.C., Brancaccio L., Faillace P.I., Pellegrino P., Roszkopf C.M., Scapillati N., 2004. *L'evoluzione recente della costa molisana (Italia meridionale)*. Il Quaternario. 17(1): 21-31.
- Benassai G., Di Paola G., Aucelli P.P.C., 2015. *Coastal risk assessment of a micro-tidal littoral plain in response to sea level rise*. Ocean & Coastal Management, 104: 22-35.
- Benavente J., Gracia F.J., Del Río L., Anfuso G., Rodríguez-Ramírez A., 2015. *Morphodynamic characterization of the Spanish beaches of the Gulf of Cadiz*, Boletín Geológico y Minero. 126(2-3): 409-426.
- Berardo F., Carranza M.L., Frate L., Stanisci A., Loy A., 2015. *Seasonal habitat preference by the flagship species Testudo hermanni: Implications for the conservation of coastal dunes*, Comptes Rendus Biologies. 338 (5): 343-350.
- CLC, 2012, *Corine Land Cover 2012* <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.
- CLC, 2001, *Corine Land Cover 2001* <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.
- Cooper J.A.G., McLaughlin S., 1998. *Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis*. J Coast Res 14: 512-524.
- Crichton D., 1999, *The risk triangle*. In: Ed. Ingleton J., Natural Disaster Management. Tudor Rose, London.
- Crowell M., Leikin H., Buckley M., 1999. *Evaluation of coastal erosion hazards study: an overview*. Journal of Coastal Research, 28: 2-9.
- Del Río L., Gracia F. J., 2009. *Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments*. Geomorphology. 112 (1): 82-95
- Di Paola G., Iglesias J., Rodríguez G., Benassai G., Aucelli P.P.C., Pappone G., 2011. *Estimating coastal vulnerability in a meso-tidal beach by means of quantitative and semi-quantitative methodologies*. Journal of Coastal Research, SI61: 303-308.
- Diez P.G., Perillo G. M. E., Piccolo M. C., 2007. *Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province*. Journal of Coastal Research. 23(1): 119-126.
- Dominguez L., Anfuso G., Gracia F. J., 2005. *Vulnerability assessment of a retreating coast in SW Spain*. Environmental Geology. 47: 1037-1044.
- EUROSION (2004). *Living with Coastal Erosion in Europe: Sediment and Space for Sustainability*. [www.euroSION.org](http://www.euroSION.org).
- Gabrielsen P., Bosch P., 2003. *Internal Working Paper Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting*. European Environment Agency, Copenhagen.
- Girardi A., Coltellacci M., Parea G.C., Zunica M., 1985. *Atlante delle spiagge italiane: Dinamismo - Tendenza evolutiva - Opere umane. Foglio 155 - San Severo (scala 1:100.000)*. C.N.R. - P.F. «Conservazione del Suolo», Sottoprogetto «Dinamica dei litorali», S.EL.CA., Firenze.
- Gornitz V.M., Beaty T.W., Daniels R.C., 1997. *A coastal hazards data base for the U.S. West Coast*. ORNL/CDIAC-81, NDP-043C, Oak ridge national laboratory, Oak ridge, Tennessee, USA.
- Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W., Birdwell K.R., 1994. *The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast*. Journal of Coastal Research, SI12, 327-338.
- Gracia F.J., Hernández L., Hernández A.I., Flor G., Gómez M.Á., Sanjaume E., 2009. *Dunas marítimas y continentales. Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España*. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, Madrid, 106 pp.
- Grinsted A., Moore J.C., Jevrejeva S., 2010. *Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100 AD*. Climate Dynamics, 34: 461-472.

- Hansen J.E., Sato M., 2012. *Paleoclimate implications for human-made climate change*. In: Berger, A., Mesinger, F., Sijacki, D. (eds), *Climate Change: Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects*. Springer. pp. 21-48.
- Holman R.A., 1986, *Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach*. *Coastal Engineering*, 9: 527-544.
- IPCC, 2014, *Fifth Assessment Report (AR5) – Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change e Intergovernmental Panel on Climate Change*. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- ISO/IEC, 2009, *ISO Guide 73 Risk Management and Vocabulary*. <http://www.iso.org>
- ISTAT, 2011, *Basi territoriali e variabili censuarie: censimento 2011*. Molise. [http://www.istat.it/it/files/2013/11/R15\\_11\\_WGS84.zip](http://www.istat.it/it/files/2013/11/R15_11_WGS84.zip)
- Klein R.J.T., R.J. Nicholls, 1999. *Assessment of coastal vulnerability to climate change*. *Ambio*, 28(2), 182-187.
- Komar, P.D., 1998. *Beach Processes and Sedimentation*. Prentice Hall Ed., Englewood Cliffs, NJ.
- Komar, P.D., Gaughan M.K., 1972. *Airy wave theory and breaker height prediction*. 13th Conference on Coastal Engineering., Chapt. 20: 405-418.
- Kristensen, P., 2004. *The DPSIR Framework*. National Environmental Research Institute. Department of Policy Analysis, Denmark.
- Martinelli L., Zanuttigh B., Corbau C., 2010. *Assessment of coastal flooding hazard along the Emilia Romagna littoral*. *Coast. Eng* 57: 1042-1058.
- Masselink G., Short A., 1993. *The Effect of Tide Range on Beach Morphodynamics and Morphology: A Conceptual Beach Model*. *Journal of Coastal Research*, 9(3): 785-800.
- Mc Granaham G., Bolk D., Anderson D., 2007. *The rising tide: assessing the risk of climate change and human settlements in low elevation coastal zones*. *Environ. Urban* 19: 17-37.
- Mc Laughlin S., Cooper J., 2010. *A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers?* *Environ Hazards Journal*, 9: 1-16.
- Mc Laughlin S., McKenna J., Cooper J.A.G., 2002. *Socio-economic data in coastal vulnerability indices: constraints and opportunities*. *Journal of Coastal Research*, 36: 487-497.
- Ojeda-Zújar J., Álvarez-Francosi J.I., Martín-Cajaraville D. and Fraile-Jurado P., 2009. *El uso de las TIG para el cálculo del índice de Vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España)*. *GeoFocus*, 9, 83-100.
- Overpeck J.T., Otto-Bliesner B.L., Miller G.H., Muhs D.R., Alley R.B., Kiehl J.T., 2006. *Paleoclimatic evidence for future ice-sheet instability and rapid sea-level rise*. *Science*, 311: 1747-1750.
- Özyurt G., Ergin A., 2010. *Improving coastal vulnerability assessments to sea-level rise: a new indicator based methodology for decision makers*. *Journal of Coastal Research*, 26: 265-273.
- Özyurt, G., Ergin, A., 2009. *Application of sea level rise vulnerability assessment model to selected coastal areas of Turkey*. *Journal of Coastal Research*, 248-251.
- Pappone G., Alberico I., Amato V., Aucelli P. P. C., Di Paola G., 2011. *Recent evolution and the present-day conditions of the Campanian coastal plains (south Italy): the case history of the Sele River coastal plain*. *WIT Trans. Ecol. Environ.* 149: 15-27.
- Perini L., Calabrese L., Salerno G., Ciavola P., Armaroli C., 2016. *Evaluation of coastal vulnerability to flooding: comparison of two different methodologies adopted by the Emilia Romagna region (Italy)*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 16, 181– 194.
- Pfeffer W., Harper J., O'Neel S., 2008. *Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise*. *Science*, 321: 1340-1343.
- Plan Bleu (2005). *A Sustainable Future for the Mediterranean*. In G. Benoit & A. Comeau (eds) *The Blue Plan's Environment and Development Outlook*, Earthscan, London, [www.planbleu.org](http://www.planbleu.org).
- Rahmstorf S., 2007. *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise*. *Science*, 315: 368-370.
- Ramieri E., Hartley A., Barbanti A., Santos F. D., Gomes A., Hilden M., Santini M., 2011. *Methods for assessing coastal vulnerability to climate change*. European Topic Centre on climate change impacts, vulnerability and adaptation (ETC CCA) technical paper, Bologna (IT), 93.

- Rangel N., Anfuso G., 2015. *Risk Assessment of Storms in Coastal Zones: Case Studies from Cartagena (Colombia) and Cadiz (Spain)*. Springer International Publishing, 63 pp.
- Regione Molise, 2016. *La rete natura 2000 in Molise*. Siti IT7222216 e IT7222217 <http://www.regione.molise.it/web/grm/ambiente.nsf/0/4A4D333C181C6E63C125757C003EFE54?OpenDocument>.
- Rogers S.I., Greenaway B., 2005. *A UK perspective on the development of marine ecosystem indicators*. Marine Pollution Bulletin, 50(1): 9-19.
- Roskopf C., Scorpio V. (2013). *Geomorphologic map of the Biferno River valley floor system (Molise, Southern Italy)*. Journal of Maps, 9: 106-114.
- Santos M., Del Río L., Benavente J., 2013. *GIS-based approach to the assessment of coastal vulnerability to storms. Case study in the Bay of Cádiz (Andalusia, Spain)*. Journal of Coastal Research, SI65: 826-831.
- Scorpio V., Aucelli P.P.C., Giano S.I., Pisano L., Robustelli G., Roskopf C.M., Schiattarella M. (2015). *River channel adjustments in Southern Italy over the past 150 years and implications for channel recovery*. Geomorphology, 251: 77-90.
- Short A.D., Aagaard T., 1993. *Single and multi-bar beach change models*. Journal of Coastal Research, SI15: 141-157.
- Smith K., 2013. *Environmental Hazards: Assessing Risk Disaster*. Routledge Ed., New York and Reducing. 504 pp.
- Snoussi M., Ouchani T., Niazi, S., 2008. *Vulnerability assessment of the impact of sea-level rise and flooding on the Moroccan coast: the case of the Mediterranean eastern zone*. Estuar. Coast. Shelf Sci., 77, 206-213.
- Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H., 2006. *Empirical parametrization of setup, swash, and runup*. Coastal Engineering, 53(7): 573-588.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L., Ergul A., 2009. *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0— An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report. 2008-1278.
- Thieler E.R., Hammer-Klose E.S., 1999. *National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the US Atlantic Coast*. Woods Hole, MA: United States Geological Survey (USGS), Open File Report 99-593.
- van Rijn L.C., 1993. *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands, 687 pp.
- Vigo M.I., Sanches-Reales J.M., Trottini M., Chao B.F., 2011. *Mediterranean Sea level variation: analysis of the satellite altimetric data, 1992-2008*. Journal of Geodynamics, 52: 271-278.
- Villa F., McLeod H., 2002. *Environmental Vulnerability Indicators for Environmental Planning and Decision-Making: Guide-lines and Applications*. Environ Manage, 29, 335-348.
- Vousdoukas M. I., Voukouvalas E., Mentaschi L., Dottori F., Giardino A., Bouziotas D., Bianchi A., Salamon P., Feyen L., 2016. *Developments in large-scale coastal flood hazard mapping*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., 16, 1841-1853.
- Williams A.T., Davies P., 2001. *Coastal dunes of Wales: Vulnerability and Protection*. J Coast Cons, 7, 145-154.

**Ricevuto il 30/07/2016; accettato 12/05/2017**

