

RETE GEODETICA COSTIERA E MAREOGRAFICA LIVELLAZIONE DI ALTA PRECISIONE E INQUADRAMENTO GEODETICO

RELAZIONE FINALE



Aprile 2024

Autori/Autrici:

Nunzio De Nigris¹, Alberto Pellegrinelli², Flavia Sistilli¹

Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

Anna Gloria Angonese¹, Nunzio De Nigris¹, Michele Di Lorenzo¹, Massimo Ferrari¹, Stefano Gandolfi³, Giancarlo Grigatti¹, Enrico Paolo Marzola¹, Laura Monti², Maurizio Morelli¹, Alberto Pellegrinelli², Flavia Sistilli¹, Luca Tavasci³, Saverio Turolla¹, Andrea Valentini¹, Enrica Vecchi³

¹ Agenzia Regionale per la Prevenzione, l'Ambiente e l'Energia dell'Emilia-Romagna - Arpae

² Dipartimento di Ingegneria – Università di Ferrara - DE

³ Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali - Università di Bologna - DICAM

Sommario

1. PREMESSA.....	5
2. LIVELLAZIONE GEOMETRICA DELLA RGC.....	6
2.1. Linee di livellazione.....	6
2.2. Analisi delle discrepanze.....	9
2.3. Controllo chiusura dei poligoni.....	12
2.4. Riferimento altimetrico RGC 2023.....	13
2.5. Calcolo delle quote finali - compensazioni.....	15
3. INQUADRAMENTO RETE MAREOGRAFICA.....	19
3.1. Caposaldi e quote di riferimento per i sensori mareografici e GNSS co-locali.....	19
3.2. Inquadramento e calibrazione delle stazioni mareografiche di Cervia e Cattolica.....	19
3.3. Inquadramento della stazione mareografica di Porto Garibaldi pre RGC2023.....	22
3.4. Inquadramento della stazione mareografica di Porto Garibaldi in RGC2023.....	23
3.5. Inquadramento del sensore mareografico del Faro di Goro.....	23
3.6. Inquadramento e omogeneizzazione della stazione di Ravenna.....	24
4. LIVELLO MEDIO MARE LOCALE PORTO GARIBALDI.....	25
4.1. Serie temporale dei livelli medio mare mensili.....	25
4.2. Serie temporale della stazione GNSS GARI00ITA.....	26
4.3. Livello medio mare locale Porto Garibaldi 2017.0 e quota locale del PGFV0100.....	27
4.4. Osservazioni sull'utilizzo del livello medio mare locale PG2017.....	28
5. MONOGRAFIE RGC 2023.....	29

1. PREMESSA

Per l'inquadramento altimetrico dei rilievi topo-batimetrici della spiaggia attiva del [litorale emiliano-romagnolo](#) si è sempre fatto riferimento alla rete di capisaldi per la misura della [subsidenza](#), istituita nel 1984, almeno per quanto riguarda l'area costiera, e livellata per l'ultima volta nel 2005 (di seguito Arpa 2005).

Nel 2016, l'attuale Unità Mare e Costa di Arpa, che gestisce la [rete regionale di monitoraggio morfologico](#) per l'analisi dell'evoluzione della spiaggia attiva dell'Emilia-Romagna e per la valutazione dell'erosione costiera, in seguito alla scomparsa di diversi capisaldi della rete Arpa 2005 e al non più aggiornamento della quota, ha riscontrato la necessità di realizzare una nuova rete di riferimento: la [Rete Geodetica Costiera – RGC](#).

Gli obiettivi principali della RGC sono di disporre di:

- una infrastruttura geodetica per georiferire, in un unico sistema di riferimento, i rilievi topografici e batimetrici del litorale regionale;
- una rete costituita da una serie di vertici stazionabili con strumentazione GNSS e inquadrati nel sistema di riferimento nazionale [ETRS89 – ETRF2000](#) (epoca 2008.0), così come prescritto dal D.M. del 10 novembre 2011;
- una rete omogeneamente distribuita lungo il litorale, e a ridosso della spiaggia;
- di vertici con coordinate tridimensionali aventi precisione di ordine centimetrico ($\text{sqm} \leq 2 \text{ cm}$) sia in termini planimetrici che per la quota ellissoidica;
- una quota ortometrica aggiornata, in un territorio subsidente.

La RGC è stata realizzata ed è mantenuta aggiornata in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali (DICAM) dell'Università di Bologna e il Dipartimento di Ingegneria (DE) dell'Università di Ferrara.

La RGC è costituita, all'ottobre 2023, da 50 vertici GNSS distribuiti lungo la costa della Regione Emilia-Romagna, distanti mediamente 3-4 km l'uno dall'altro¹.

Per quanto riguarda la quota, dal momento che i vertici RGC sono stazionabili con stadia (in tal senso possono essere anche definiti caposaldi) a ognuno di essi è stata attribuita, oltre alla quota ellissoidica, anche una quota ortometrica, tramite collegamento per livellazione geometrica al più vicino caposaldo della "Rete regionale di controllo della subsidenza", misurata con un ultimo rilievo di livellazione nel 2005. La quota misurata al 2005 è stata successivamente aggiornata al 2018 tramite i modelli di subsidenza stimati con misure interferometriche.

Le misure di livellazione geometrica di alta precisione, realizzate dal 31 gennaio al 26 aprile 2023, hanno avuto come obiettivo l'aggiornamento dei dislivelli ortometrici-geoidici tra i vertici RGC e, contemporaneamente, hanno permesso il collegamento dei vertici RGC con le stazioni mareografiche esistenti di [Porto Garibaldi \(Arpa\)](#) e di [Marina di Ravenna \(ISPRA\)](#) e con due nuove stazioni mareografiche installate da Arpa a Cervia (RA) e Cattolica (RI) nell'ambito del progetto [AdriaClim](#) (progetto Interreg Italy-Croatia).

Porto Garibaldi, operativa dal 2009, Cervia e Cattolica, operative da luglio 2023, sono integrate con una stazione permanente GNSS. Questo sistema integrato permette, nella valutazione della

¹ Il vertice CARI0100_NEW è scomparso dopo la livellazione

variazione di quota, di discriminare la componente dovuta dall'innalzamento del mare rispetto a quella dell'abbassamento del terreno.

La livellazione ha permesso, inoltre, il collegamento altimetrico con il sensore mareografico radar "Faro di Goro" installato alcuni anni fa da Arpae nella Sacca di Goro (FE) sul retro dell'omonimo faro.

La linea di livellazione costiera e le stazioni mareografiche integrate con GNSS permettono quindi un monitoraggio preciso e aggiornato del livello del mare in tempo reale, consentono il calcolo dell'attuale livello medio mare e permetteranno il monitoraggio delle sue variazioni future (eustatismo). Inoltre, tutte queste informazioni sono fondamentali per le simulazioni e la modellistica di previsione di marea del litorale regionale.

2. LIVELLAZIONE GEOMETRICA DELLA RGC

2.1. Linee di livellazione

La livellazione geometrica realizzata è costituita da:

- linea di livellazione principale: partendo dal vertice GABI0100 situata a Gabicce Mare (PU), a sud, si sviluppa lungo la costa fino al vertice FVFG0500, a nord, presso il Faro di Goro (FE), per un totale di circa 157 km;
- linee secondarie: sono linee/tratti che si diramano dalla linea principale; sono servite per quotare vertici RGC fuori linea e per quotare i caposaldi di inquadramento delle due nuove stazioni mareografiche integrate Arpae di Cervia e Cattolica; il totale delle linee secondarie è di circa 7 km;
- linee di inquadramento: sono linee che hanno consentito il collegamento a capisaldi della rete di livellazione fondamentale [IGM](#); il totale delle linee di inquadramento è di circa 18 km;
- linee di completamento: durante le operazioni di rilievo sono stati aumentati i chilometri di livellazione previsti originariamente aggiungendo delle linee/tratti che hanno consentito di inserire gli attraversamenti del canale Candiano a Ravenna e del fiume/torrente Bevano a Cervia in anelli/poligoni chiusi e quindi soggetti a verifica della tolleranza di chiusura; Il totale delle linee di completamento è di circa 27 km.

Il totale delle linee di livellazione geometrica risulta quindi di circa **209 km**.

Dal momento che i vertici RGC distano mediamente 3-4 km l'uno dall'altro, per rispettare le specifiche della livellazione di alta precisione, che prevedono un'interdistanza massima tra i caposaldi di circa 1 km, in fase di progetto sono stati individuati caposaldi esistenti lungo la linea materializzati nel tempo da enti diversi ed è stato comunque necessario materializzare un numero importante di nuovi contrassegni.

Al termine del lavoro di livellazione la linea costiera è risultata costituita da un totale di 246 caposaldi così composti:

- 51 caposaldi RGC;
- 99 caposaldi Arpa2005;
- 10 caposaldi IGM;
- 28 caposaldi di altri Enti (Comune di Ravenna, AGIP, ENI, ecc.);
- 58 caposaldi di nuova materializzazione.

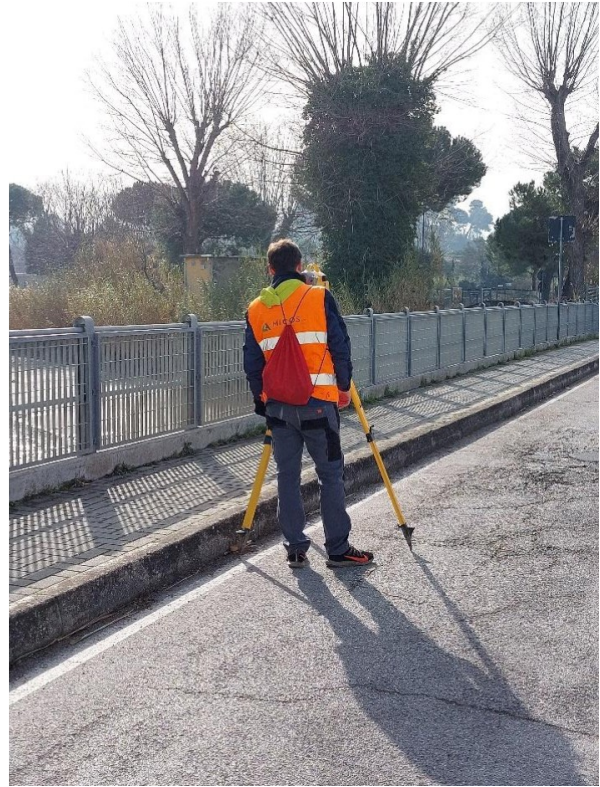




Figura 1 - Alcune fasi delle misure di livellazione geometrica di alta precisione.

2.2. Analisi delle discrepanze

Ogni tratto (da caposaldo a caposaldo) è stato eseguito in Andata e Ritorno (A/R) con verifica sia in corso d'opera sia al termine delle misure, affinché la discrepanza, cioè la differenza tra il dislivello in Andata e quello in Ritorno, risultasse sempre inferiore alla tolleranza indicata nel disciplinare tecnico. In particolare, le discrepanze sono risultate sempre inferiori alla tolleranza dell'alta precisione T_1 e, per la quasi totalità dei casi, inferiori anche alla tolleranza dell'altissima precisione T_2 .

Tolleranza dell'alta precisione	Tolleranza dell'altissima precisione
$T_1 = 2.5\sqrt{D} \text{ mm}$	$T_2 = 2\sqrt{D} \text{ mm}$

con D distanza media (tra andata e ritorno) in km tra i caposaldi del tratto livellato.

L'andamento dei valori assoluti delle discrepanze e il rispetto delle tolleranze sono riportati anche in figura 2 dove, come detto, si osserva che la totalità delle misure è contenuta in $2.5\sqrt{D}$ e la quasi totalità in $2\sqrt{D}$. Un'analisi statistica delle discrepanze ha evidenziato un valore medio di queste ultime di -0.10 mm con una deviazione standard di ± 0.85 mm.

Come ulteriore approfondimento sono state calcolate anche le discrepanze normalizzate alla distanza con la formula:

$$d = \frac{A+R}{\sqrt{D}}$$

con: d discrepanza normalizzata, A e R dislivello in andata e ritorno e con D la distanza in km tra i caposaldi.

I risultati sono stati del tutto simili ai precedenti: valor medio di -0.08 mm, deviazione standard di ± 0.94 mm.

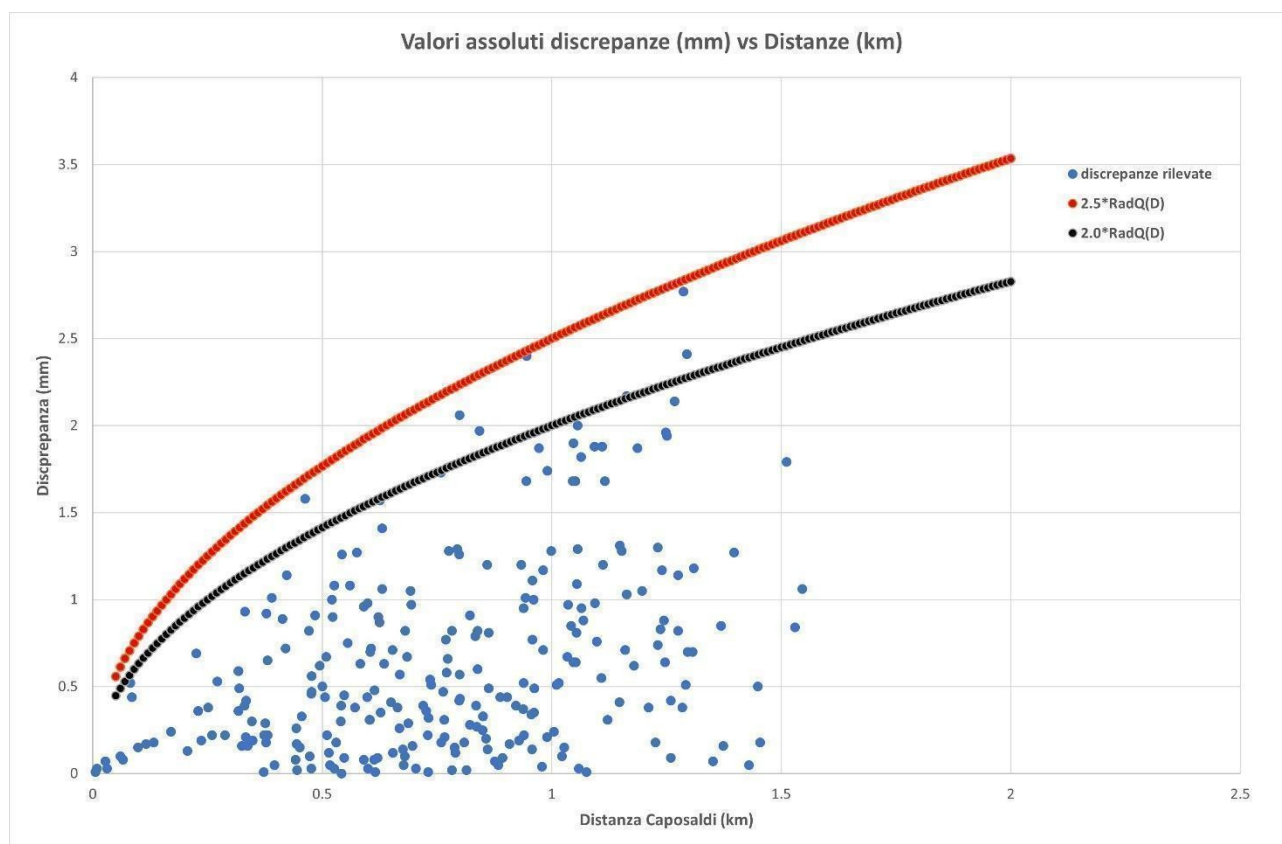


Figura 2 - Valori assoluti delle discrepanze (mm) rispetto alle distanze tra caposaldi (km)

La distribuzione sostanzialmente normale (o gaussiana) delle discrepanze normalizzate è stata osservata anche costruendo l'istogramma di figura 3 con un passo di 0.1 mm.

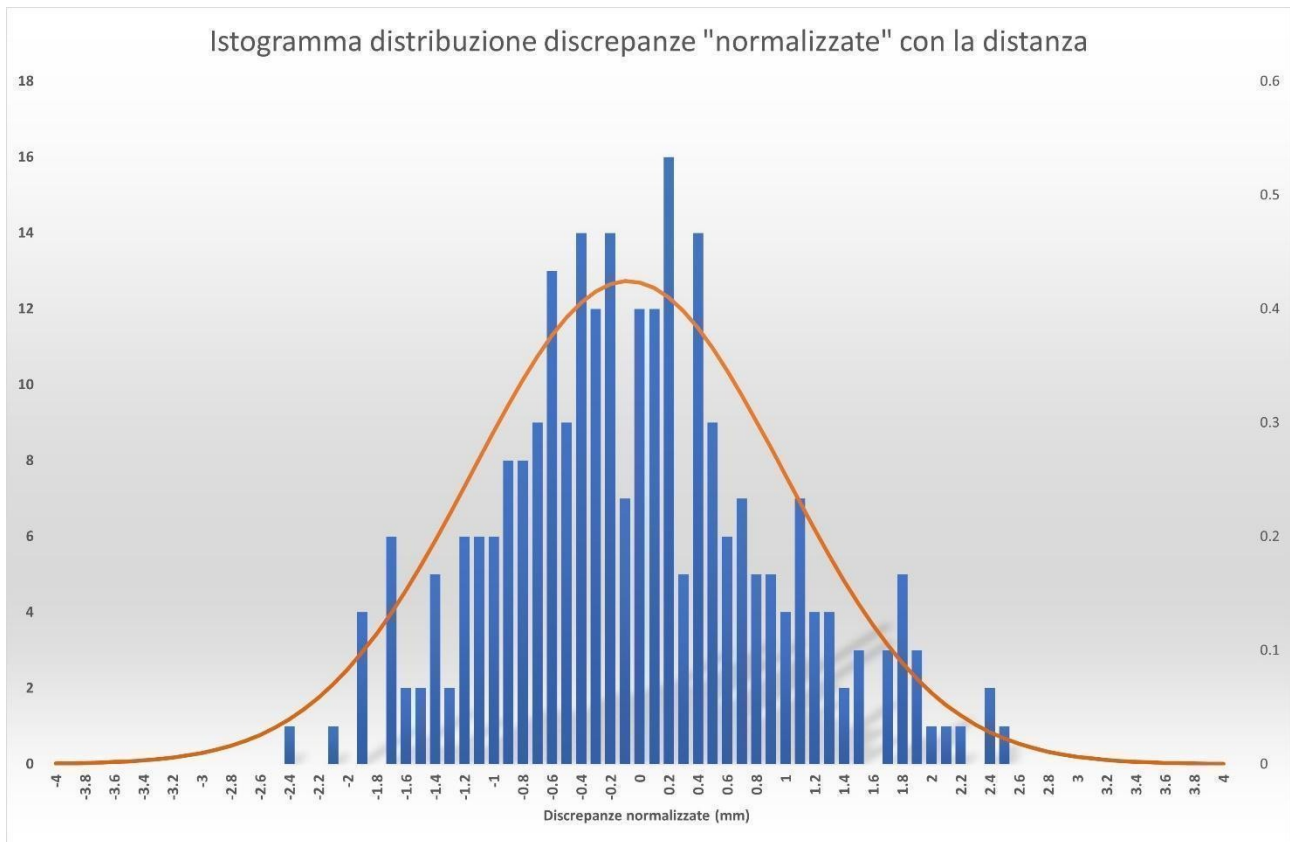


Figura 3 - Istogramma della distribuzione delle discrepanze normalizzate

Un'ulteriore analisi ha riguardato il calcolo della discrepanza cumulata per verificare la presenza di errori sistematici. La discrepanza cumulata è la somma algebrica delle discrepanze lungo una linea di livellazione. L'analisi è stata fatta considerando la sola linea principale da nord verso sud e il suo andamento è riportato nel grafico di figura 4. Si osserva un interessante andamento della curva con valori crescenti per i primi 50 km (segno che il dislivello misurato in salita risultava sempre maggiore al dislivello misurato in discesa, discrepanza sempre positiva) per poi decrescere, giungere a zero a circa 80 km, assumere valori negativi fino a circa 100 km per poi ritornare verso valori di discrepanza cumulata prossimi a zero. Questo andamento della discrepanza cumulata è da attribuirsi a diversi fattori anche concomitanti, quali: squadra operativa (hanno lavorato 2 diverse squadre di operatori), condizioni meteorologiche (temperatura e vento), direzione del tratto rilevato (da nord a sud o viceversa). In ogni caso il fatto che la discrepanza cumulata presenti questo andamento "sinusoidale" conferma la piccola entità degli errori sistematici complessivi.

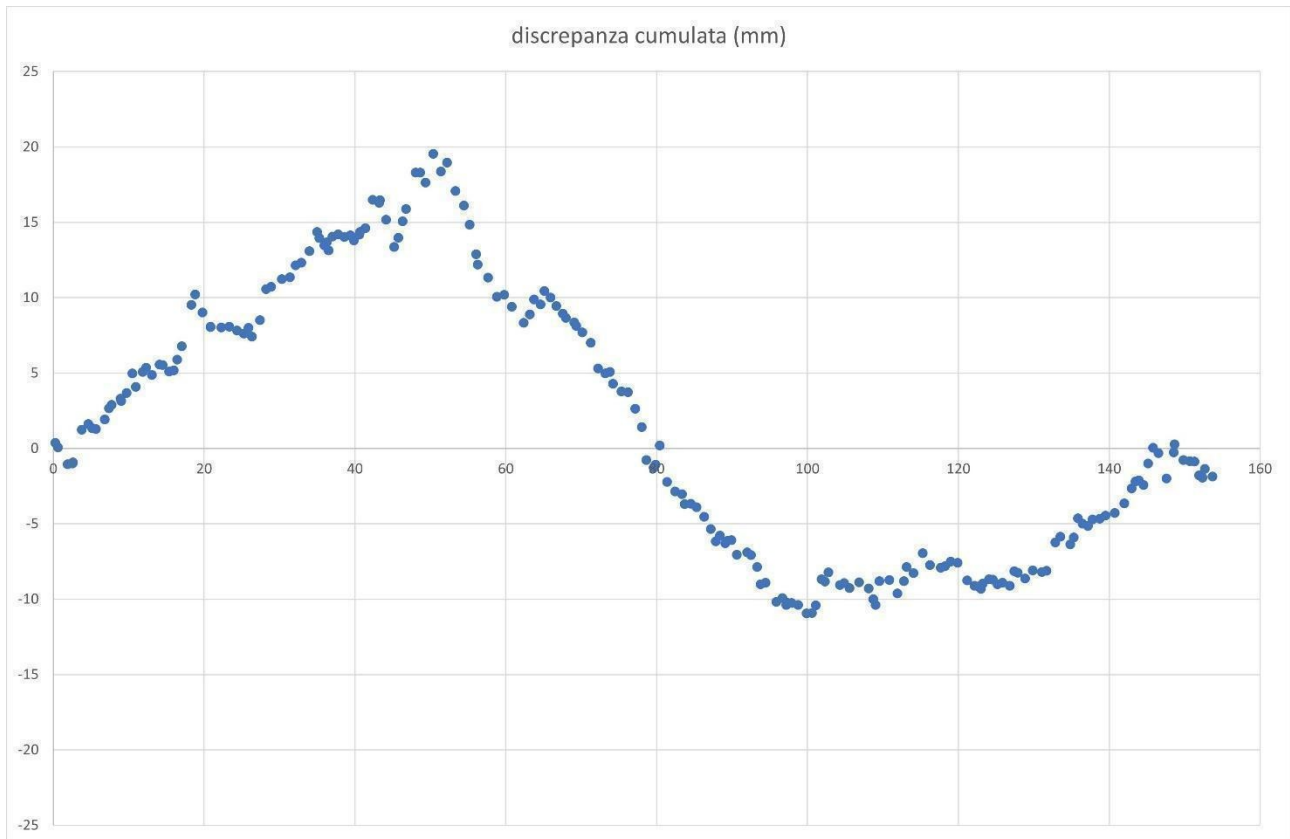


Figura 4 - Andamento della discrepanza cumulata per la linea principale da nord a sud; in ascissa la distanza in km rispetto all'inizio linea.

2.3. Controllo chiusura dei poligoni

Al termine della livellazione è stato controllato l'errore di chiusura dei due poligoni che si sono formati con le linee di livellazione dette di completamento. In particolare, è stato possibile analizzare l'errore di chiusura di:

- poligono 1 - anello Candiano: in questo poligono è compreso l'attraversamento del canale Candiano tra Marina di Ravenna a sud e Porto Corsini a nord; il dislivello tra le due sponde del canale è stato fornito dal DICAM dell'Università di Bologna;
- poligono 2 - anello Lido di Classe: in questo poligono è compreso l'attraversamento del torrente/fiume Bevano tra Lido di Classe a sud e Lido di Dante a nord; il dislivello tra le due sponde del Bevano è stato fornito dal DICAM dell'Università di Bologna.

Gli errori di chiusura dei poligoni in valore assoluto devono rispettare la tolleranza calcolata con la formula:

$$T = 2 * \sqrt{L}$$

con: T in mm ed L lunghezza complessiva del poligono in km.

I risultati sono riportati nella tabella 1 dove si osserva che la tolleranza è stata rispettata per entrambi gli anelli.

Tabella 1- Errori di chiusura e relative tolleranze per i poligoni presenti nella livellazione geometrica costiera

Anello	Lunghezza (km)	Errore di chiusura (mm)	Tolleranza (mm)
Poligono 1	28.6	9.3	10.7
Poligono 2	20.9	2.2	9.1

2.4. Riferimento altimetrico RGC 2023

La scelta del vertice di origine o di riferimento e della sua quota si è basata su diversi fattori tra cui:

- presenza di caposaldi Arpa 2005 Emilia-Romagna e di caposaldi IGM, talvolta coincidenti, ma con quote diverse anche se attribuite dai due enti allo stesso anno di rilievo 2005;
- subsidenza dell'area costiera con valori differenziati tra nord e sud come si evince dalle mappe di subsidenza pubblicate dall'Arpa Emilia-Romagna [subsidenza](#);
- presenza di stazioni permanenti GNSS integrate (mareografo + GNSS co-locato); in particolare modo la stazione di Porto Garibaldi (site name GARI00ITA), operativa dal 2009 e con serie temporali completa, inoltre fa parte della rete di stazioni permanenti EPN (EUREF Permanent GNSS Network) dell'EUREF;
- necessità di inquadrare la livellazione costiera con un riferimento altimetrico congruente con il datum/sistema altimetrico nazionale Genova 1942.

Dopo un'attenta analisi e un confronto delle diverse soluzioni possibili, si è deciso di inquadrare la linea costiera derivando la quota dalle misure e dai dati geodetici della stazione GNSS/mareografica di Porto Garibaldi, ottenendo una quota "geoidica" del caposaldo/vertice PGFV0100 ubicato all'inizio del molo di Porto Garibaldi. La procedura si è basata sui punti nel seguito descritti:

1. la stazione co-locata GNSS GARI00ITA di Porto Garibaldi fa parte dal 2009 della Rete di Stazioni Permanenti europee EPN e come tale (stazione di classe A) è una delle stazioni che materializzano sul territorio nazionale il sistema di riferimento europeo ETRS89 nel frame ETRF2000; le coordinate X,Y,Z dell'antenna GNSS e i relativi parametri di velocità V_x , V_y , V_z , sono elaborati e monitorati senza soluzione di continuità da diversi centri di calcolo nazionali ed internazionali e sono pubblicati in modo ufficiale nel sito [EUREF Permanent GNSS Network](#).

Le coordinate e i parametri di velocità ufficiali di GARI00ITA, al 13 luglio 2023, in ETRF2000, ma espresse all'epoca 2010.0, sono riportate nelle prime due colonne di tabella 2. Le coordinate sono riferite all'ARP (Antenna Reference Point) dell'antenna GNSS sul tetto della stazione mareografica.

Tabella 2 -Da EUREF, nella prima e nella seconda colonna, coordinate e velocità dell'ARP dell'antenna GNSS di Porto Garibaldi in ETRF2000 al 2010.0; nella terza colonna, coordinate al 2023.0 e nella quarta colonna, le corrispondenti coordinate geografiche.

Coordinate Cartesiane in ETRF2000 al 2010.0 (m)	Velocità in ETRF2000 (m/anno)	Coordinate Cartesiane in ETRF2000 al 2023.0 (m)	Coordinate geografiche in ETRF2000 al 2023.0
X= 4439514.102 ± 0.000	V _x = -0.0033 ± 0.000	X= 4439514.059	lat= 44°40'36.83746" N
Y= 963866.852 ± 0.000	V _y = -0.0009 ± 0.000	Y = 963866.840	long= 12°14'57.95231" E
Z= 4461921.320 ± 0.000	V _z = -0.0016 ± 0.000	Z= 4461921.299	h _{ell} = 47.690 m

- applicando i parametri di velocità, le coordinate X, Y, Z sono state attualizzate al 2023 (tabella 2, terza colonna) e sono quindi state trasformate in coordinate geografiche (tabella 2, quarta colonna) ottenendo quindi per l'ARP dell'antenna GNSS di GARI00ITA una quota ellissoidica di 47.690 m in ETRF2000 (2023.0); l'attualizzazione delle coordinate al 2023 permette di eliminare l'effetto della subsidenza dal 2010 al 2023;
- la quota ellissoidica al punto precedente è stata trasformata in geoidica tramite il modello di ondulazione ITALGEO2005, calcolato con il software Verto3K e il grigliato 205.gk2 dell'IGM; la quota geoidica dell'ARP dell'antenna GNSS è risultata pari a $H_{ARP} = +7.496$ m. Tramite Verto3K e grigliato *.gk2 le quote ellissoidiche ETRF2000 si trasformano in quote geoidiche nel datum altimetrico nazionale Genova 1942;
- il dislivello geoidico tra ARP dell'antenna GNSS e caposaldo/vertice RGC PGFV0100 è stato misurato tramite livellazione geometrica di precisione ed è pari a -5.631 m;
- applicando questo dislivello alla quota geoidica dell'ARP dell'antenna GNSS si ottiene infine la quota del caposaldo/vertice PGFV0100 (figura 5) utilizzata per inquadrare l'intera linea di livellazione geometrica costiera al 2023; il valore di tale quota è²:

$$H_{PGFV0100} = + 1.8650 \text{ m}$$

Nel seguito, l'inquadramento sopra descritto verrà denominato: **riferimento altimetrico RGC 2023** con caposaldo fondamentale il PGFV0100 con quota +1.8650 m determinata nel 2023; si osservi che in RGC 2023 le quote sono, come detto, coerenti con il datum/sistema altimetrico nazionale: livello medio mare Genova 1942.

² La precisione di questo valore di quota deriva essenzialmente dalla precisione del modello di ondulazione ITALGEO 2005 utilizzato per il passaggio da quota ellissoidica a quota geoidica (considerando sostanzialmente trascurabile l'errore delle coordinate geografiche in ETRF2000); l'IGM dichiara per il modello ITALGEO 2005 uno scarto quadratico medio di ±3.5 cm, di conseguenza, tutte le quote della RGC 2023 sono caratterizzate da un errore in assoluto di ±3.5 cm mentre, in relativo, hanno un errore legato alla propagazione pitagorica della varianza nella livellazione geometrica di alta precisione realizzata (si veda la successiva Tabella 3, colonna della deviazione standard).

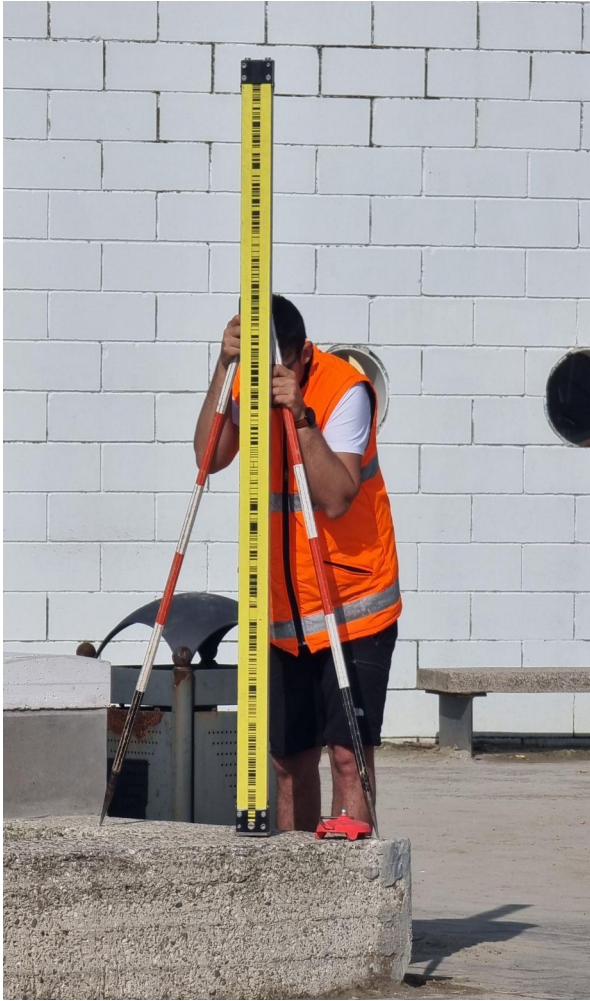


Figura 5 - Caposaldo/Vertice PGFV0100: fasi di livellazione e misure GNSS. Caposaldo fondamentale della RGC2023.

2.5. Calcolo delle quote finali - compensazioni

Per la linea di livellazione geometrica costiera non si può applicare un processo di compensazione delle misure in quanto si tratta di una linea aperta. L'unica eccezione è costituita dai due poligoni su cui è stata fatta anche l'analisi di pre-compensazione con verifica dell'errore di chiusura.

Per compensare i poligoni e comunque anche per facilitare il calcolo delle quote di tutti i caposaldi rilevati, è stato utilizzato il software di compensazione Starnet PRO ver. 6.0. Questo software ha

consentito inoltre il calcolo della deviazione standard delle quote di tutti i caposaldi (deviazione standard basata sulla propagazione dell'errore per le linee aperte e sul calcolo di compensazione vero e proprio per i poligoni).

Come deviazione standard a priori, sulla base dei risultati ottenuti nell'analisi delle discrepanze, descritta precedentemente, si è deciso di assumere il valore di 0.7 mm/km. La compensazione ha fornito un errore chilometrico di 0.82 mm/km, mentre per le quote dei caposaldi si sono ottenute deviazioni standard di pochi millimetri nelle vicinanze del caposaldo fondamentale PGFV0100 di Porto Garibaldi e valori massimi inferiori a 8 mm per i caposaldi più lontani nella parte sud della costa (tabella 3).

Tabella 3 - Caposaldi/vertici della Rete Geodetica Costiera con quota e deviazione standard nel riferimento altimetrico RGC 2023

Caposaldo	Quota (m)	Dev. Stand. (mm)	Caposaldo	Quota (m)	Dev. Stand. (mm)
GABI0100	4.9963	7.59	SAPC0301	2.1625	4.64
CARI0010	2.4913	7.55	SAPC0400	1.2830	4.53
CARI0100_New ³	2.7317	7.53	SAPC0500	1.4282	4.28
CARI0200	2.0000	7.42	SAPC0600	4.2073	4.17
CARI0210	1.9728	7.42	SAPC0650	0.7923	4.08
CARI0300	3.2545	7.31	SAPC0700	2.0625	3.92
CARI0401	3.2714	7.16	PCPG0010	1.5978	3.97
CARI0500	3.1044	7.03	PCPG0020	2.6037	3.81
CARI0600	3.0606	6.95	PCPG0100	1.6583	3.52
CARI0700 ⁴	1.9321	6.82	PCPG0200	2.1346	3.15
CARI0710 ⁵	1.5392	6.82	PCPG0300	0.6926	2.91
RICE0100	2.9056	6.70	PCPG0400	1.7074	2.53
RICE0200	2.8792	6.60	PCPG0450	1.7476	2.24
RICE0310	2.9220	6.52	PCPG0500	1.6111	1.98
RICE0400	3.2752	6.40	PCPG0600	1.8209	1.37
RICE0500	2.0667	6.26	PGFV0100⁶	1.8650	-
RICE0550	1.5884	6.14	PGFV0200	3.7967	1.39
RICE0600	2.4176	6.12	PGFV0300	2.5907	1.97
RICE0700	2.6373	5.97	PGFV0400	2.1123	2.12
CESA0100	1.6936	5.83	PGFV0500	0.2724	2.73
CESA0200	2.1899	5.64	PGFV0600	2.6615	2.97

3 Vertice scomparso subito dopo la livellazione

4 Vertice posizionato su un muretto in fase di demolizione

5 Vertice materializzato e inquadrato in sostituzione del CARI0700

6 Vertice di riferimento della RGC 2023

Caposaldo	Quota (m)	Dev. Stand. (mm)	Caposaldo	Quota (m)	Dev. Stand. (mm)
CESA0300	2.0314	5.44	FVFG0100	0.5986	3.57
CESA0400	1.6858	5.29	FVFG0200	-1.8621	3.78
SAPC0100	3.9631	5.13	FVFG0300	1.3015	3.89
SAPC0150	1.5641	5.00	FVFG0400	2.0408	3.95
SAPC0200	1.5052	4.82	FVFG0500	1.4490	10.90

L'unica eccezione è costituita dal vertice FVFG0500 in prossimità del Faro di Goro, il cui rilievo ha richiesto la misura di due dislivelli con livellazione trigonometrica dal mezzo, rispettivamente eseguiti in corrispondenza del ponte delle Barche che supera il Po di Goro (tra Emilia-Romagna e Veneto), e di fronte al Faro di Goro (tra Veneto e Emilia-Romagna) (figura 6).

Questi dislivelli sono stati verificati anche con misure GNSS attraverso baseline statiche.

Ad essi è stata attribuita una deviazione standard a priori di 10 mm, ottenendo per la quota del FVFG0500 una deviazione standard di 10.9 mm.





Figura 6 - Caposaldo/Vertice PGFV0500: fasi di livellazione e misure GNSS.

3. INQUADRAMENTO RETE MAREOGRAFICA

3.1. Caposaldi e quote di riferimento per i sensori mareografici e GNSS co-locati

Uno degli obiettivi principali di cui si è tenuto conto in fase di progetto della livellazione geodetica costiera è stato l'inquadramento in un unico riferimento altimetrico (RGC2023) di tutte le stazioni mareografiche di Arpae, senza dimenticare la stazione di Marina di Ravenna dell'ISPRA. Questo consente, sia in tempo reale sia in analisi di medio/lungo periodo, di confrontare in modo veloce e preciso i dati di livello di tutte le stazioni sulla costa dell'Emilia-Romagna.

Questo obiettivo è stato raggiunto o inserendo i caposaldi di riferimento delle stazioni mareografiche direttamente nella linea di livellazione principale (Porto Garibaldi, Faro di Goro e Marina di Ravenna), oppure realizzando degli "sbracci" di livellazione geometrica (sempre in andata e ritorno) tra la linea di livellazione principale e i caposaldi di riferimento delle nuove stazioni (Cervia e Cattolica) materializzati nelle immediate vicinanze del sensore mareografico.

È necessario però notare che mentre per le nuove stazioni mareografiche di Cervia a Cattolica si è trattato di inquadrare per la prima volta il sensore di livello, per le stazioni di Porto Garibaldi, Faro di Goro e Marina di Ravenna (ISPRA), operative da diversi anni, il nuovo rilievo ha permesso di calcolare e applicare un offset tra il riferimento RGC2023 e il precedente riferimento.

Inoltre, sempre nell'ottica di avere tutti i dati nello stesso sistema di riferimento altimetrico, sono stati realizzati i collegamenti altimetrici tra i caposaldi di riferimento dei mareografi e l'ARP delle antenne GNSS co-locate.

Nel seguito si descrivono le attività di inquadramento delle stazioni di Cervia e Cattolica e di calcolo offset per le stazioni di Porto Garibaldi, Faro di Goro e Marina di Ravenna.

3.2. Inquadramento e calibrazione delle stazioni mareografiche di Cervia e Cattolica

Come descritto precedentemente, nelle immediate vicinanze dei nuovi sensori mareografici di Cervia e Cattolica, sono stati materializzati dei nuovi caposaldi inquadrati in RGC 2023 (figura 7). Le quote e le deviazioni standard dei due caposaldi in questione, nel riferimento altimetrico RGC 2023, sono riportate nella tabella 4.

Partendo da questi valori, sia a Cervia che a Cattolica, in data 14 giugno 2023, insieme ai tecnici della ditta CAE (che ha installato i mareografi), è stata rilevata, in un determinato istante, la quota del pelo libero dell'acqua all'interno del tubo di calma (tramite livello digitale + freatimetro elettronico calato all'interno del tubo di calma stesso). Tale valore di quota è stato impostato, sostanzialmente in tempo reale, e tramite appositi codici di controllo, ai sensori mareografi (radar e a pressione) ottenendo in tal modo la calibrazione dei sensori e il loro inquadramento omogeneo in RGC 2023.

Nella tabella 4 si riportano anche le quote dell'ARP delle antenne GNSS installate nelle immediate vicinanze dei sensori mareografici. La quota ARP è stata ottenuta dal DICAM partendo dal caposaldo di riferimento e misurando il dislivello tramite livellazione trigonometrica dal mezzo con stazione totale motorizzata (dev. std. = ± 1 mm).

Tabella 4 - Caposaldi/ARP in corrispondenza delle stazioni mareografiche di Cervia, Cattolica e Faro di Goro, quota e deviazione standard nel riferimento altimetrico RGC 2023

Caposaldo - ARP	Quota (m)	Deviazione Standard (mm)
CS mareografo di Cervia	1.2146	6.23
ARP mareografo di Cervia	4.690	6.38
CS mareografo di Cattolica	1.8034	8.63
ARP mareografo di Cattolica	5.644	8.74
CS sensore mareografico Faro di Goro coincidente con il vertice FVFG0500	1.4490	10.90



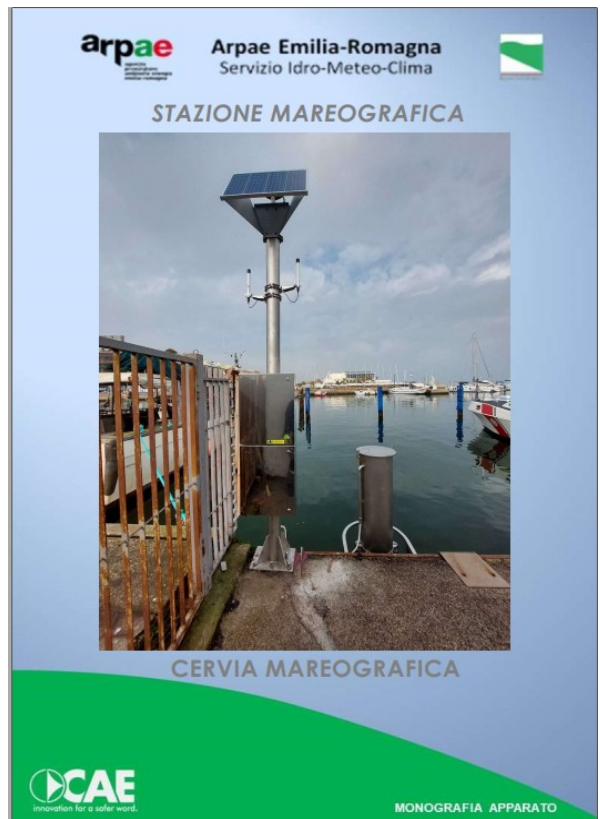
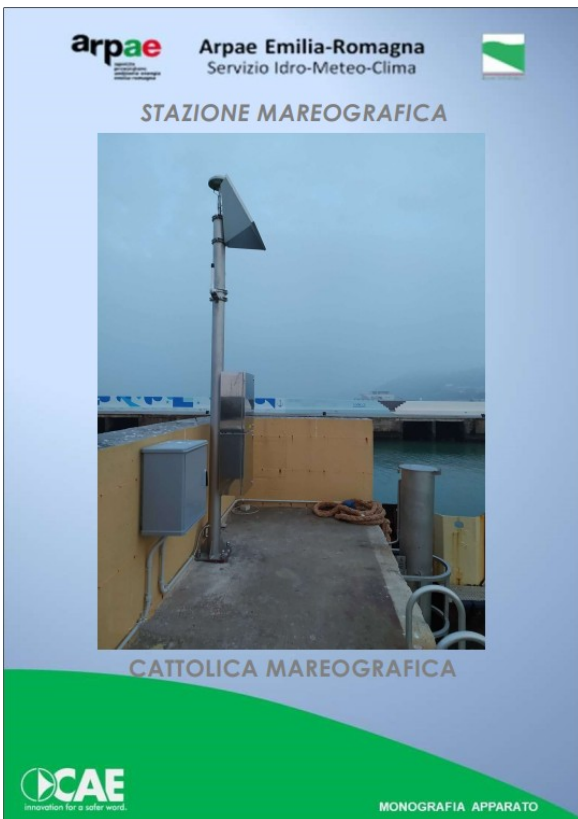


Figura 7 - Fasi del rilievo di inquadramento e monografie della stazione mareografica di Cattolica e di Cervia.

3.3. Inquadramento della stazione mareografica di Porto Garibaldi pre RGC2023

La stazione mareografica di Porto Garibaldi (FE), realizzata nel 2009, ha iniziato l'acquisizione del dato di livello dal 01 luglio 2009 (figura 8). La stazione è stata inizialmente inquadrata sulla base di un caposaldo appartenente alla rete Arpa Emilia-Romagna per il monitoraggio della subsidenza con quota del 2005 (denominazione Arpa 000650).

Successivamente, sono emerse discordanze tra la quota Arpa e la quota assegnata dall'IGM per lo stesso caposaldo (denominazione IGM 169#_###_038#) e per lo stesso anno 2005. Sulla base delle analisi dei livelli medi mare ottenuti fino a quel momento, si è deciso di modificare l'inquadramento della stazione di Porto Garibaldi in IGM e non più in Arpa (a partire dal febbraio 2016) modificando anche i dati acquisiti nel periodo precedente (dal 2009 al 2016). Da allora, il dato di livello della stazione mareografica di Porto Garibaldi, sia istantaneo che medio (mensile ed annuale) è inquadrato sulla base della monografia IGM. Più precisamente per il caposaldo 169#_###_038# si è utilizzata la quota del CSO pari +1.9460 m (si ricorda che la Rete Nazionale di livellazione, di cui fa parte anche il caposaldo 169#_###_038#, è inquadrata nel sistema altimetrico Genova 1942 e ne rappresenta la sua materializzazione sul territorio).



Figura 8 - Stazione mareografica integrata di Porto Garibaldi - Ferrara.

3.4. Inquadramento della stazione mareografica di Porto Garibaldi in RGC2023

Dopo l'introduzione del nuovo riferimento altimetrico RGC2023 è necessario modificare l'inquadramento della stazione di Porto Garibaldi in modo che le misure di livello in tempo reale ed i livelli medi calcolati nel tempo siano coerenti con le misure delle nuove stazioni di Cervia e di Cattolica. Questo dato risulta evidente osservando che il caposaldo IGM 169#_###_038# con quota +1.9460 m, utilizzata prima della RGC2023 per inquadrare la stazione (come descritto nel paragrafo precedente), coincide con il vertice RGC PGFV0100 per il quale, sulla base del ragionamento al paragrafo 2.4, è stata fissata al 2023 una quota ortometrica pari a +1.8650 m; la differenza 2005-2023 è di -8.1 cm (giustificabile con una subsidenza media di circa 3-4 mm/anno). Di conseguenza, per omogeneizzare Porto Garibaldi con le misure di Cervia e di Cattolica, è necessario applicare ai livelli mare di Porto Garibaldi un offset di -8.1 cm. Questo offset è stato applicato a partire dalle 00:00:00 del 01/01/2024.

3.5. Inquadramento del sensore mareografico del Faro di Goro

Sul retro del Faro di Goro (FE), in uno dei tratti di collegamento tra il Po di Goro e la Sacca di Goro è in funzione un sensore di livello di tipo radar (figura 9). Il sensore, operativo da alcuni anni, è stato inizialmente inquadrato tramite la quota di un caposaldo ARPA2005. Nelle immediate vicinanze del sensore di livello è presente il vertice FVFG0500 della RGC; tale vertice è stato collegato altimetricamente nel riferimento RGC2023 tramite una battuta di livellazione trigonometrica dal mezzo avvenuta nel settembre 2023 da parte del Dipartimento di Ingegneria di Ferrara. La trigonometrica (al posto della geometrica) è stata necessaria per l'attraversamento del Po di Goro che presenta una larghezza di circa 300 m in prossimità del Faro di Goro. Il dislivello ottenuto è stato anche verificato attraverso baseline GNSS statiche. In tal modo per il vertice FVFG0500 si è calcolata una quota RGC2023 pari a 1.4490 m \pm 10.9 mm (tabella 3 e tabella 4). Il sensore mareografico del Faro di Goro è stato inquadrato sulla base di questo dato a partire dalle 00:00:00 del 01/01/2024, pertanto, da tale data, questo sensore è omogeneo con i livelli misurati a Porto Garibaldi, Cervia e Cattolica.



Figura 9 - Sensore mareografico radar in prossimità del faro di Goro (freccia rossa).

3.6. Inquadramento e omogeneizzazione della stazione di Ravenna

Alla fine del 2012, la stazione mareografica di Ravenna (Marina di Ravenna, ex Porto Corsini) dell'Ispra, a causa dei lavori di realizzazione della nuova banchina del molo Dalmazia, è stata inizialmente spostata lungo la diga foranea lato sud e poi ripristinata nell'attuale posizione.

Nel febbraio del 2013, la stazione è stata inquadrata sulla base di un'analisi e di un calcolo realizzato dal Dipartimento dell'Università di Ferrara per conto dell'Autorità Portuale di Ravenna. Al caposaldo di riferimento RMN2, materializzato dall'Ispra subito fuori dalla cabina della stazione mareografica, è stata attribuita la quota di +1.4909 m. Tale quota è stata utilizzata per calibrare i sensori mareografici all'interno della stazione stessa. Lo stesso caposaldo RMN2 è stato quotato anche nell'attuale riferimento altimetrico RGC 2023, ottenendo un valore di quota di +1.4213 m, quindi un abbassamento di 0.070 m rispetto al dato 2013. Questa diminuzione della quota è giustificabile con una subsidenza di circa 7 mm/anno (per il periodo 2013-2023), superiore in termini relativi alla subsidenza riscontrata per Porto Garibaldi.

Analogamente a quanto detto per la stazione di Porto Garibaldi, per omogeneizzare la stazione Ispra di Ravenna con le stazioni di Cervia e di Cattolica, è necessario applicare ai dati di Ravenna una riduzione dei livelli misurati istantanei e medi pari a -7.0 cm.

4. LIVELLO MEDIO MARE LOCALE PORTO GARIBALDI

Il calcolo e la definizione del livello medio mare di Porto Garibaldi si basa sull'analisi di due serie di dati a disposizione per la stessa stazione:

- serie temporale, da luglio 2009 al dicembre 2023, dei livelli medio mare mensili rilevati dal sensore Encoder all'interno del tubo di calma (figura 10);
- serie temporale, dello stesso periodo, delle soluzioni settimanali delle coordinate ARP GNSS della stazione permanente GARI00ITA, co-locata sul tetto della stazione mareografica, delle coordinate fornite dai centri di calcolo dell'EUREF.

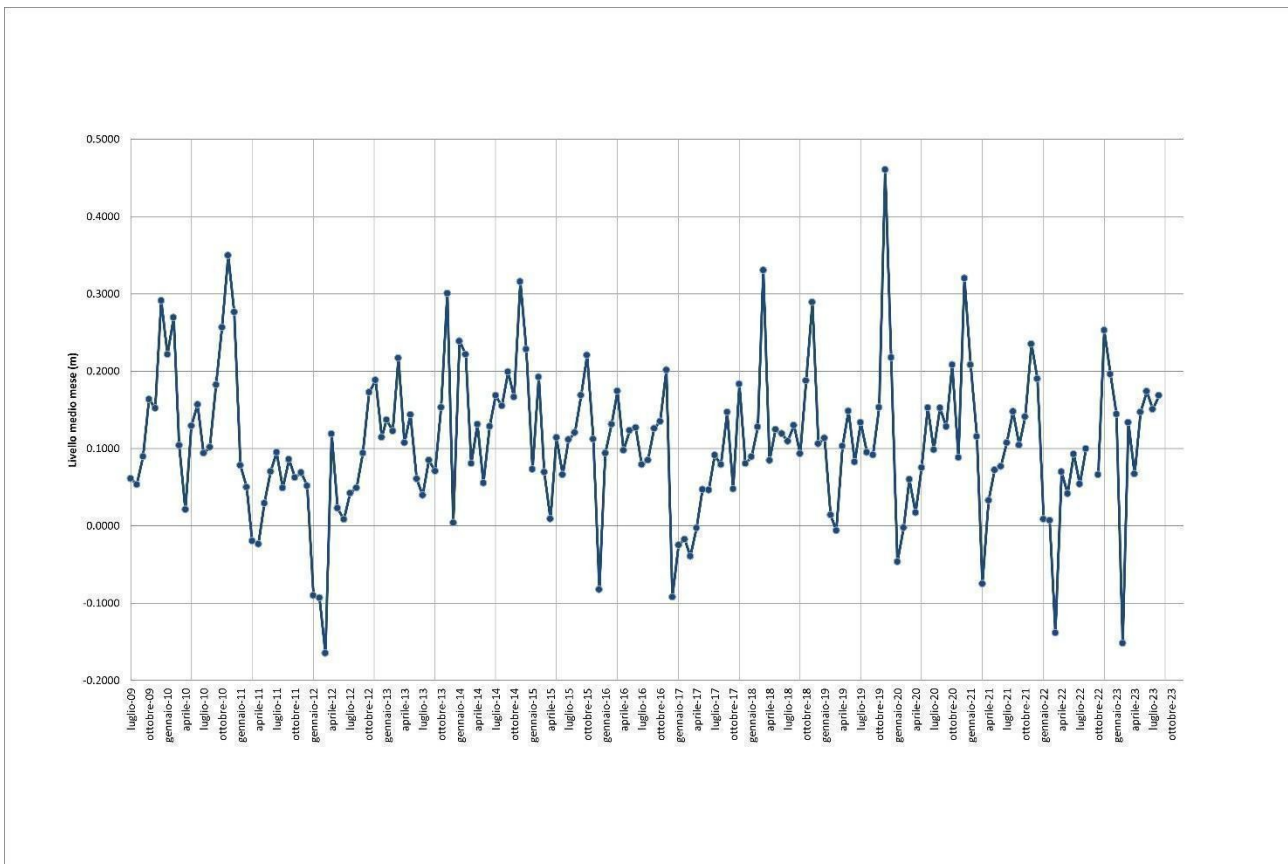


Figura 10 - Livelli medio mare mensili della stazione mareografica di Porto Garibaldi (luglio 2009 - dicembre 2023).

4.1. Serie temporale dei livelli medio mare mensili

I dati rilevati dal sensore mareografico Encoder della Stazione di Porto Garibaldi sono sottoposti periodicamente a un processo di controllo e di validazione che consente di evidenziare la presenza di lacune e/o salti e, se possibile, di ristabilire la continuità sulla base dei dati del sensore secondario radar Kalesto, o del calcolo della marea astronomica.

Per calcolare un livello medio mare mensile, seguendo le indicazioni riportate in letteratura internazionale, vengono utilizzati in cascata diversi algoritmi:

- applicazione di un filtro passa-basso di Butterworth del 4°ordine: per passare dai dati ogni 10' ai dati orari, processo di decimazione;
- applicazione del filtro di X_0 di Doodson: per calcolare un livello medio giornaliero dai dati orari, con conseguente eliminazione delle componenti diurne e semidiurne della marea;
- calcolo del livello medio mensile come semplice media dai dati giornalieri.

Mediando i livelli medi mare mensili si ottiene un valor medio complessivo di +10.8 cm che rappresenta un primo valore di livello medio mare locale rilevato a Porto Garibaldi per il periodo luglio 2009 – dicembre 2023, e che può essere riferito all'anno 2017 (anno centrale del periodo considerato). Si osserva che questo dato evidenzia un innalzamento di 10.8 cm rispetto a Genova 1942. In realtà questo dato è “sporcato” dalla subsidenza, cioè dal contemporaneo abbassamento della stazione, e quindi del sensore mareografico, durante l'intero periodo di misura, subsidenza che viene valutata grazie all'analisi della serie temporale ottenuta tramite l'elaborazione dei dati del GNSS integrato con la stazione stessa.

4.2. Serie temporale della stazione GNSS GARI00ITA

I dati grezzi della stazione GNSS GARI00ITA vengono inviati giornalmente via ftp a diversi centri di calcolo che elaborano una soluzione giornaliera delle coordinate della stazione. Settimanalmente le soluzioni dei diversi centri vengono combinate da un unico centro di calcolo europeo e sono rese disponibili nel sito dell'EUREF <http://www.epncb.oma.be/> sia in formato numerico che grafico attraverso la costruzione delle serie temporali N, E, Up (figura 11).

Analizzando la serie temporale della componente Up si determina un movimento della stazione sostanzialmente lineare di -3 mm/anno⁷: tale valore evidenzia la subsidenza della stazione, e il suo effetto deve essere considerato nel calcolo del livello medio mare mensile rilevato dal sensore mareografico.

⁷ Questo dato è confermato anche da altri centri di ricerca che elaborano di continuo la stazione GNSS di Porto Garibaldi (ad esempio: Nevada Geodetic Laboratory <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations/GARI.sta>; o SONEL www.sonel.org/); procedure di calcolo analoghe sono state anche realizzate dall'Università di Ferrara all'avvio della stazione.

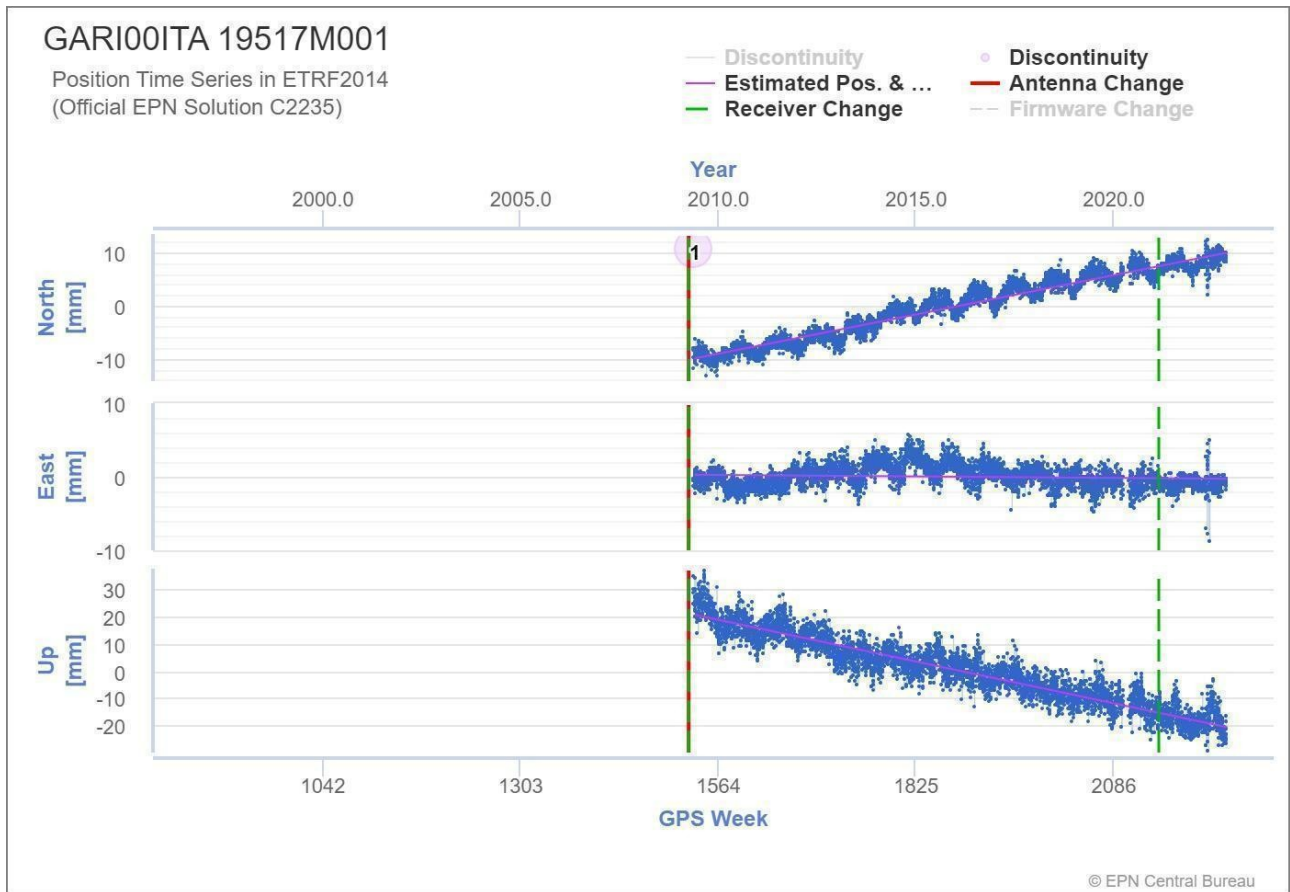


Figura 11 - Serie temporali GNSS dal sito <https://www.epncb.oma.be/> dell'EUREF della stazione permanente GARI00ITA di Porto Garibaldi.

4.3. Livello medio mare locale Porto Garibaldi 2017.0 e quota locale del PGFV0100

Per definire un livello medio mare locale (l.m.m.l.) e allo stesso tempo eliminare l'effetto della subsidenza sul suo calcolo si può adottare una procedura che, mese per mese, calcoli il livello del mare rispetto all'ARP dell'antenna GNSS installata sulla stazione.

In questo modo si definisce una superficie di riferimento altimetrica locale basata, con buona approssimazione, a una superficie equipotenziale del campo gravitazionale terrestre (il livello medio mare calcolato su un dato periodo) a sua volta riferita ad un frame ellissoidico nazionale (o internazionale).

Infatti, le coordinate dell'ARP GNSS, e in particolare la sua quota ellissoidica, sono note nel sistema ETRF2000 espresse all'epoca 2010.0 e, grazie ai parametri di velocità (tabella 2), si può calcolare la quota ellissoidica mese per mese: valore di quota mensile già depurato dall'effetto della subsidenza della stazione. Conoscendo il dislivello costante tra l'ARP GNSS e il caposaldo interno di riferimento del sensore mareografico, denominato TGBM0, si può calcolare la quota ellissoidica, mese per mese, del TGBM0. Esprimendo poi le misure di livello medio mensile del mare rispetto al TGBM0 si può riportare il livello medio mensile rispetto alla superficie ellissoidica e, come media, ricavare il livello medio mare di Porto Garibaldi per l'intero periodo misurato riferito alla superficie ellissoidica (figura 12). Tale quota ellissoidica del valore medio mare di Porto Garibaldi

rappresenta in pratica un'ondulazione locale N_{locale} (scostamento locale tra ellissoide e geoide locale, definito quest'ultimo sulla base delle misure di livello del mare a Porto Garibaldi).

Per Porto Garibaldi si è considerato l'intero periodo di misura della stazione mareografica, da luglio 2009 a dicembre 2023, e come sistema/superficie di riferimento è stato utilizzato, come più volte detto, il sistema ETRS89-ETRF2000 (2010.0). Dalla procedura di calcolo sopra descritta si è ottenuta un'ondulazione N_{locale} pari a 40.261 m.

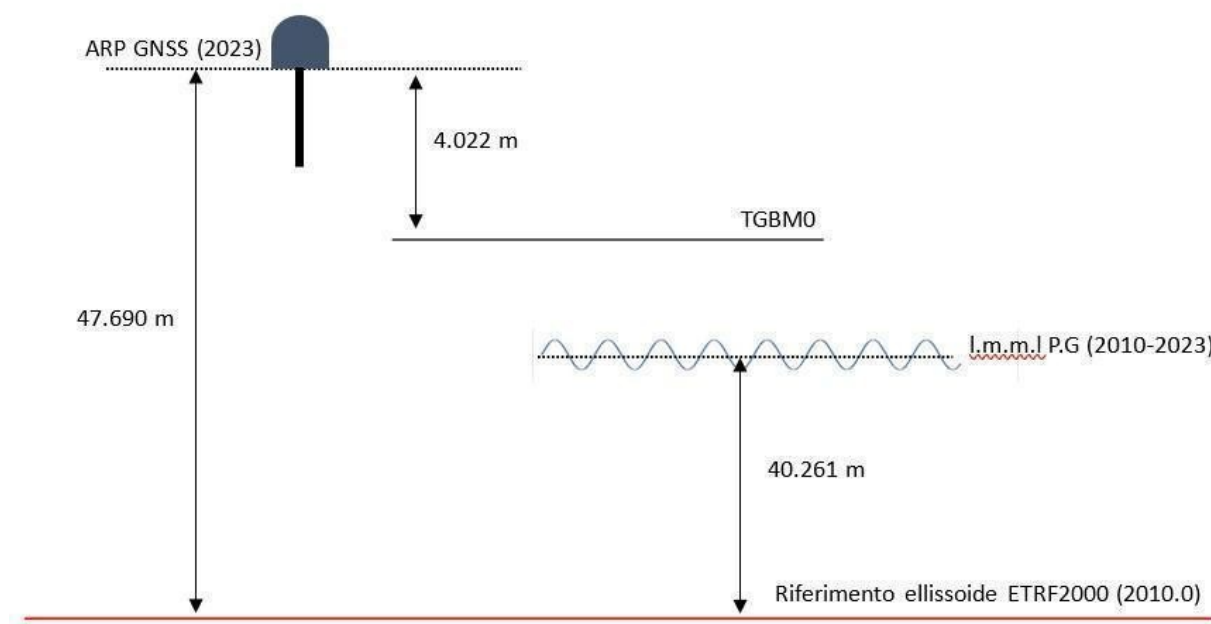


Figura 12 - Definizione del livello medio mare locale rispetto alla superficie ellissoidica

Infine, conoscendo il dislivello per livellazione geometrica tra ARP GNSS, TGBM0 (riferimento interno per il sensore mareografico) e il **caposaldo fondamentale PGFV0100** si ottiene una nuova quota di quest'ultimo non più riferita a Genova 1942 ma al livello medio mare locale definito e determinato secondo le regole suddette.

Tale valore di quota è risultato pari a:

$$H_{\text{PGFV0100-locale}} = +1.797 \text{ m. rispetto al l.m.m.l. PG2017}$$

4.4. Osservazioni sull'utilizzo del livello medio mare locale PG2017

Come si può osservare dalla seguente tabella riepilogativa, considerare come superficie di riferimento per l'altimetria il livello medio mare locale di Porto Garibaldi 2017, al posto del livello medio mare nazionale Genova 1942, ha come conseguenza diretta che la quota del caposaldo fondamentale della RGC2023 si abbassa di 6.8 cm e, di conseguenza tutte le quote geoidiche della RGC23 si riducono dello stesso offset.

Caposaldo/vertice	quota rispetto a Genova 1942	quota rispetto a PG2017	Differenza (2017-1942)
PGFV0100	+1.865 m	+ 1.797 m	-6.8 cm

In sintesi, se si considera l'innalzamento locale del livello del mare rispetto al datum altimetrico nazionale 1942, in relativo, le quote del terreno sono più basse di circa 7 cm. Questo valore, che potrebbe essere in sicurezza approssimato a 10 cm, andrebbe considerato per tutte le opere ingegneristiche e in generale di difesa a mare del territorio.

5. MONOGRAFIE RGC 2023


Le monografie dei vertici della RGC 2023 sono state aggiornate con i nuovi dati e le informazioni disponibili e pubblicate sul [Portale Cartografico di Arpae](#) nel tema Mare e Costa.

L'aggiornamento delle monografie è stato effettuato da Arpae - Unità cartografia e GIS mediante l'implementazione dello strumento *Report* in ambiente GIS (software QGIS), ciò ha permesso di abbandonare la precedente organizzazione dei dati, strutturata come Microsoft Access database.

“Un report GIS è un documento contenente informazioni organizzate in forma narrativa, grafica, mappe o tabellare, preparato ad hoc, periodico, ricorrente, regolare o secondo necessità” (Manuale utente QGIS 3.28). Sostanzialmente è un'estensione del Layout di stampa (utilizza gli stessi strumenti), organizzato secondo diverse sezioni che possono essere di tipo *Sezione Layout Statica* (un unico layout fisso) oppure del tipo *Sezione Gruppo Campi* che ripete il layout di base per ogni oggetto con le informazioni di un layer specifiche per ogni univoca geometria.

In questo caso è stato strutturato un report riportante le informazioni relative a ogni vertice della RGC, informazioni amministrative, storiche, cartografiche e geografiche, la descrizione fisica del vertice e della zona circostante con documentazione fotografica, nella maggior parte dei casi aggiornata al 2023, e infine informazioni pratiche per l'utilizzo del caposaldo stesso. In particolare, è stata aggiornata la quota ortometrica con le misure effettuate con la livellazione, come riportato nei paragrafi precedenti (figura 13)

Tutte le monografie sono accompagnate da un documento denominato “Rete Geodetica Costiera 2023 - Note Illustrative” che riporta una sintesi delle informazioni tecniche sulla realizzazione della RGC 2023 (metodologie e riferimenti geodetici) e una breve storia delle diverse fasi di realizzazione dell'infrastruttura.



Rete Geodetica Costiera per il Monitoraggio Topo-batimetrico delle spiagge - Vertici GNSS stazionabili -


VERTICE **CARI0401** Aggiornamento al 10/2023

Comune	Riccione	Provincia	Rimini
Indirizzo	Piazzale Azzarita		
Località	Riccione		
Ubicazione	Presso il Bagno Elio 116		


Istituto	Arpaè	Anno	2020
Denominazione	CARI0401		
Rete di appartenenza	Rete Geodetica Costiera		
Altra denominazione			
Altra rete di appartenenza			

Coordinate geografiche		Coordinate piane	
ETRS89-ETRF 2000 EPSG: 6706		ETRS89-ETRF 2000-UTM 32N EPSG: 7791	
Lat (°)	44.01395014	Est (m)	792238.26
Long (°)	12.64581201	Nord (m)	4879887.12
Epoca	2018.0	Epoca	2018.0
Quota ellissoidica h (m):	43.36	Quota ortometrica H (m):	3.271
Epoca	2018.0	Rilievo	2023

Inquadramento geografico




CTR Regione Emilia-Romagna
1:50000




Ortofoto AGEA 2020
1:5000

Descrizione caposaldo

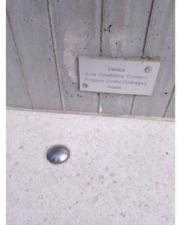
Tipologia: Borchia
 Descrizione: Infissa sul muretto di fronte al Bagno Elio 116
 Modalità di accesso:
 Data ultimo sopralluogo: 06/02/2023
 Operatore: Arpaè



06/02/2023



06/02/2023



06/02/2023

Note:

Aiutaci a tenere la monografia sempre aggiornata segnalando eventuali problemi o criticità alla seguente email retegeodeticacostiera@arpae.it.

Figura 13 - Monografia vertice CARI0401

La creazione di una rete di monitoraggio come la Rete Geodetica Costiera, richiede che venga definita una denominazione univoca dei vertici che vi appartengono. La nuova denominazione tiene in considerazione la possibilità che in futuro possano materializzarsi nuovi vertici di raffittimento, oppure che i vertici possano andare perduti e quindi sia necessario ripristinarli.

È stato scelto di identificare i vertici Rete Geodetica Costiera con un codice alfanumerico, composto da quattro lettere iniziali e quattro numeri.

Le prime quattro lettere del codice alfanumerico rappresentano i confini delle 7 macrocelle in cui è stato suddiviso il litorale per fini gestionali, caratterizzati da limitato scambio di sedimento con quelli adiacenti (figura 14 e tabella 5).

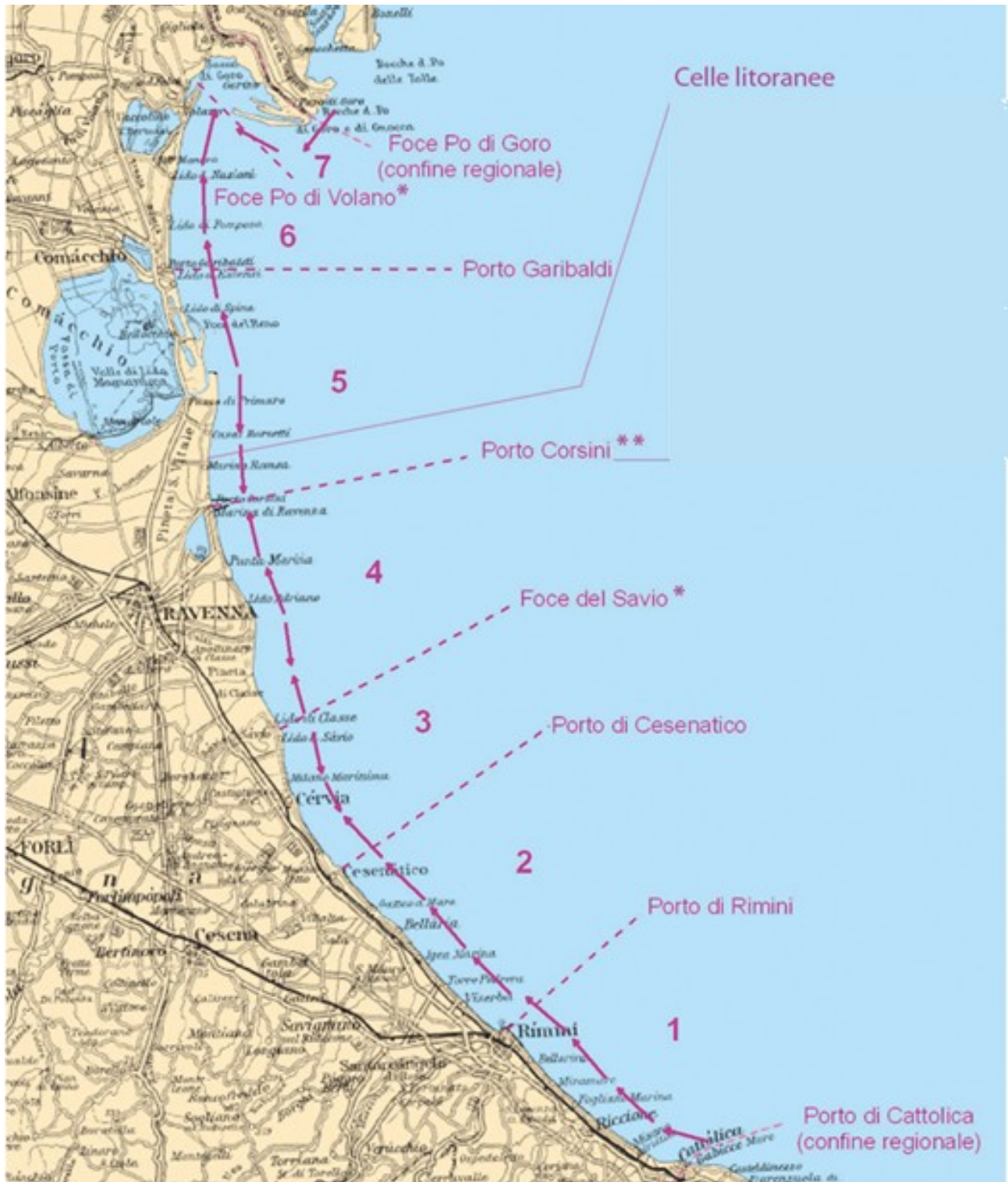


Figura 14 - Confini dei tratti di litorale identificativi (macrocelle) per la gestione costiera.

Tabella 5 - Confini delle 7 macrocelle e sigla identificativa

Confine territoriale	Sigla	Confine territoriale	Sigla
Porto di Cattolica	CA	Porto di Rimini	RI
Porto di Cesenatico	CE	Foce del Savio	SA
Porto Corsini	PC	Porto Garibaldi	PG
Foce Po di Volano	FV	Foce Po di Goro	FG

Le quattro lettere permettono, quindi, di collocare sul territorio regionale i capisaldi di riferimento. Le quattro cifre si differenziano in funzione della posizione che occupano (figura 15):

- le prime due cifre rappresentano in maniera progressiva da sud verso nord il numero di appartenenza dei capisaldi costituenti la RGC originaria,
- la terza cifra è relativa ai nuovi capisaldi, ovvero questo numero permette in futuro di introdurre nuovi capisaldi di raffittimento per la rete. Per come è stata ideata la RGC in origine si è previsto di collocare un vertice ogni 4 km circa,
- la quarta e l'ultima cifra è dedicata agli eventuali ripristini nel caso in cui capisaldi originari appartenenti alla RGC vadano perduti o distrutti. In questo caso si potrà ri-monumentare gli stessi nelle vicinanze dei loro siti originari, tenendo conto di tale fatto incrementando l'ultima cifra della denominazione del vertice.

Si riporta un esempio dei casi che potrebbero presentarsi.

CARI0100, le prime quattro lettere identificano la posizione, ovvero vertice ubicato tra Porto di Cattolica (CA) e il Porto di Rimini (RI); le prime due cifre (01) indicano come questo sia il primo caposaldo della rete in quell'area, tutti i successivi verranno identificati con un numero progressivo da sud a nord. Le ultime due cifre che in questo caso sono entrambe zero indicano che si tratta di un vertice originario della RGC.

Nel caso in cui in futuro si volesse istituire un nuovo vertice di raffittimento compreso tra CARI0100 e CARI0200 allora si potrebbe denominare come CARI0110, e così via. Infine, nel caso in cui nel tempo il vertice originario della Rete Geodetico Costiero denominato CARI0100 scomparisse poiché perduto o distrutto, allora si può provvedere al suo ripristino denominandolo CARI0101.

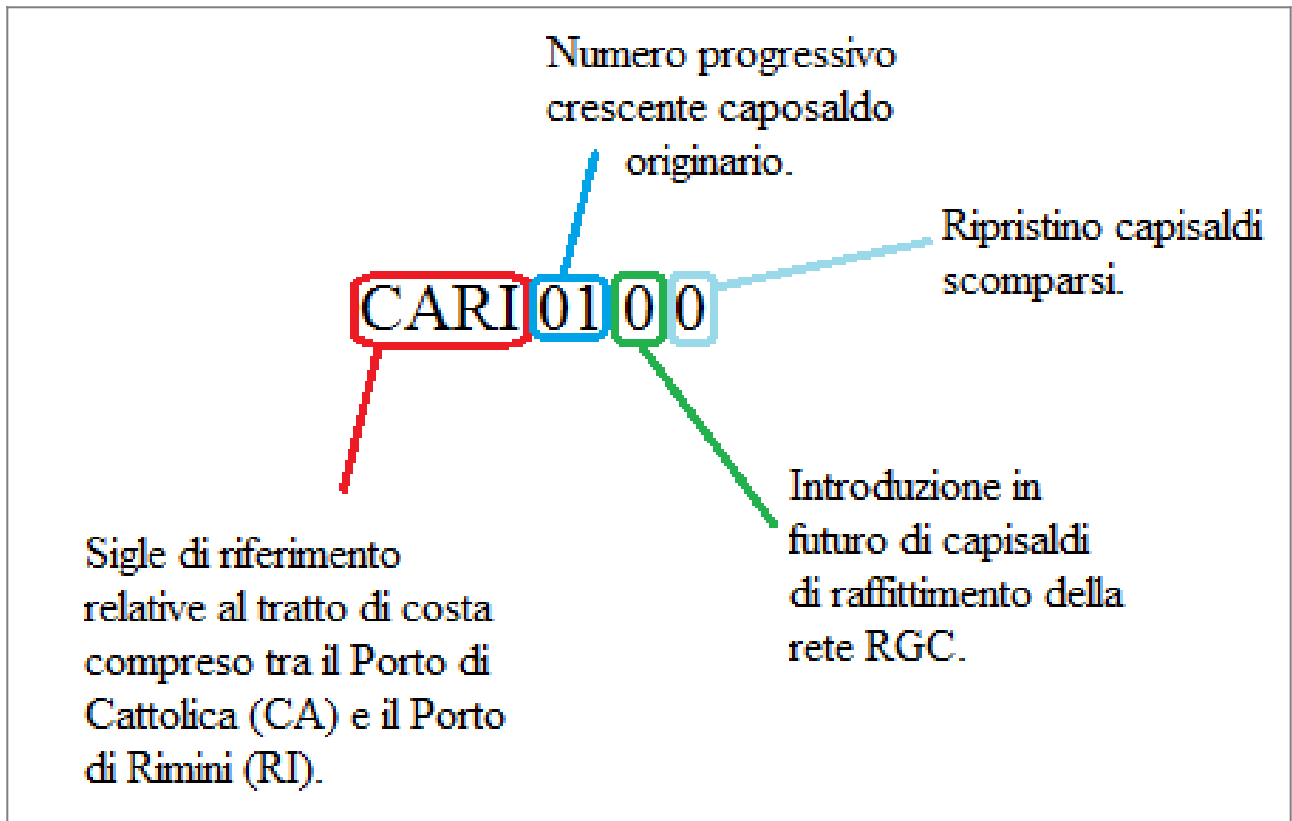


Figura 15 - Schema logico utilizzato per la denominazione dei capisaldi della RGC.