

RELAZIONE MORFOLOGICA
- LITORALE DI CALOPEZZATI -



Prof. Ing. Francesco Aristodemo
Ing. Danilo Algieri Ferraro

INDICE

<i>1. Introduzione.....</i>	<i>3</i>
<i>2. Analisi storica delle modifiche del litorale in esame.....</i>	<i>3</i>
<i>3. Evoluzione storica della linea di costa.....</i>	<i>6</i>
<i>4. Trasporto solido long-shore.....</i>	<i>2</i>

1. Introduzione

Per lo studio dell'evoluzione di un litorale costiero è essenziale la conoscenza delle variazioni storiche plano-altimetriche della parte emersa e della parte sommersa della spiaggia. È fondamentale, in primo luogo, lo studio della variazione della linea di battigia, che costituisce l'elemento principale da introdurre nei modelli matematici di spiaggia, sia emersa sia sommersa, all'interno della fascia attiva. Essa rappresenta quella zona di spiaggia delimitata dai massimi livelli d'acqua sulla spiaggia emersa e dalla profondità di chiusura, come è stato già illustrato nell'elaborato relativo allo studio meteomarinario.

Per potere verificare in modo oggettivo le tendenze evolutive che negli ultimi decenni hanno interessato il litorale di Calopezzati nel tratto a Nord e a Sud del torrente Fiumarella, è stata condotta un'analisi comparativa delle linee di riva "storiche", ricavate da appositi recenti rilievi, dalla cartografia e aerofotogrammetria degli ultimi decenni, opportunamente digitalizzate e georeferenziate in coordinate Gauss-Boaga su supporto CAD. Successivamente, i dati planimetrici sono stati importati su foglio elettronico (Excel e Matlab) per analizzare diacronicamente le linee di riva, al fine di stimare il bilancio solido litoraneo per via indiretta, ricavando così degli elementi di riferimento per i successivi studi di morfodinamica del litorale in assenza o in presenza futura di eventuali opere di difesa dall'erosione costiera.

Dal punto di vista planimetrico, sono valutati le lunghezze e le aree in avanzamento o in erosione del tratto litoraneo in esame e il contributo delle componenti long-shore e cross-shore nella storia evolutiva del litorale in esame. Viene successivamente valutato il trasporto solido long-shore dall'analisi storica dei ratei annui delle linee di riva e quello sottocosta in corrispondenza di 3 punti specifici (vedi Relazione studio meteomarinario).

Dal punto di vista altimetrico, sono determinati i profili trasversali di spiaggia dai recenti rilievi effettuati, determinando le aree e i volumi in ripascimento o in erosione rispetto alla configurazione di spiaggia in equilibrio.

2. Analisi storica delle modifiche del litorale in esame

L'obiettivo principale della ricostruzione storica dell'evoluzione della linea di riva del litorale in esame di Calopezzati risiede nell'acquisizione dei dati cartografici di base cui fare riferimento per la comprensione delle tendenze evolutive storiche e in atto su cui basare le valutazioni circa i possibili scenari di evoluzione futura del litorale in esame.

Lo studio dell'evoluzione del litorale è stato condotto sulla base dei rilievi disponibili delle linee di riva, esaminando differenti fonti quali la cartografia digitale della Regione Calabria (geoportale.regione.calabria.it) e nazionale (rilievi da lidar, ottenuti attraverso apposita

richiesta via mail all'indirizzo datipst@minambiente.it dell'Ufficio Tecnico del Geoportale Nazionale del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione Generale per la Salvaguardia del Territorio e delle Acque), e attraverso appositi rilievi della linea di riva effettuata dal gruppo di ricerca coordinato dal dott. Rocco Dominici del Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra dell'Università della Calabria. In particolare, le linee di riva considerate nel presente studio sono relative ai seguenti periodi:

- cartografia digitale del geoportale della Regione Calabria del 1954;
- cartografia digitale del geoportale della Regione Calabria del 1998;
- cartografia digitale del geoportale della Regione Calabria del 2000;
- cartografia digitale del geoportale della Regione Calabria del 2006;
- cartografia digitale del geoportale della Regione Calabria del 2008;
- cartografia digitale del geoportale Nazionale del 2011;
- appositi rilievi della linea di riva del 2020.

L'area investigata riguarda precisamente un tratto di estensione pari a 2.08 km ricadente nel comune di Calopezzati (CS). In particolare, le linee di riva sono state analizzate da circa 600 m a Nord della foce del torrente Fiumarella fino a circa l'ultimo pennello di progettazione posto nella zona Sud del litorale in esame.

Il risultato della sovrapposizione delle linee di riva georeferenziate e relative agli anni 1954, 1998, 2000, 2006, 2008, 2011 e 2020 è riportato in Figura 1.

Il sistema di riferimento cartesiano assunto per l'analisi delle linee di riva presenta l'asse delle ascisse orientato a 90°N, in direzione sub-parallela all'allineamento medio del litorale. Le linee di riva nel sistema di riferimento originario sono state ruotate in senso antiorario di un angolo pari a 65°. L'origine del sistema di riferimento è stato posto in corrispondenza del vertice superiore del dominio di calcolo. Il sistema di calcolo utilizzato ha fornito una prima serie di dati statistici per le polilinee estrapolate e rappresentative delle linee di riva di riferimento.

In una prima fase, le linee di riva rappresentanti polilinee sono state regolarizzate operando una discretizzazione di infittimento secondo un passo di 20 m (ritenuto più che soddisfacente in considerazione delle polilinee di input). Una rappresentazione in scala distorta delle linee di riva nel nuovo sistema di riferimento è mostrato in Figura 2.

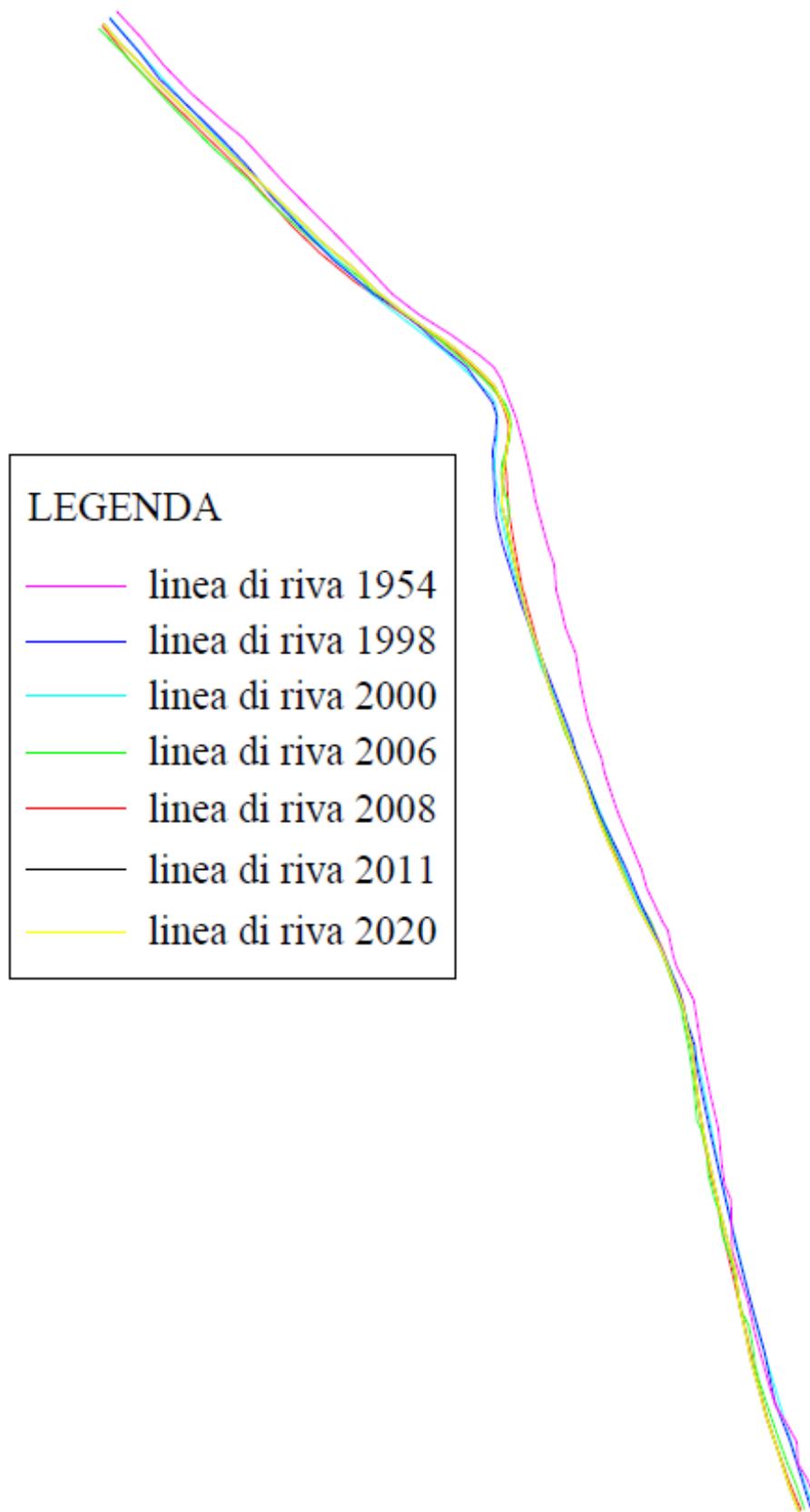


Figura 1 - Linee di riva storiche in corrispondenza del litorale di Calopezzati

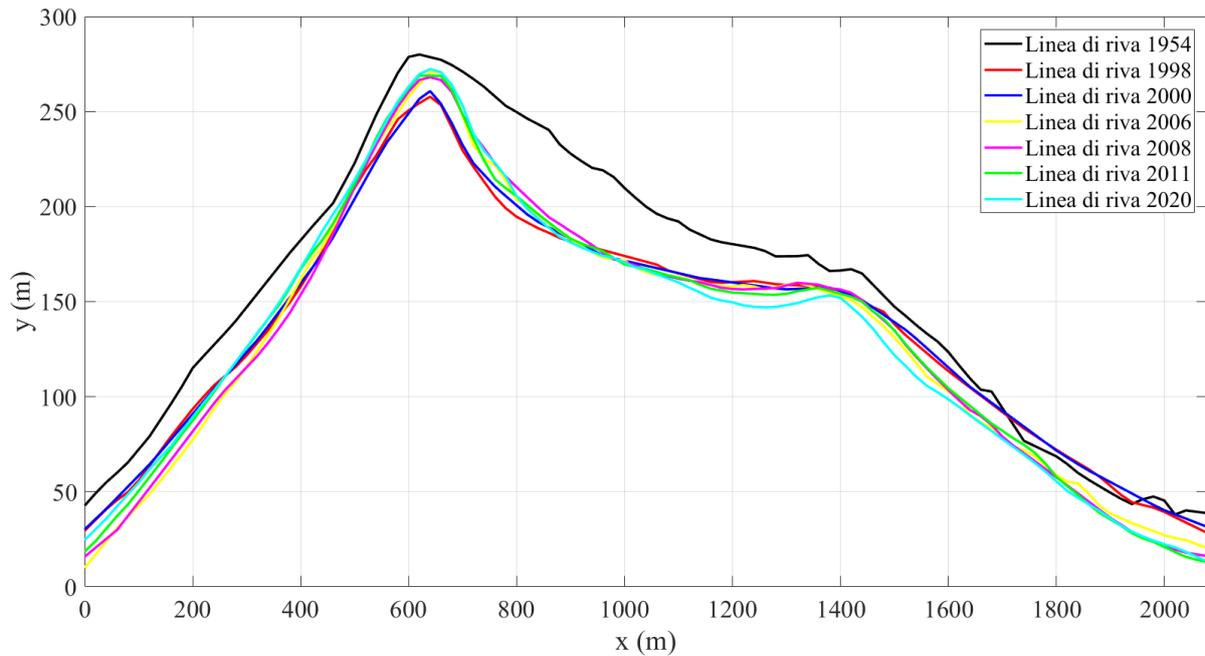


Figura 2 - Rappresentazione in scala distorta delle linee di riva storiche per il litorale di Calopezzati

Le linee di riva così predisposte (rappresentate con 104 vertici per uno sviluppo complessivo massimo lungo l'ascissa orizzontale, x, pari a 2080 m) sono state comparate al fine di calcolare, in corrispondenza di ciascun vertice di discretizzazione, le variazioni subite dalla linea di riva secondo l'equazione:

$$\Delta y_{1,2} = y_2 - y_1$$

dove i pedici indicano gli anni di riferimento (1 il periodo precedente, 2 quello successivo). Valori positivi di Δy significano un avanzamento della linea di riva, mentre valori negativi un arretramento della linea di riva. Per il calcolo delle tendenze evolutive in atto, si è fatto riferimento alle classiche metodologie indicate nella letteratura specializzata e di cui un compendio si può trovare in Dean e Dalrymple (2002).

3. Evoluzione storica della linea di costa

L'evoluzione storica della linea di costa, definita nel presente studio come analisi diacronica delle linee di riva, è basata sulle analisi delle variazioni calcolate sul confronto reciproco dei dati disponibili attraverso una progressione cronologica (1954-1998, 1998-2000, 2000-2006, 2006-2008, 2008-2011 e 2011-2020). In tal modo, è possibile valutare l'evoluzione nel tempo dei fenomeni di dinamica litoranea con particolare riferimento ai limiti di escursione della linea

di riva stessa. I risultati statistici di tale analisi sono riportati in forma grafica e tabellare nelle figure e tabelle di seguito riportate.

In Figura 3 sono riportate in scala distorta le variazioni delle linee di riva, Δy , risultanti dal confronto diretto delle 6 coppie di rilievi consecutivi, mentre nella Figura 4 sono riportate le stesse variazioni “normalizzate”, $\Delta y/\Delta t$, ossia corrette tenendo conto dell’arco temporale.

Dall’esame di tali figure appare evidente che consistenti fenomeni di dinamica costiera, lungo tutto il tratto litoraneo analizzato, si sono manifestati nei vari intervalli di tempo in esame. Nel primo arco temporale, ovvero fra il 1954 e il 1998, si osserva un forte arretramento della linea di riva, sebbene ripartito nell’arco di 44 anni, in particolare nel tratto a Nord e al centro del tratto litoraneo in esame. Avanzamenti lievi si sono riscontrati nel tratto Sud del litorale. Nell’intervallo di tempo successivo (1998-2000), pari a un arco temporale di 2 anni, la dinamica del litorale ha mostrato minori variazioni rispetto all’arco temporale 1954-1998, con alternanza di tratti in erosione e avanzamento. Valori massimi di erosione sono osservabili su nel tratto a Nord della foce del torrente Fiumarella, mentre valori massimi di avanzamento nel tratto a Sud del suddetto torrente.

Successivamente, nel periodo compreso fra il 2000 e il 2006 (intervallo temporale pari a 6 anni), il litorale risulta in erosione nei primi 400 m di litorale, ovvero nel tratto a Nord del torrente Fiumarella, quindi in avanzamento nei successivi 500 m, ovvero a cavallo del torrente in esame, e in sostanziale arretramento nel tratto successivo (centro e Sud del litorale di studio). Nell’arco temporale 2006-2008, avente lunghezza temporale di 2 anni, si assiste ad un processo di dinamica costiera simile a quello del periodo 1998-2000, ovvero con alternanza di tratti erosi e in avanzamento. In particolare, arretramenti massimi si osservano poco a Nord del torrente Fiumarella e nel tratto più a Sud del tratto litoraneo in questione, mentre avanzamenti massimi si riscontrano nel tratto appena a Sud del torrente Fiumarella.

Ponendo l’attenzione al periodo temporale che va dal 2008 al 2011 (arco temporale di 3 anni), si osserva un evidente avanzamento della linea di riva nel tratto a Nord del torrente Fiumarella e una generale erosione nel tratto a Sud del torrente Fiumarella.

Analizzando l’ultimo arco temporale in esame, ovvero quello che va dal 2011 al 2020 (arco temporale di 9 anni), è possibile osservare un tendenziale arretramento della linea di riva, con valori concentrati lungo tutta la zona a Sud del torrente Fiumarella. Avanzamenti della linea di riva sono riscontrabili zona a Nord del torrente Fiumarella e in un breve tratto a Sud del tratto litoraneo esaminato.

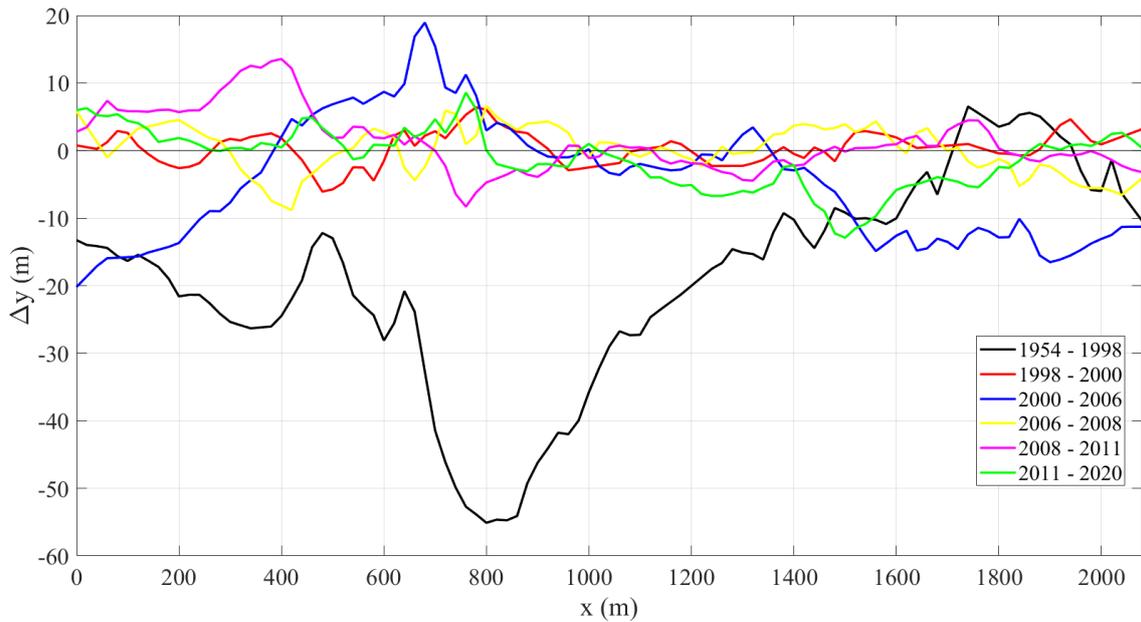


Figura 3 - Analisi diacroniche intermedie relative alla variazione relativa Δy (m) della linea di riva (litorale di Calopezzati)

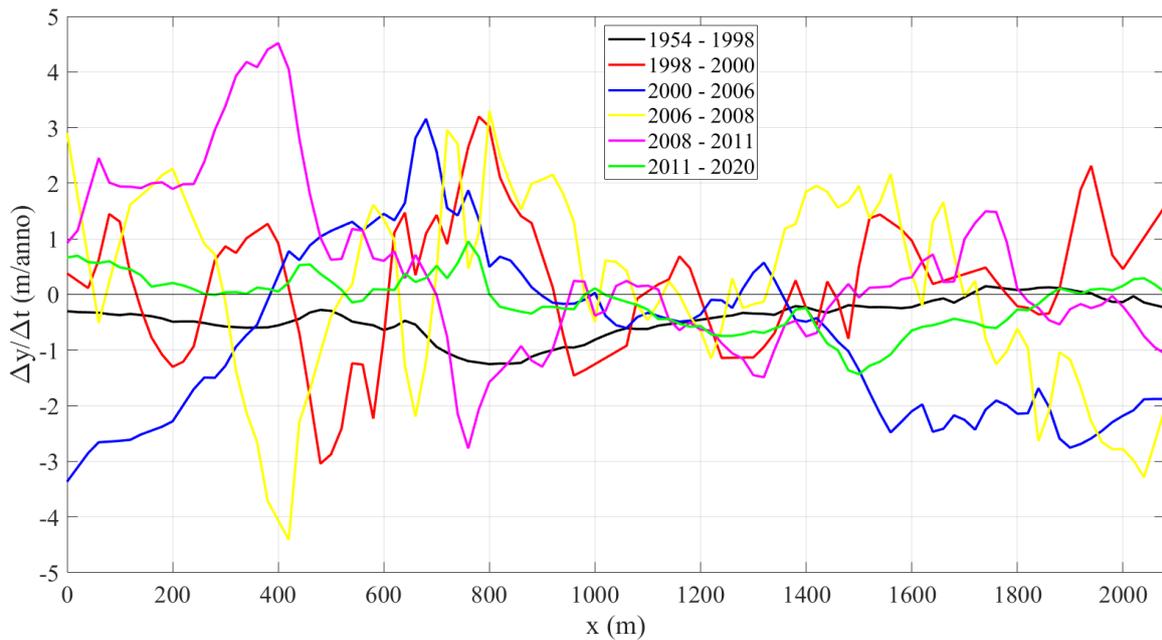


Figura 4 - Analisi diacroniche intermedie relative ai ratei annui di variazione $\Delta y / \Delta t$ (m/anno) della linea di riva (litorale di Calopezzati)

Dalla Tabella 1 alla Tabella 4 sono riportati i risultati delle analisi precedentemente descritte a carattere generale. Dall'esame dei dati elencati in tali tabelle si evince quanto segue.

Nel periodo tra il 1954 e il 1998, si evincono massimi valori di arretramento relativo pari a circa -55.1 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a circa 6.51 m; la variazione relativa media risultante in questo periodo è negativa e pari a circa -19.09 m, a testimonianza

del generalizzato arretramento in questo ampio arco temporale (Tabella 1); in termini di ratei annui di variazione della linea di riva nel periodo 1954-1998 si sono registrati arretramenti massimi pari a -1.25 m/anno e avanzamenti massimi pari a 0.15 m/anno, con una variazione media pari a -0.43 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che nel suddetto periodo l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio nel complesso altamente negativo (risultante da accrescimenti per 21.78 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni pari a -927.63 m²/anno). In particolare, l'area totale erosa è pari al 97.71 % del tratto costiero in esame. Inoltre, l'88.87% della lunghezza del litorale in esame risulta in erosione, corrispondente ad un lunghezza complessiva di circa 1917.06 m.

Nel successivo periodo 1998-2000, si riscontrano massimi valori di arretramento relativo pari a -6.08 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a 6.39 m; la variazione relativa media risultante in questo periodo è lievemente positiva e pari a 0.38 m. In termini di ratei annui di variazione della linea di riva nel periodo 1998-2000 si sono registrati arretramenti massimi pari a -3.04 m/anno e avanzamenti massimi pari a 3.2 m/anno, con una variazione media positiva pari a 0.19 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che, nel suddetto periodo, l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio nel complesso positivo (risultante da accrescimenti per 1158.57 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni per -780.94 m²/anno). In questo periodo, il 59.74 % della lunghezza del litorale in esame risulta in avanzamento, corrispondente a un lunghezza complessiva di 1281.3 m.

Nel successivo arco temporale 2000-2006, si riscontrano massimi valori di arretramento relativo pari a -20.2 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a circa 18.94 m; con tali valori, la variazione relativa media risultante in questo periodo risulta negativa e pari a -4.67 m, per effetto dell'arretramento della linea di riva nel tratto più a Nord e più a Sud del litorale in esame (Tabella 1). In termini di ratei annui di variazione della linea di riva, nel periodo 2000-2006 si sono registrati arretramenti massimi pari a -3.37 m/anno e avanzamenti massimi pari a 3.16 m/anno, con una variazione media negativa e pari a circa -0.78 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che nel suddetto periodo l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio nel complesso negativo, come nel periodo 1954-1998 (risultante da accrescimenti per 649.06 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni per -2230.58 m²/anno). In questo periodo, il 70.28 % della lunghezza del litorale in esame risulta in erosione, per una lunghezza complessiva di circa 1524.99 m.

L'arco temporale analizzato che va dal 2006 al 2008 è contraddistinto da massimi valori di arretramento relativo pari a -8.82 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a 6.6 m. La variazione relativa media risultante in questo periodo risulta essere lievemente positiva e pari

a 0.19 m (Tabella 1). In termini di ratei annui di variazione della linea di riva, nel periodo 2006-2008 si sono registrati arretramenti massimi pari a -4.41 m/anno e avanzamenti massimi pari a 3.3 m/anno, con una variazione media lievemente positiva e pari a 0.1 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che nel suddetto periodo l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio stabile dei sedimenti, similmente al periodo 1998-2000 (risultante da accrescimenti per 1522.37 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni per -1326.1 m²/anno). In questo periodo, il 55.94 % della lunghezza del litorale in esame risulta in avanzamento, per lunghezza complessiva di circa 1208.95 m.

Nel successivo periodo 2008-2011, si osservano massimi valori di arretramento relativo pari a -8.3 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a 13.55 m; la variazione relativa media risultante in questo periodo è positiva e pari a 1.29 m. In termini di ratei annui di variazione della linea di riva nel periodo 2008-2011 si sono registrati arretramenti massimi pari a -2.77 m/anno e avanzamenti massimi pari a 4.52 m/anno, con una variazione media lievemente positiva e pari a 0.43 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che, nel suddetto periodo, l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio nel complesso positivo (risultante da accrescimenti per 1604.35 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni per - 698.40 m²/anno). In questo lasso temporale, il 56.66 % della lunghezza del litorale in esame risulta in avanzamento, corrispondente a un lunghezza complessiva di 1227.27 m.

Nell'ultimo periodo in esame che va dal 2011 al 2020, si evincono massimi valori di arretramento relativo pari a circa -12.91 m e massimi valori di accrescimento relativo pari a circa 8.56 m; la variazione relativa media risultante in questo periodo è negativa e pari a circa -1.21 m, a testimonianza del tendenziale arretramento in questo arco temporale (Tabella 1); in termini di ratei annui di variazione della linea di riva nel periodo 2011-2020 si sono registrati arretramenti massimi pari a -1.43 m/anno e avanzamenti massimi pari a 0.95 m/anno, con una variazione media pari a -0.13 m/anno (Tabella 2). Ne consegue che nel suddetto periodo l'unità costiera nel suo insieme (Tabella 3 e Tabella 4) è stata contraddistinta da un bilancio nel complesso negativo (risultante da accrescimenti per 259.90 m²/anno di spiaggia a fronte di erosioni pari a -613.88 m²/anno). Il 52.25 % della lunghezza del litorale in esame risulta in erosione, corrispondente ad un lunghezza complessiva di circa 1112.99 m.

Periodo di riferimento	Variazioni relative della linea di riva (m)			
	Min	Max	Media	Dev. St
1954-1998	-55.10	6.51	-19.09	15.47
1998-2000	-6.08	6.39	0.38	2.36

RELAZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE DI CALOPEZZATI

2000-2006	-20.20	18.94	-4.67	8.99
2006-2008	-8.82	6.60	0.19	3.43
2008-2011	-8.30	13.55	1.29	4.45
2011-2020	-12.91	8.56	-1.21	4.34

Tabella 1. Analisi diacroniche: variazioni relative Δy nei periodi di riferimento (litorale di Calopezzati)

Periodo di riferimento	Ratei di variazione della linea di riva (m/anno)			
	Min	Max	Media	Dev. St
1954-1998	-1.25	0.15	-0.43	0.35
1998-2000	-3.04	3.20	0.19	1.18
2000-2006	-3.37	3.16	-0.78	1.50
2006-2008	-4.41	3.30	0.10	1.72
2008-2011	-2.77	4.52	0.43	1.48
2011-2020	-1.43	0.95	-0.13	0.48

Tabella 2. Analisi diacroniche: ratei di variazione $\Delta y/\Delta t$ nei periodi di riferimento (litorale di Calopezzati)

Periodo di riferimento	Tratti di litorale in ACCRESCIMENTO					
	A (m ²)	A (m ² /anno)	A/Atot %	L (m)	L/Ltot %	A/L (m)
1954-1998	958.25	21.78	2.29%	240.16	11.13%	3.99
1998-2000	2317.14	1158.57	59.74%	1281.30	59.72%	1.81
2000-2006	3894.37	649.06	22.54%	644.79	29.72%	6.04
2006-2008	3044.73	1522.37	53.45%	1208.95	55.94%	2.52
2008-2011	4813.05	1604.35	69.67%	1227.27	56.66%	3.92
2011-2020	2339.10	259.90	29.74%	1017.28	47.75%	2.30

Tabella 3. Analisi diacroniche: aree e lunghezze dei tratti di litorale in accrescimento (litorale di Calopezzati)

Periodo di riferimento	Tratti di litorale in EROSIONE					
	A (m ²)	A (m ² /anno)	A/Atot %	L (m)	L/Ltot %	A/L (m)
1954-1998	-40815.53	-927.63	97.71%	1917.06	88.87%	-21.29
1998-2000	-1561.87	-780.94	40.26%	864.25	40.28%	-1.81
2000-2006	-13383.47	-2230.58	77.46%	1524.99	70.28%	-8.78
2006-2008	-2652.20	-1326.10	46.55%	952.26	44.06%	-2.79
2008-2011	-2095.19	-698.40	30.33%	938.60	43.34%	-2.23
2011-2020	-5524.91	-613.88	70.26%	1112.99	52.25%	-4.96

Tabella 4. Analisi diacroniche: aree e lunghezze dei tratti di litorale in erosione (litorale di Calopezzati)

A supporto delle suddette considerazioni, nelle Figure 5 e 6 vengono mostrate, rispettivamente, le analisi diacroniche d'insieme relative alla variazione relativa Δy (m) e $\Delta y/\Delta t$ (m/anno) minima, massima e media della linea di riva. Si evincono, dall'analisi delle figure, arretramenti di costa nel primo lungo periodo (1954-1998), succeduti da una tendenziale stabilità nell'arco temporale 1998-2000 da cui si evincono lievi avanzamenti medi della linea di riva. Nel periodo 2000-2006 da cui si evincono lievi avanzamenti medi della linea di riva, mentre nel periodo 2006-2008 si assiste ad un tendenziale arretramento medio della linea di riva, mentre nel periodo successivo (2006-2008) il litorale risulta sostanzialmente stabile. Nell'arco temporale 2008-2011 si osserva un lieve avanzamento medio del litorale, mentre nell'ultimo periodo in esame (2011-2020) la linea di riva tende mediamente ad arretrare.

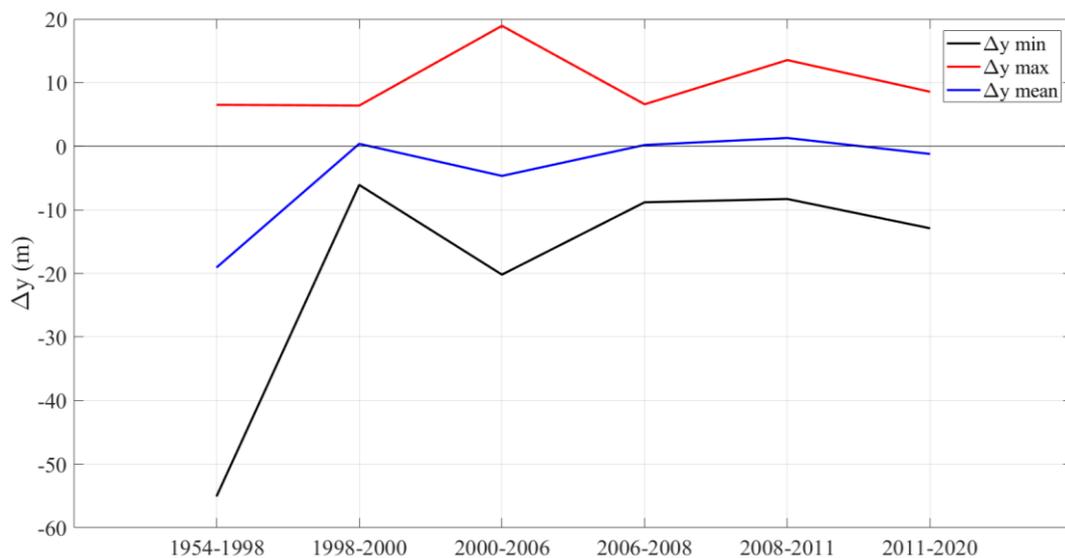


Figura 5 - Analisi diacroniche d'insieme relative alla variazione relativa Δy (m) minima, massima e media della linea di riva (litorale di Calopezzati)

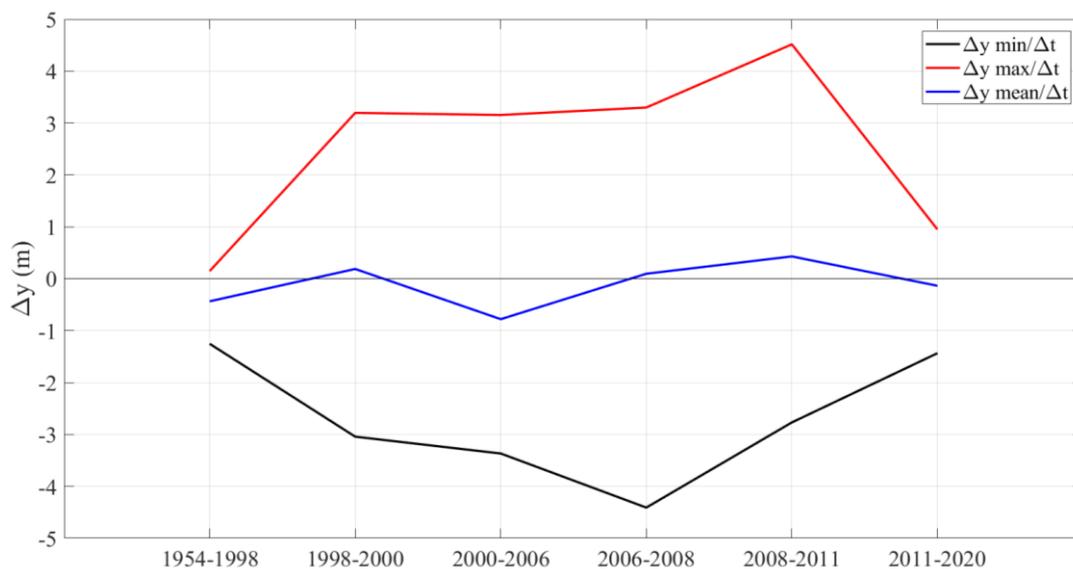


Figura 6 - Analisi diacroniche d'insieme relative ai ratei annui di variazione $\Delta y/\Delta t$ (m/anno) minima, massima e media della linea di riva (litorale di Calopezzati)

Le Figure 7 e 8 fanno riferimento alle analisi diacroniche d'insieme relative, rispettivamente, al bilancio delle aree e delle lunghezze di spiaggia emersa in erosione o in accrescimento. Ad un primo periodo (1954-1998) caratterizzato da un complessivo arretramento, è succeduto una fase temporale (1998-2000) in cui la spiaggia risulta in lieve avanzamento a scala globale; successivamente, nel periodo 2000-2006 si assiste ad una generale fase erosiva, mentre i 2 successivi archi temporali (2006-2008 e 2008-2011) mostrano processi di avanzamento della linea di riva. L'ultimo intervallo temporale in esame (2011-2020) mostra invece un tendenziale arretramento della linea di riva, in particolare in termini aree erose e, in minor modo, in termini di lunghezze erose.

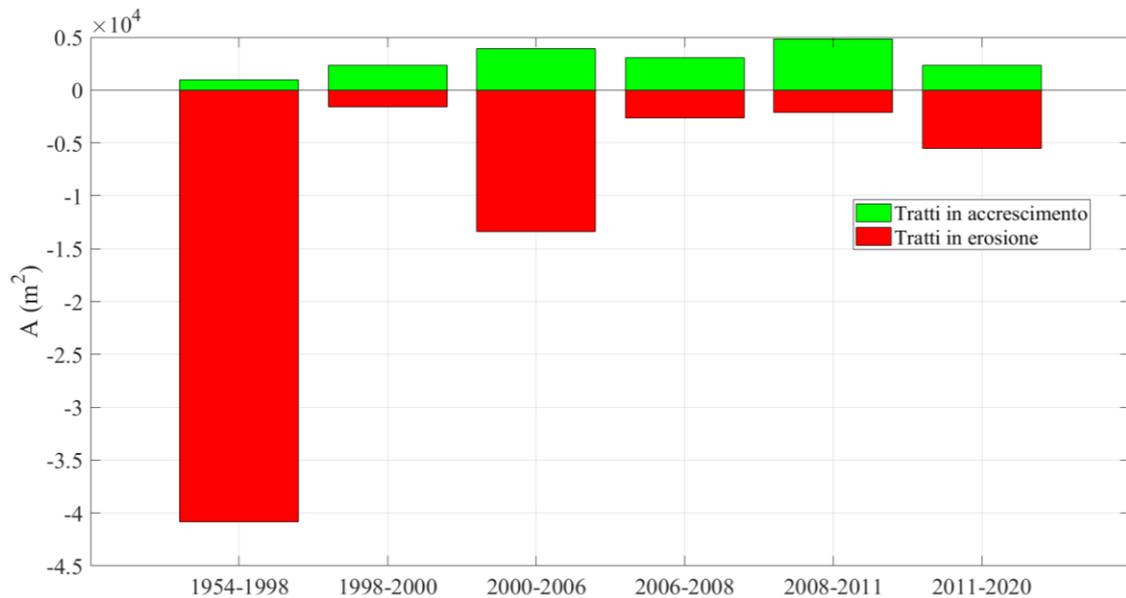


Figura 7 - Analisi diacroniche d'insieme: bilancio delle aree di spiaggia emersa in erosione/accrescimento (litorale di Calopezzati)

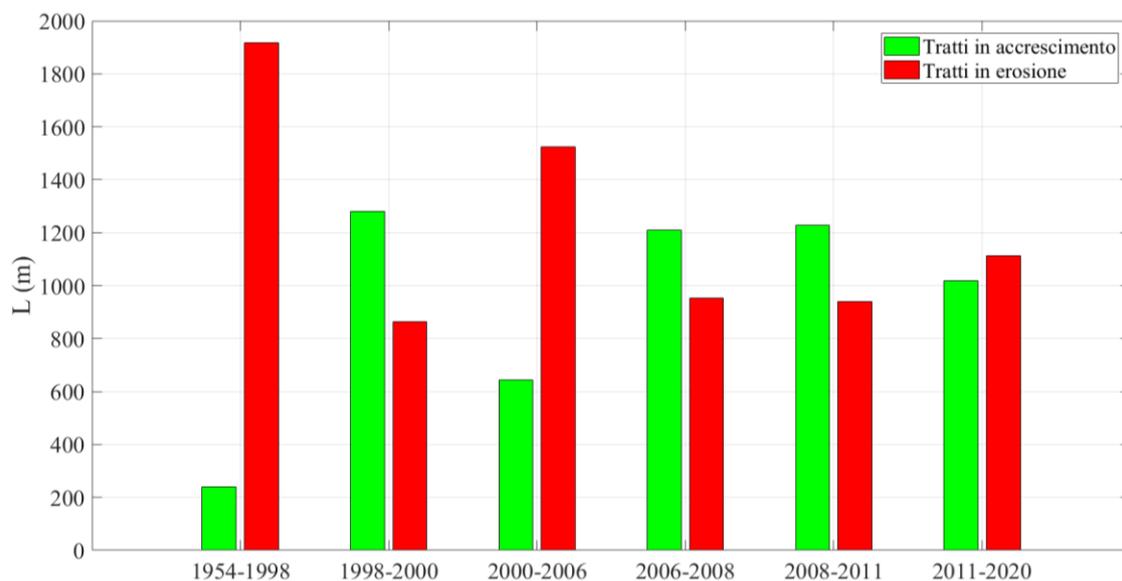


Figura 8 - Analisi diacroniche d'insieme: bilancio delle lunghezze di spiaggia emersa in erosione/accrescimento (litorale di Calopezzati)

La seguente Figura 9 mostra, nel sistema di riferimento originario e nei periodi temporali in esame (1954-1998, 1998-2000, 2000-2006, 2006-2008, 2008-2011 e 2011-2020), le aree in erosione (segnate in rosso) e quelle in accrescimento (segnate in verde) per il litorale di Calopezzati. Dalla suddetta figura si evince un primo arco temporale (1954-1998), molto più grande degli altri, in cui il litorale è nettamente in erosione, tranne nella parte di più della zona di studio. Il successivo periodo in esame (1998-2000) mostra un'oscillazione fra avanzamenti e arretramenti, mentre nell'arco temporale 2000-2006 i tratti erosi risultano essere più frequenti di quelli in avanzamento. Nei 2 archi temporali successivi (2006-2008 e 2008-2011), si torna ad un alternarsi di erosioni e avanzamenti, con una maggiore frequenza di tratti in avanzamento. Nell'ultimo periodo di studio (2011-2020) si assiste ad un tendenziale fenomeno erosivo del litorale in esame, in particolare nel tratto a Sud del torrente Fiumarella. Di contro, a Nord del torrente Fiumarella, si osserva un lieve avanzamento generalizzato.

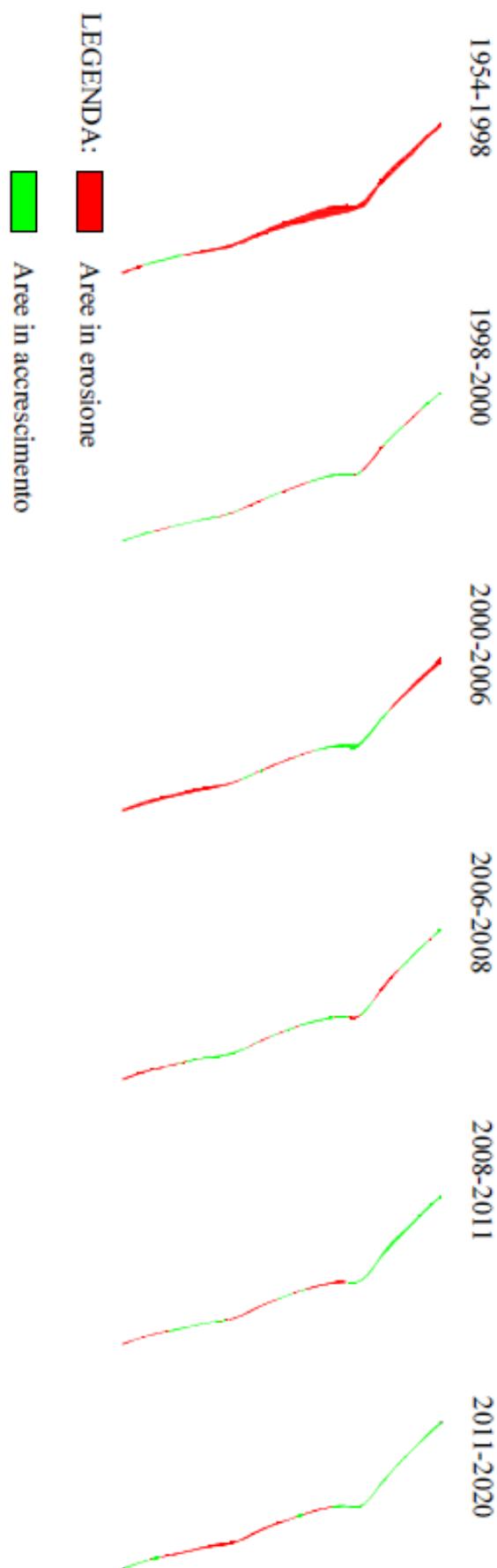


Figura 9 - Localizzazione delle aree in erosione e in accrescimento nei periodi di osservazione analizzati (litorale di Calopezzati)

Il possibile effetto delle singolarità morfologiche presenti nel litorale di Calopezzati, come la foce del torrente Fiumarella, sull'evoluzione storica delle dinamiche di trasporto solido cross-shore (normale alla spiaggia) e long-shore (parallelo alla spiaggia) può essere analizzato ricorrendo alla metodologia di analisi morfologica nota come *Even-Odd Analysis*.

La metodologia di analisi dell'evoluzione di un litorale nota come *Even-Odd Analysis* (letteralmente analisi pari-dispari, introdotta da Berek e Dean nel 1982) muove dall'ipotesi di base di poter individuare, nell'ambito della variazione storica della linea di riva, una condizione di "singolarità" morfologica, che può essere indotta da elementi di alterazione del regime del trasporto solido litoraneo, contraddistinta da andamenti della linea di riva che corrispondono a criteri di simmetria geometrica.

Esempi tipici di singolarità morfologica sono, a esempio, gli apparati naturali delle foci fluviali, la presenza di un ostacolo al flusso solido litoraneo disposto in senso trasversale (come nel caso delle foci armate o delle strutture portuali) o orizzontale (come nel caso di dighe foranee). L'andamento nella linea di riva, esaminata in questo caso in termini di rateo di variazione annua $\Delta y/\Delta t$ (m/anno), può essere analizzata e scomposta in funzione di:

- una componente che risponde ai criteri di simmetria bilaterale (chiamata *even* o *symmetric*);
- una componente che risponde ai criteri di simmetria centrale (chiamata *odd* o *anti-symmetric*).

Con riferimento agli schemi di Figura 10, la semplice sommatoria delle due polilinee (*even* e *odd*) fornisce la polilinea rappresentativa della linea di riva in esame. Una volta individuate e scomposte le polilinee, dalla funzione nota (in questo caso i ratei di variazione annua della linea di riva) rappresentata dall'equazione:

$$y = f(x) = f_E(x) + f_O(x)$$

dove:

- f_E : simmetria (*even*) $f_E(-x) = f_E(+x)$
- f_O : asimmetria (*odd*) $f_O(-x) = -f_O(+x)$

è possibile distinguere ed esaminare in modo oggettivo il trasporto solido litoraneo sulla base dell'andamento di queste funzioni che ne rappresentano, rispettivamente, le componenti trasversale (*even*) e longitudinale (*odd*).

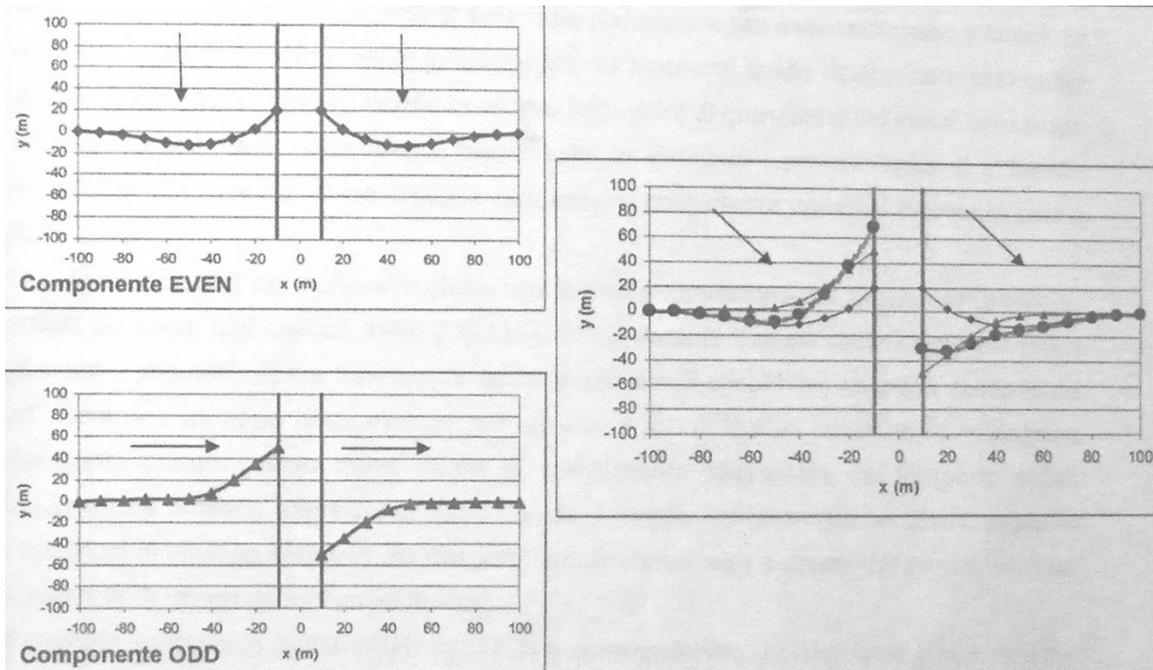


Figura 10 - Schematizzazione dell'evoluzione litoranea sulla base del metodo di analisi morfologica *even-odd*

Per il calcolo delle due funzioni (*even* e *odd*) in una generica sezione x della linea di riva, si adottano le seguenti equazioni desunte sulla base delle equazioni sopra definite:

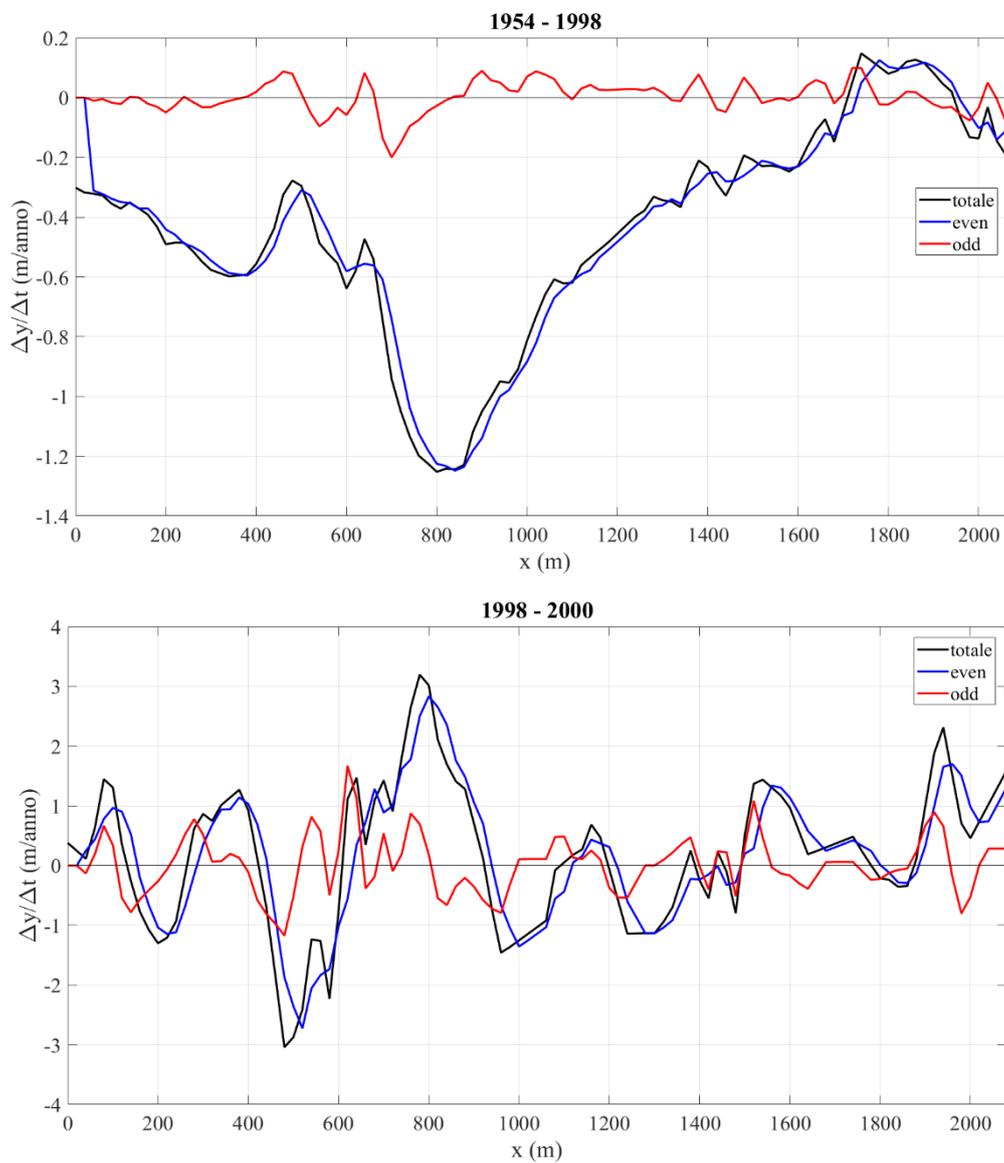
- simmetria (*even*): $f_E(x) = \frac{f(x + \Delta x) + f(x - \Delta x)}{2}$
- asimmetria (*odd*): $f_O(x) = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x)}{2}$

dove i termini $+\Delta x$ e $-\Delta x$ individuano i transesti di calcolo posti a uguale distanza (rispettivamente a destra e sinistra del punto x). Il termine Δx rappresenta il passo di discretizzazione adottato (20 m nella presente analisi).

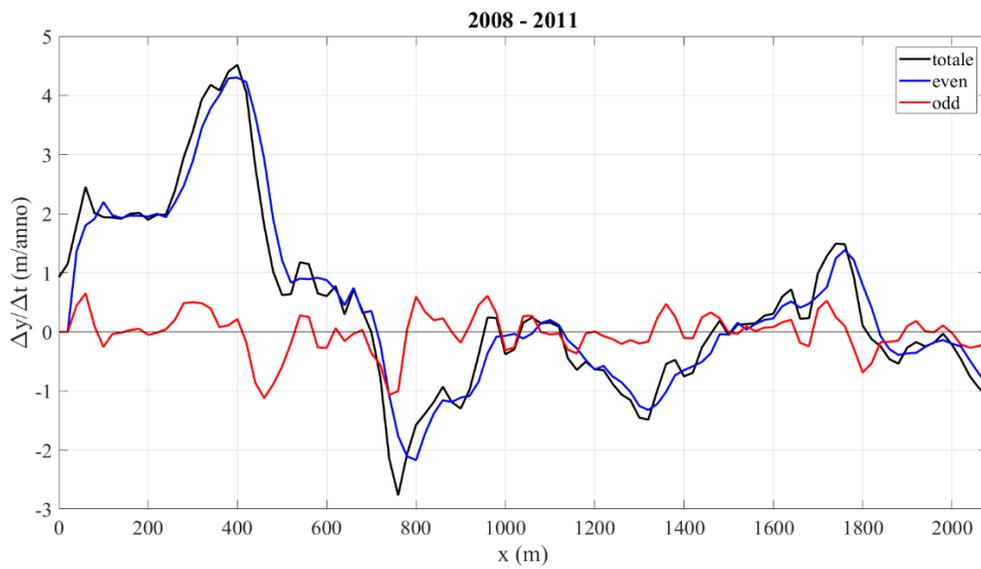
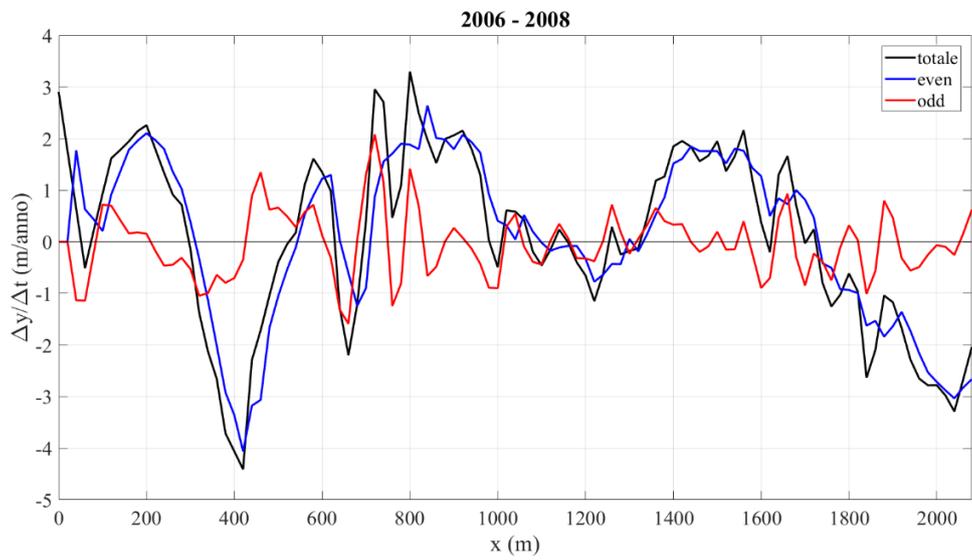
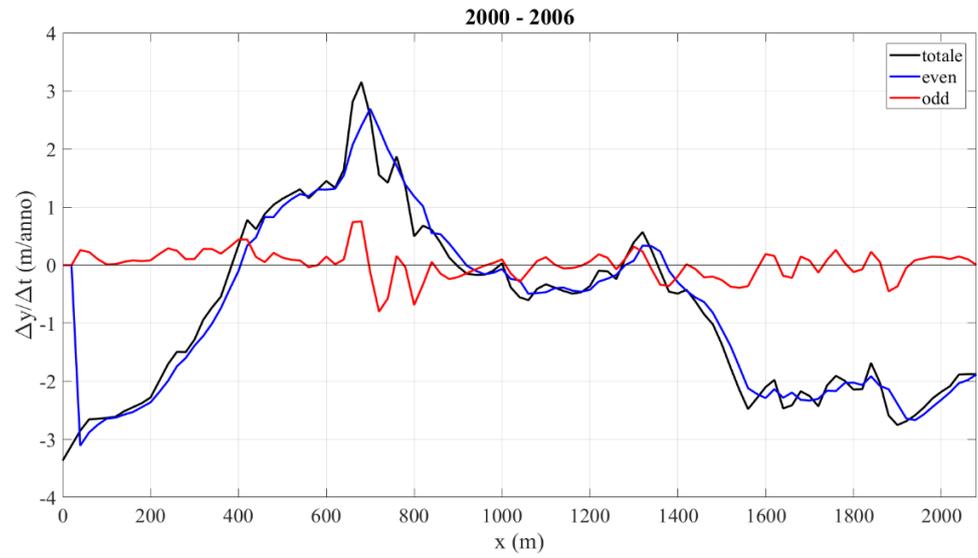
Il metodo di analisi *even-odd* è stato applicato alle 6 coppie di diacroniche di variazione annua $\Delta y/\Delta t$ del litorale di Calopezzati. I risultati delle analisi *even-odd* relativi ai ratei annui di variazione $\Delta y/\Delta t$ (m/anno) per gli archi temporali di riferimento (1954-1998, 1998-2000, 2000-2006, 2006-2008, 2008-2011 e 2011-2020) sono mostrati in Figura 11.

Dall'analisi dei risultati si evidenzia, in generale, una forte aliquota della componente *even* rispetto a quella *odd* per i periodi temporali considerati. Ciò permette di evidenziare una maggiore componente del trasporto solido trasversale al litorale in esame rispetto a quella longitudinale che ha influenzato la storia morfologica del litorale fino ai nostri giorni. Le componenti relative a maggiori variazioni cross-shore del litorale sono associate alle sezioni nell'intorno del torrente Fiumarella (presenza di una foce, la cui morfologia è indotta dalla

combinazione di trasporto solido costiero e fluviale), posto circa ad un'ascissa x pari a circa 600 m nel dominio di calcolo adottato. La presenza di questa foce fluviale fa sì che, in generale, vi sia una concomitanza di effetti long-shore e cross-shore su questi tratti, con prevalenza comunque della componente trasversale sulla dinamica di spiaggia. La presenza della componente relativa alla variazione di spiaggia per effetto del trasporto solido trasversale è particolarmente evidente nel periodo 1954-1998, 2000-2006 e 2008-2011. Per ciò che concerne il contributo del trasporto solido long-shore, si evince dalla Figura 11 che esso abbia una discreta influenza sul trasporto solido totale nei periodi 1998-2000, 2006-2008 e 2011-2020, con valori massimi che si hanno in corrispondenza della foce del Fiumarella e poco più a Sud.



RELAZIONE MORFOLOGICA DEL LITORALE DI CALOPEZZATI



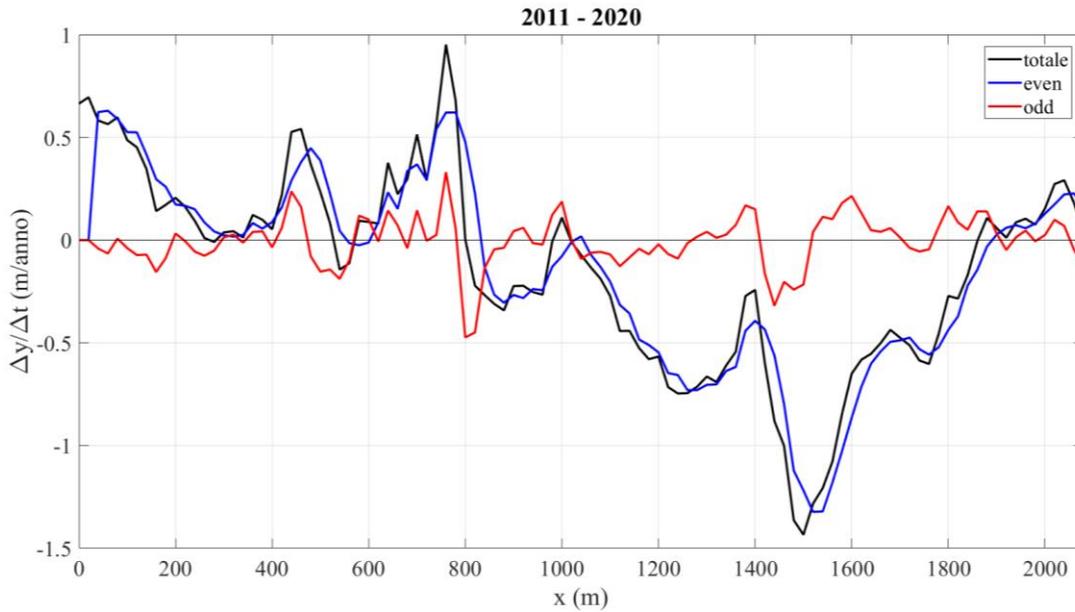


Figura 11 - Analisi even-odd relativa ai ratei annui di variazione $\Delta y/\Delta t$ (m/anno) (1954-1998, 1998-2000, 2000-2006, 2006-2008, 2008-2011 e 2011-2020)

4. Trasporto solido long-shore

La serie di elaborazioni parte con il calcolo del flusso solido longitudinale avvenuto nei periodi storici di rilievo della linea di riva risolvendo, secondo uno schema implicito alle differenze finite, la nota equazione differenziale di continuità del bilancio solido litoraneo (utilizzata dai modelli numerici di morfodinamica costiera a una linea) per il volume di controllo indicato in Figura 12, in funzione della componente longitudinale Q del flusso litoraneo:

$$\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{1}{D_s} \left[\frac{\partial Q}{\partial x} - (q_o - q_i) \right] = 0$$

dove $\partial y/\partial t$ esprime la variazione temporale della linea di riva (rateo medio annuo, in questo caso) relativa al volume di controllo di cui la precedente espressione esprime la conservazione dei volumi solidi coinvolti. Per risolvere l'equazione precedente, al fine di calcolare la funzione $Q(x)$, è necessario prefissare alcuni parametri e conoscere le condizioni di flusso ai due estremi del tratto di costa in esame.

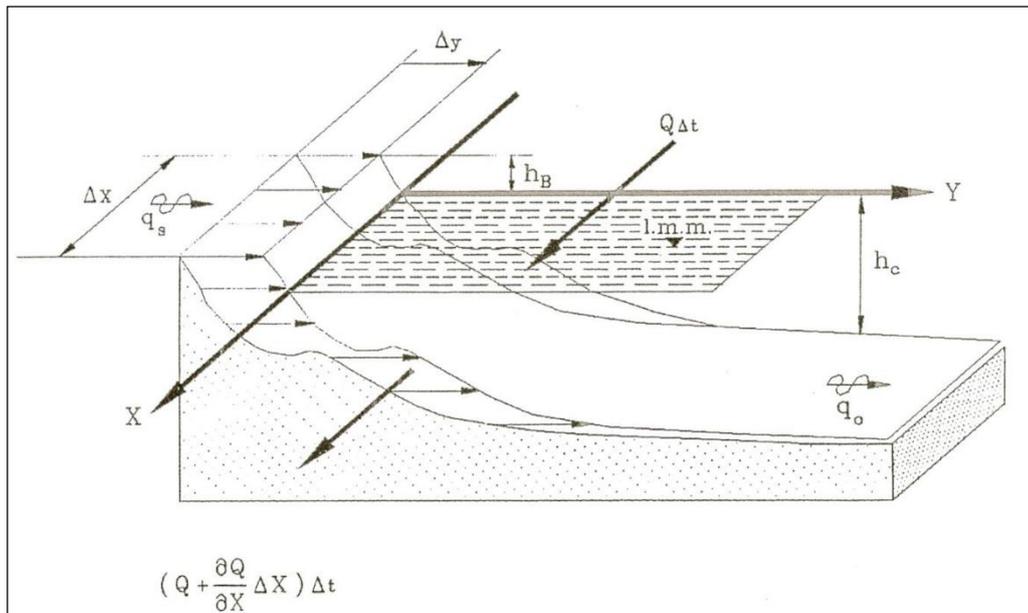


Figura 12 - Schematizzazione delle condizioni di bilancio solido in un modello ad una linea

Per le applicazioni seguenti si è tenuto conto delle seguenti condizioni a contorno:

- *Flussi solidi longitudinali*, noti in corrispondenza delle n sezioni di estremità del tratto di costa in esame: $Q_1 = 0$ a Nord, e $Q_n = Q_{n+1}$ a Sud.
- *Profondità D_s* , relativa alla fascia di litorale attivamente coinvolta dai fenomeni di trasporto solido litoraneo associati al moto ondoso incidente; questa grandezza è definita in funzione della profondità di chiusura, h_c , della spiaggia sommersa e dall'altezza R relativa ai massimi livelli d'acqua, pari alla somma di un'aliquota del massimo sovrizzo di tempesta e del massimo run-up; tale valore risulta pari a 7.79 m (vedi studio meteomarinò del presente studio); in particolare, $h_c = 6.32$ m e $R = 1.47$ m.
- *Apporti solidi trasversali q_i* , lungo il tratto di costa in esame; il tratto di costa in esame è interessato dalla presenza della foce del torrente Fiumarella. Nel calcolo del bilancio solido litoraneo non viene inglobato il contributo del trasporto solido medio annuo del Fiumarella, al fine di analizzare il trasporto solido solo indotto dal clima ondoso. Il trasporto solido alla foce del torrente Fiumarella verrà inserito nella modellazione morfodinamica dell'evoluzione del litorale.
- *Perdite solide trasversali q_i* , lungo il tratto di costa in esame; nel caso in esame è stato assunto, per il sistema di bilancio solido, un valore delle perdite trasversali identicamente nullo per tutte le sezioni discretizzate nell'analisi morfologica, in modo da porre in maggior rilievo la dipendenza delle variazioni della linea di riva dalla sola componente longitudinale del trasporto solido.

I risultati delle elaborazione sui diversi archi temporali disponibili sono mostrati in Figura 13.

Dall'analisi si evince un tendenziale arretramento di spiaggia nel primo periodo (1954-1998) con un picco di trasporto solido medio annuo quantificabile in $-7077 \text{ m}^3/\text{anno}$ nella zona Sud del litorale in esame. Nel successivo arco temporale 1998-2000 si assiste ad un'alternanza fra arretramenti e avanzamenti, con valore massimo (positivo) di portata solida pari a $3036 \text{ m}^3/\text{anno}$ a Sud del litorale di studio e valori massimo (negativo) di portata solida pari a $-1762 \text{ m}^3/\text{anno}$ nei pressi del torrente Fiumarella. Per il periodo 2000-2006 si osserva perdite generalizzate di trasporto solido medio annuo long-shore, con valore di picco pari a $-12204 \text{ m}^3/\text{anno}$ a Sud del litorale in esame. Nell'arco temporale 2006-2008 si hanno prevalentemente fenomeni di avanzamenti, con valore massimo pari a $6552 \text{ m}^3/\text{anno}$ corrispondente alla zona Sud del litorale di studio. In questo periodo, le perdite di trasporto solido sono minime, con valori di punta pari a $-997 \text{ m}^3/\text{anno}$. Nel penultimo periodo di studio (2008-2011), si hanno avanzamenti di spiaggia, con valore di picco di $Q = 10841 \text{ m}^3/\text{anno}$ che si trova poco più a Sud del Fiumarella. Nell'ultimo periodo in esame (2011-2020), i fenomeni di dinamica costiera sono sostanzialmente caratterizzati da arretramenti di spiaggia, con valore massimo (negativo) pari a $-2526 \text{ m}^3/\text{anno}$ a Sud del litorale di studio. Valori positivi, in questo ultimo periodo, sono presenti nel tratto a Nord del Fiumarella, con un picco pari a $1647 \text{ m}^3/\text{anno}$.

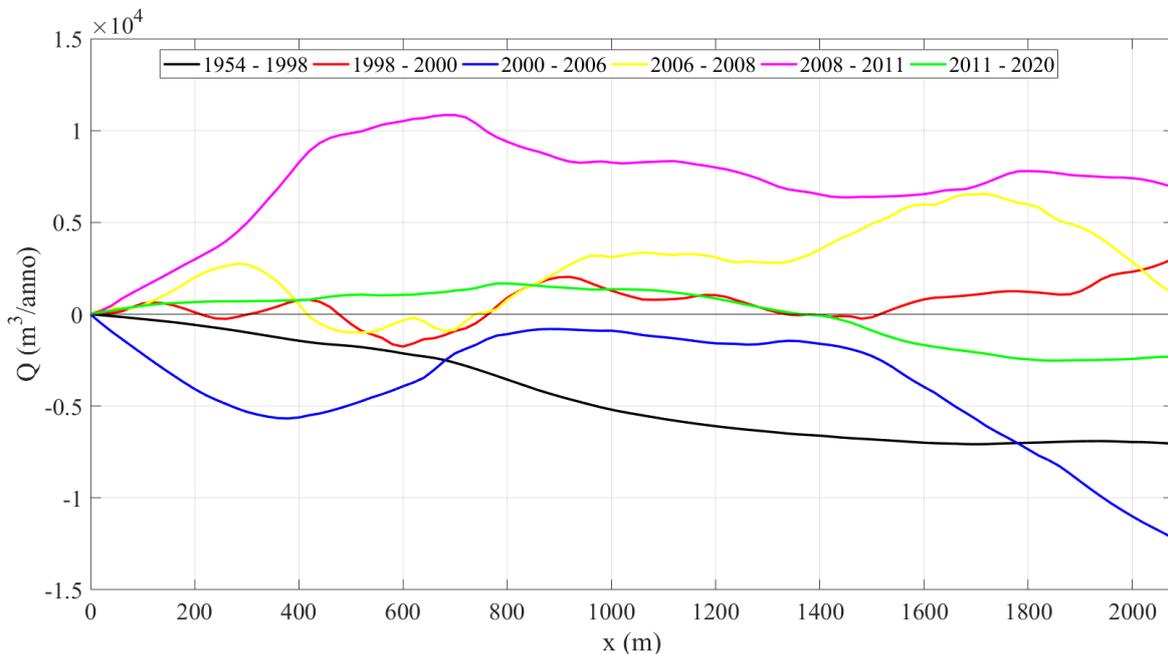


Figura 13 - Schema di bilancio del trasporto solido litoraneo calcolato in funzione dei ratei annui di variazione $\Delta y/\Delta t$ (1954-1998, 1998-2000, 2000-2006, 2006-2008, 2008-2011 e 2011-2020)

Al fine di calcolare il trasporto solido long-shore (lungoriva), Q_{ls} , in m^3/anno , indotto dal moto ondoso incidente nei 3 punti sottocosta (punti A, B e C, così come illustrato nello Studio

meteomarinario della presente convenzione), viene adottata la relazione empirica di Kamphuis (1991), migliorativa rispetto a quella classica del CERC (Shore Protection Manual, 1984), poiché tiene conto delle caratteristiche del moto ondoso al frangimento, della pendenza sottocosta del fondale e del diametro medio dei sedimenti:

$$Q_{ls} = K_Q H_{sb}^2 T^{1.5} m_b^{0.75} D_{50}^{-0.25} \sin^{0.6}(2\alpha_b)$$

dove:

$$K_Q = 6.4 \cdot 10^4;$$

H_{sb} (altezza al frangimento dell'onda di modellazione) = 1.46 m (in corrispondenza del punto A), 1.43 m (in corrispondenza del punto B) e 1.49 m (in corrispondenza del punto C);

$T = T_e$ (periodo dell'onda di modellazione) = 5.49 s (in corrispondenza del punto A), 5.47 s (in corrispondenza del punto B) e 5.56 s (in corrispondenza del punto C);

m_b (pendenza media sottocosta del fondale, ovvero dal frangimento del moto ondoso alla linea di riva) = 0.049 (in corrispondenza del punto A), 0.051 (in corrispondenza del punto B) e 0.053 (in corrispondenza del punto C); si evidenzia che tali valori sono stati dedotti dal rilievo sottocosta del 07/06/2012 che è stato fornito dal Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra dell'Università della Calabria (vedi pagina 116 dello Studio meteomarinario);

D_{50} (diametro medio dei sedimenti) = 30.04 mm (nei pressi del transetto costiero A), 30.04 mm (nei pressi del transetto B) e 13.92 mm (nei pressi del transetto C); si evidenzia in questo caso che i prelievi dei sedimenti, presi come valori medi in alcuni transetti a cavallo della linea di riva, sono stati effettuati dal Dipartimento di Biologia, Ecologia e Scienze della Terra dell'Università della Calabria in una campagna di misura effettuata a dicembre 2019;

α_b (angolo d'incidenza fra la normale al litorale e la direzione di propagazione dell'onda di modellazione al frangimento, da esprimere in radianti nella formula di Kamphuis) = 50° (in corrispondenza del punto A), 48° (in corrispondenza del punto B) e 48° (in corrispondenza del punto C).

Pertanto, il trasporto solido long-shore medio annuo risultante per i 3 punti sottocosta in esame risulta essere diretto da Nord a Sud (vedi Studio meteomarinario) ed è pari a:

$$Q_{ls} = 77352.99 \text{ m}^3/\text{anno} \text{ (in corrispondenza del punto A)}$$

$$Q_{ls} = 76498.74 \text{ m}^3/\text{anno} \text{ (in corrispondenza del punto B)}$$

$$Q_{ls} = 106176.99 \text{ m}^3/\text{anno} \text{ (in corrispondenza del punto C)}$$