Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico Meridionale
Bari, Brindisi, Manfredonia, Barletta, Monopoli

PORTO DI BARI

Variante localizzata del Piano Regolatore Portuale, ai sensi dell'art. 22, comma 6 del D.lgs. 169/2016 e ss. mm. ii., finalizzata alla riqualificazione del Molo S. Cataldo e al potenziamento delle infrastrutture asservite alla sede logistica del Corpo delle Capitanerie di Porto.



titolo	elaborato
studio idraulico-marittimo agitazione ondosa all'interno del bacino portuale	RI 2

data e aggiornamenti		
02		
01	aprile 2021	Delibera del Comitato di Gestione n. 4 del 29.04.2021
00	novembre 2019	emissione

progetto del dipartimento tecnico		
progettisti	ing. Paolo Iusco	AdSP MAM
	ing. Annunziata Attolico	AdSP MAM
	ing. Eugenio Pagnotta	AdSP MAM
relazioni specialistiche	prof. ing. Giuseppe R. Tomasicchio	studio idraulico-marittimo
	I.R.I.D.E. Srl di Roma	valutazione ambientale strategica
coordinatore della progettazione	ing. Francesco Di Leverano	AdSP MAM
responsabile unico del procedimento	ing. Paolo Iusco	AdSP MAM

Firmato digitalmente da
PAOLO IUSCO
T = Ingegnere
C = IT

PORTO DI BARI

Variante localizzata del Piano Regolatore Portuale finalizzata al potenziamento delle infrastrutture asservite alla sede logistica di Bari del Corpo delle Capitanerie di Porto.
Servizio per l'esecuzione degli studi Idraulici/Marittimi

Studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale

Bari, dicembre 2019



INDICE

INTRODUZIONE

1. IL LAYOUT DELLA VARIANTE LOCALIZZATA

2 MOTO ONDOSO IN PROSSIMITA' DELL'IMBOCCATURA

3 NAVE DI PROGETTO

4 ANALISI DELL'AGITAZIONE ONDOSA NEL BACINO PORTUALE

5. SIMULAZIONI CONDOTTE

6. ANALISI DEI RISULTATI

6.1 COEFFICIENTE DI AGITAZIONE, Ka

6.2 ANALISI STATISTICA

7. ANALISI DI SINTESI DEI RISULTATI

8. CONDIZIONI PER LA SIMULAZIONI DI MANOVRA

APPENDICE A: raccolta di tutte le figure
APPENDICE B: descrizione del modello MAP

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1. Distribuzione settoriale del moto ondoso all'imboccatura del porto di Bari
Tabella 2. Caratteristiche delle maglie di elementi finiti impiegate nelle simulazioni
Tabella 3. Le 23 zone di interesse selezionate
Tabella 4. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i ai punti P1-P4. Situazione attuale e situazione futura
Tabella 5. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alle banchine B1-B4. Situazione attuale e situazione futura
Tabella 6. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i nelle banchine B5-B8. Situazione attuale e situazione futura
Tabella 7. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i nelle banchine B9-B12. Situazione attuale e situazione futura
Tabella 8. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alle banchine B13-B19. Situazione futura
Tabella 9. Valori di altezza d'onda significativa associati a varie probabilità, situazione attuale e situazione futura, nei punti P1-P4
Tabella 10. Valori di altezza d'onda significativa associati a varie probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B1 a B4
Tabella 11. Valori di altezza d'onda significativa associati a varie probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B5 a B8
Tabella 1. Valori di altezza d'onda significativa associati a varie probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12
Tabella 2. Valori di altezza d'onda significativa associati a varie probabilità, situazione attuale e situazione futura, da B13 a B19
Tabella 3. Numero d'ore d'apparizione dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, punti P1-P2-P3-P4
Tabella 4. Numero d'ore d'apparizione dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B1 a B4
Tabella 5. Numero d'ore d'apparizione dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B5 a B8
Tabella 6. Numero d'ore d'apparizione dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12
Tabella 7. Numero d'ore d'apparizione dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12
Tabella 19. Condizioni di moto ondoso estreme

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1. Layout attuale delle aree interessate dalla variante localizzata
Figura 2. Layout futuro delle aree interessate dalla variante localizzata
Figura 3. In verde le opere a farsi secondo il PRP vigente; in blu le aree i cui fondali saranno oggetto di ripristino alla batimetrica originaria
Figura 4. Ubicazione del punto dinanzi all'imboccatura del porto di Bari
Figura 5. Rosa del moto ondoso annuale all'imboccatura del porto di Bari
Figura 6. Dettaglio della maglia ad elementi finiti per il molo San Cataldo nella situazione futura
Figura 7. Condizione al contorno utilizzate nelle simulazioni per la situazione attuale; - Corona circolare all'esterno (marrone); - Parete verticale (giallo); - Parete verticale con celle antirisacca (blue scuro); - Scogliera (verde); - Terreno con scarpata naturale (azzurro); - Scalo di alaggio (viola)
Figura 8. Condizione al contorno utilizzate nelle simulazioni per la situazione futura; - Corona circolare all'esterno (azzurro); - Parete verticale (giallo); - Parete verticale con celle antirisacca (verde); - Scogliera (blu); - Scalo di alaggio (viola)
Figura 9. Batimetria, in metri, nel dominio di calcolo. Situazione attuale (su) e futura (giù)
Figura 10. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i).
Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala
Figura 11. ZOOM. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s.Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio
Figura 1. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala
Figura 13. ZOOM. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio
Figura 2. Definizione delle zone di analisi dell'agitazione interna
Figura 3. Variazione del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i in corrispondenza dell'imboccatura interna (P2) con la direzione e il periodo del moto ondoso all'imboccatura. Situazione Attuale
Figura 4. Variazione del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alla banchina per la nave di progetto (B7) con la direzione e il periodo del moto ondoso all'imboccatura. Situazione Attuale
Figura 15. I punti "Porto", P1, P2 e P3 ove assumere le condizioni di moto ondoso per le simulazioni della manovra con nave di progetto

INTRODUZIONE

In data 21.05.2019 è stata stipulata una convenzione tra il Comando Generale delle Capitanerie di Porto – Guardia Costiera e l'Autorità di Sistema Portuale del Mar Adriatico Meridionale (AdSPMAM), in forza della quale il Comando Generale affida all'AdSPMAM l'espletamento delle attività necessarie alla realizzazione di nuovi ormeggi lungo la banchina San Cataldo nel porto di Bari, nonché alla realizzazione di infrastrutture asservite alla logistica.

Il Corpo delle Capitanerie di Porto ha infatti indicato tra i propri fabbisogni infrastrutturali-logistici individuati dal Piano Programmatico degli investimenti 2014-20 predisposto dal Comando Generale, la "Realizzazione di tre punti di ormeggio nel porto di Bari (molo san Cataldo), per una lunghezza di 400 m di banchina e la realizzazione di infrastrutture logistiche asservite alla sede logistica di Bari." Detta esigenza rientra tra quelle oggetto del finanziamento disposto con il DPCM 21 luglio 2017.

Per la realizzazione degli obiettivi previsti nella Convenzione è necessario procedere alla variazione degli strumenti di pianificazione territoriale, realizzando una variante al Piano Regolatore Portuale (PRP) vigente. L'AdSPMAM intende procedere alla redazione di una "variante localizzata" come prevista all'art. 22, comma 6 del D.Lgs. 169/2016 come modificato da ultimo dall'art. 14 del D.Lgs. 232/2017.

Nell'ambito del procedimento, l'AdSP assume la funzione di Stazione appaltante per la progettazione, direzione lavori, misura e contabilità delle opere, collaudo, coordinamento della sicurezza in fase di progettazione ed esecuzione; la copertura finanziaria è resa disponibile dal Comando generale.

In tale ambito, l'AdSPMAM ha nominato progettisti gli ingegneri Paolo Iusco, Annunziata Attolico ed Eugenio Pagnotta, funzionari tecnici dell'Ente.

Con nota prot. 20190024890 del 29/10/2019, l'AdSPMAM ha affidato allo scrivente il servizio per la conduzione "di studi meteomarini ed affini per la verifica delle caratteristiche di navigabilità interna al bacino".

Il servizio di consulenza riguarda "Studi Idraulico-Marittimi" e comprende le seguenti attività:

1. Studio del clima anemometrico e ondoso al largo

2. Studio della propagazione da largo all'imboccatura
3. Studio dell'agitazione ondosa all'interno del bacino portuale
4. Prove con simulatore di manovra di tipo "real time full mission"
5. Studio dell'impatto delle nuove opere sulla circolazione idrodinamica nelle aree esterne al porto

In estrema sintesi, per comodità del lettore, si ricorda che il porto di Bari è situato in Puglia, lungo il litorale Adriatico e che il settore di traversia di Bari è compreso tra 295° N e 110° N.
La struttura del porto di Bari è quella tipica di un bacino artificiale protetto da un molo di sopraflutto, denominato molo foraneo e da un molo di sottoflutto, denominato San Cataldo.
Il porto è aperto a NNW ed è esposto ai venti di Tramontana e Maestrale; con forti venti da nord, è consigliabile manovrare alquanto al largo per presentarsi all'imboccatura con la prua diretta quasi a SE.

La presente relazione riassume i risultati dello studio di agitazione da moto ondoso nel porto di Bari. Lo studio di agitazione non si è limitato a definire le condizioni estreme di moto ondoso nelle aree oggetto di modifica al layout portuale mediante "variante localizzata", ma ha determinato le condizioni di agitazione ondosa anche in corrispondenza delle banchine principali dell'intero porto, tanto al fine di fornirvi una stima del "*downtime*"[1] di sicura utilità per la migliore programmazione degli ormeggi nel porto di Bari.
Più nello specifico, nel presente rapporto di studio viene trattato il tema della determinazione dei coefficienti di agitazione ondosa in diverse zone del porto e del numero di ore/anno di superamento di un assegnato valore di altezza d'onda significativa, mediante l'uso di un modello matematico di propagazione del moto ondoso.

[1] Downtime = numero di ore annue in cui un assegnato valore soglia di altezza d'onda viene superato

1. IL LAYOUT DELLA VARIANTE LOCALIZZATA

La variante localizzata che l'AdSPMAM propone si occupa di un'area in radice del molo San Cataldo che traguarda l'imboccatura portuale. La Figura 1 mostra la configurazione attuale del porto in prossimità dell'imboccatura.



Figura 1. Layout attuale delle aree interessate dalla variante localizzata, la struttura di difesa a sinistra è il molo San Cataldo

In particolare, l'area interessata si localizza tra la radice e la metà del molo San Cataldo; su di essa si intende stabilire nuove infrastrutture dedicate alle attività del Corpo delle Capitanerie di Porto (ormeggio per tre fregate di nuova generazione, edifici per alloggi equipaggi, officine, depositi) ed una superficie dedicata ad un marina (porto turistico), con anche alcuni ormeggi per megayachts, sino a 100 m di lunghezza. Presumibilmente, visti i fondali non molto elevati, le banchine che delimitano il terrapieno saranno del tipo a massi sovrapposti con masso sommitale di cls cementizio dotato di cella antirisacca. La Figura 2, tra gli altri, illustra la configurazione della modifica del molo San Cataldo.

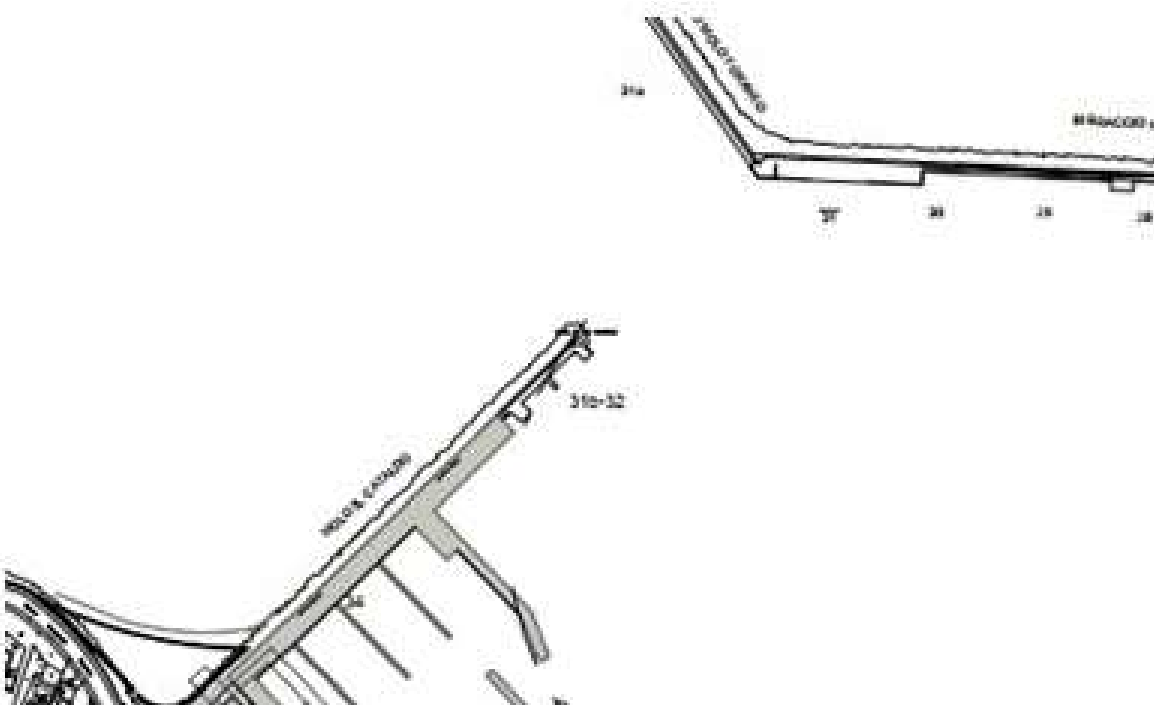


Figura 2. Layout futuro dell'area interessata dalla variante localizzata

La Figura 3 mostra in verde le aree previste dal PRP vigente e non ancora realizzate, in blu le aree dove l'AdSPMAM, a breve, avvierà un'attività di ripristino delle batimetriche originarie, sino alla batimetrica 13 m.

Di tale attività di ripristino delle batimetriche originarie si è tenuto conto nelle simulazioni numeriche dell'agitazione nel porto di Bari condotte nel caso di assetto di variante localizzata. Le simulazioni relative all'assetto attuale non considerano il suddetto ripristino dei fondali.

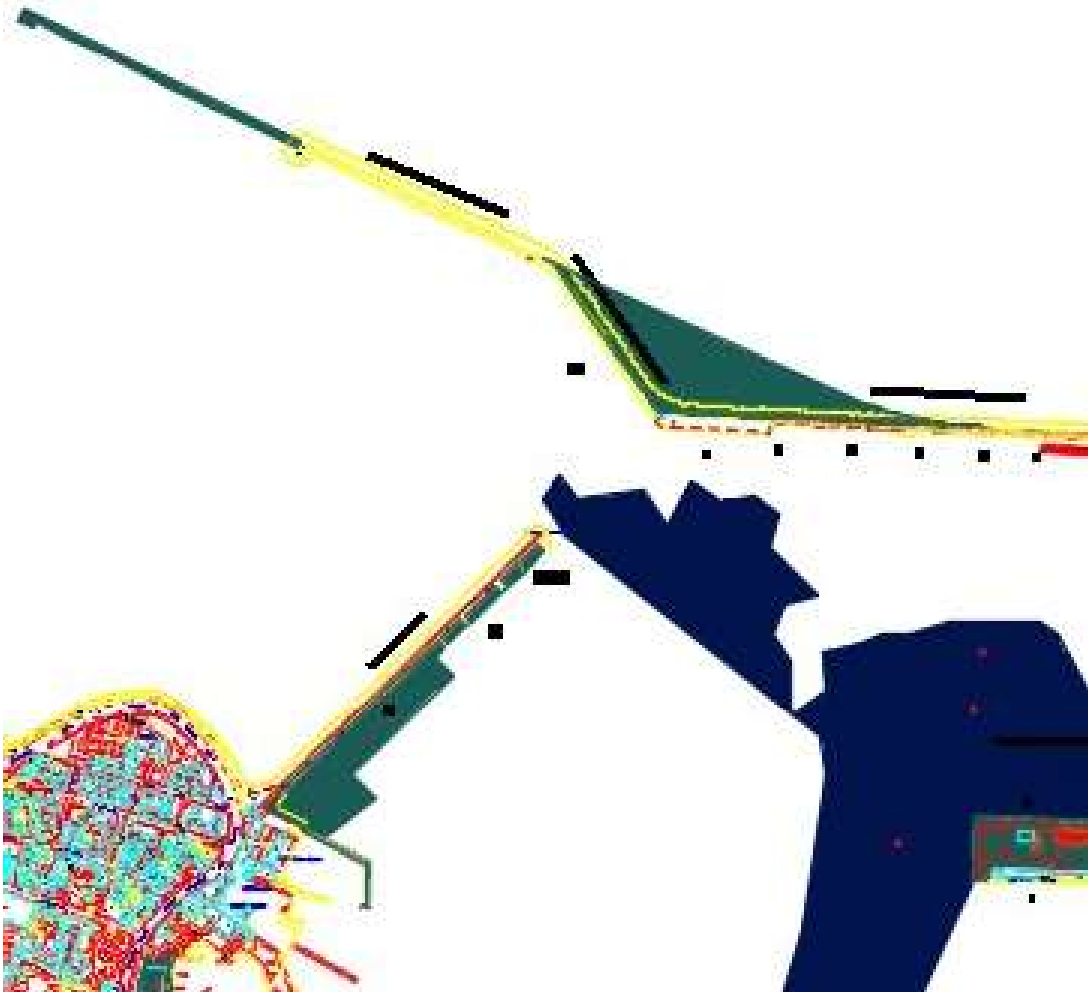


Figura 3. In verde le opere a farsi secondo il PRP vigente; in blu le aree i cui fondali saranno oggetto di ripristino alla batimetrica originaria

2. MOTO ONDOSO IN PROSSIMITA' DELL'IMBOCCATURA

Il clima ondoso rappresentativo in prossimità dell'imboccatura del porto vecchio di Bari è stato determinato negli studi i cui esiti sono riportati nell'elaborato *"Studio del clima anemometrico e ondoso al largo e studio della propagazione da largo all'imboccatura"* che descrive il clima anemometrico e del moto ondoso al largo e la trasformazione del clima ondoso dal largo sino in prossimità del porto (Figura 4), con profondità 20 m circa.



Figura 4. Ubicazione del punto dinanzi all'imboccatura del porto di Bari

La Tabella 1 riporta la distribuzione degli eventi verificatisi (01.07.1989 – 31.12.2014), per classe di altezza d'onda significativa e per direzione del moto ondoso. Quanto in Tabella si può riprodurre in forma grafica sintetica con la rosa di moto ondoso (Figura 5).

Tabella 1. Distribuzione settoriale del moto ondoso all'imboccatura del porto di Bari

Dir (ºN) \ Hs (m)	0 - 0.5	0.5 - 1	1 - 1.5	1.5 - 2	2 - 2.5	2.5 - 3	3 - 3.5	3.5 - 4	4 - 4.5	> 4.5	TOTALE	TOTALE %
0	889	417	123	43	24	1	0	0	0	0	**1497**	**3.9%**
10	1754	881	292	177	68	21	14	7	1	0	**3215**	**8.3%**
20	975	481	186	62	38	9	2	0	0	0	**1753**	**4.5%**
30	695	313	142	40	14	8	1	0	0	0	**1213**	**3.1%**
40	719	339	139	41	10	3	3	0	0	0	**1254**	**3.2%**
50	678	384	186	116	34	39	7	1	0	0	**1445**	**3.7%**
60	803	411	276	110	43	15	8	0	0	0	**1666**	**4.3%**
70	1018	461	75	19	6	0	0	0	0	0	**1579**	**4.1%**
80	1161	662	75	24	4	0	0	0	0	0	**1926**	**5.0%**
90	2043	1332	257	32	3	0	0	0	0	0	**3667**	**9.4%**
100	3666	1670	117	4	0	0	0	0	0	0	**5457**	**14.0%**
330	1710	2772	1023	374	104	35	12	2	0	0	**6032**	**15.5%**
340	2060	2429	727	258	106	31	10	2	0	1	**5624**	**14.5%**
350	651	437	123	44	22	6	0	3	0	0	**1286**	**3.3%**
CALMA	1249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1249**	**3.2%**
TOTALE	**20071**	**12989**	**3741**	**1344**	**476**	**168**	**57**	**15**	**1**	**1**	**38863**	**100.0%**
TOTALE %	**51.6%**	**33.4%**	**9.6%**	**3.5%**	**1.2%**	**0.4%**	**0.1%**	**0.0%**	**0.0%**	**0.0%**	**100.0%**	

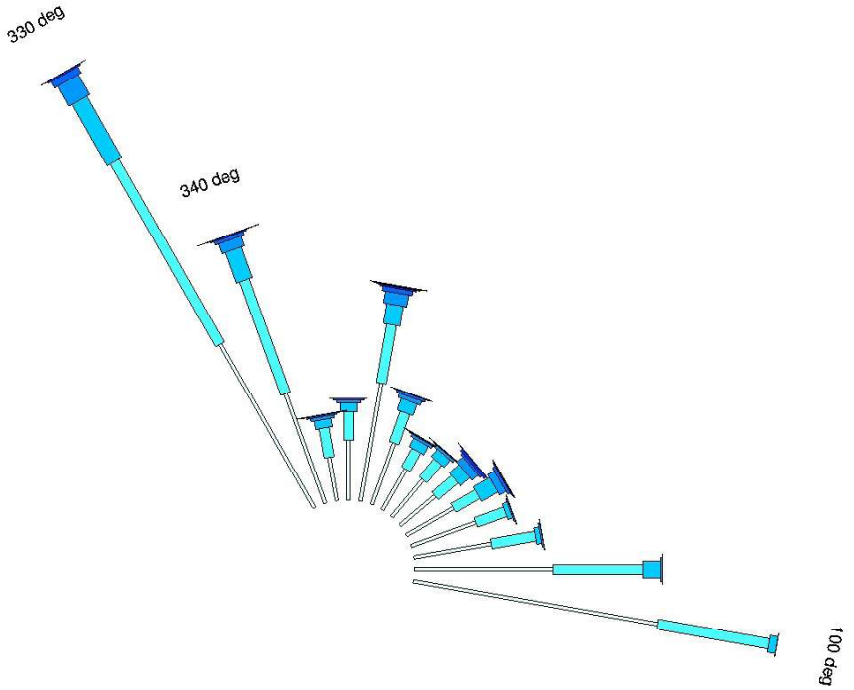
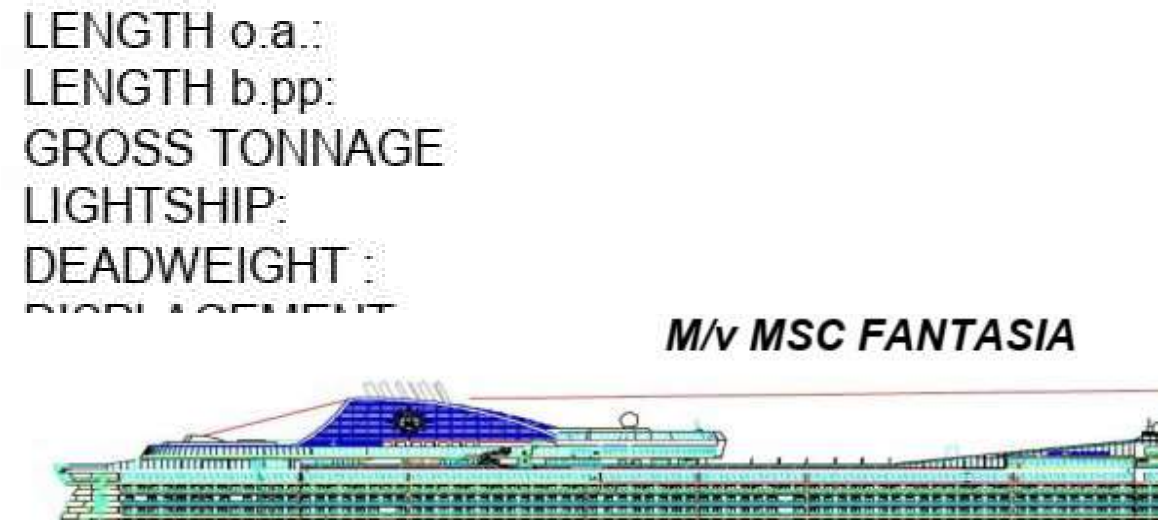


Figura 5. Rosa del moto ondoso annuale all'imboccatura del porto di Bari

3. NAVE DI PROGETTO

La nave di progetto è stata indicata dall'AdSPMAM. Essa è una nave da crociera con le seguenti caratteristiche:



Una nave da crociera di questo tipo ha già scalato più volte il porto di Bari, ormeggiando alla banchina n. 10; ma occorre stabilire le nuove condizioni di manovrabilità a cui sarà soggetta in presenza delle nuove opere a costruirsi previste con la "variante localizzata" al vigente PRP.

4. ANALISI DELL'AGITAZIONE ONDOSA NEL BACINO PORTUALE

Come detto, nello studio di propagazione largo/costa *"Studio del clima anemometrico e ondoso al largo e studio della propagazione da largo all'imboccatura",* è stata analizzata la trasformazione che subisce il moto ondoso durante la sua propagazione da mare aperto fino all'imboccatura del porto di Bari.

Nel presente paragrafo si riportano i risultati dello studio di propagazione del moto ondoso all'interno del bacino portuale condotto al fine di determinare i livelli di agitazione ondosa in diverse zone del porto, tanto nella situazione attuale come nella situazione futura di variante localizzata, al fine di valutare l'impatto della proposta di intervento sull'agitazione ondosa interna nel porto di Bari.

In particolare, nel seguito, vengono trattati i seguenti punti:

- determinazione dei coefficienti di agitazione in diverse zone del porto, per un insieme di condizioni del moto ondoso (diversi valori di direzione e periodo), mediante l'uso di un modello matematico di propagazione del moto ondoso (MAP);

- studio statistico delle condizioni di operatività in termini di tempo di superamento di determinati livelli di soglia di altezza d'onda in date aree dello specchio acqueo del porto.

Il modello numerico utilizzato per lo studio di agitazione è il MAP (Moreno, 1996; Moreno e Rivero, 1998) descritto in modo ampio nell'Appendice B. Il modello MAP è basato sull'equazione *mild-slope* (Berkhoff, 1972) che simula la propagazione delle onde lineari di gravità su fondo variabile, modificata da Chandrasekera e Cheung (1997) per rimuovere il limite di validità per pendenze dolci (mild-slope) e discussa da Kobayashi, Tomasicchio e Brunone (2000).

Dato il carattere lineare dell'equazione di Berkhoff (1972), il modello consente di simulare la propagazione del moto ondoso irregolare (in frequenza e direzione) mediante la sovrapposizione

lineare delle soluzioni ottenute per un insieme finito di componenti (bins) in cui si divide lo spettro di energia del moto ondoso.

Il modello permette di simulare in forma combinata i fenomeni di accrescimento (shoaling), rifrazione, diffrazione, riflessione, dissipazione del moto ondoso per attrito al fondo e per frangimento, riflessione parziale (complessa) su scogliere e diffrazione dei fronti d'onda all'imboccatura. Allo stesso tempo permette di condurre un'analisi di risonanza in darsene e baie sotto l'effetto di onde lunghe. Il suo limite principale è che, essendo basato su un'equazione lineare, questo modello non è capace di simulare processi non-lineari di interazione onda-onda (e.g. generazione di super- e sub- armoniche).

La soluzione numerica del problema si ottiene mediante l'uso del metodo agli elementi finiti (minimizzazione del funzionale) su una maglia con elementi triangolari lineari. Il modello presenta una nuova descrizione di condizioni al contorno per contorni parzialmente o totalmente assorbenti che riduce la riflessione numerica.

Il modello è stato largamente convalidato a partire da soluzioni analitiche (per casi ideali) e da dati sperimentali di laboratorio. In Appendice B si riporta una descrizione del modello MAP.

5. SIMULAZIONI CONDOTTE

Il dominio di calcolo è stato discretizzato in elementi finiti triangolari di 4 m di lato (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Il numero di nodi e di elementi in ciascuna delle maglie utilizzate nella simulazione sono riportati nella Tabella .

Tabella 2. Caratteristiche delle maglie di elementi finiti impiegate nelle simulazioni

	Nodi	**Elementi**
Situazione Attuale	144.021	284.558
Situazione Futura	130.095	256.876

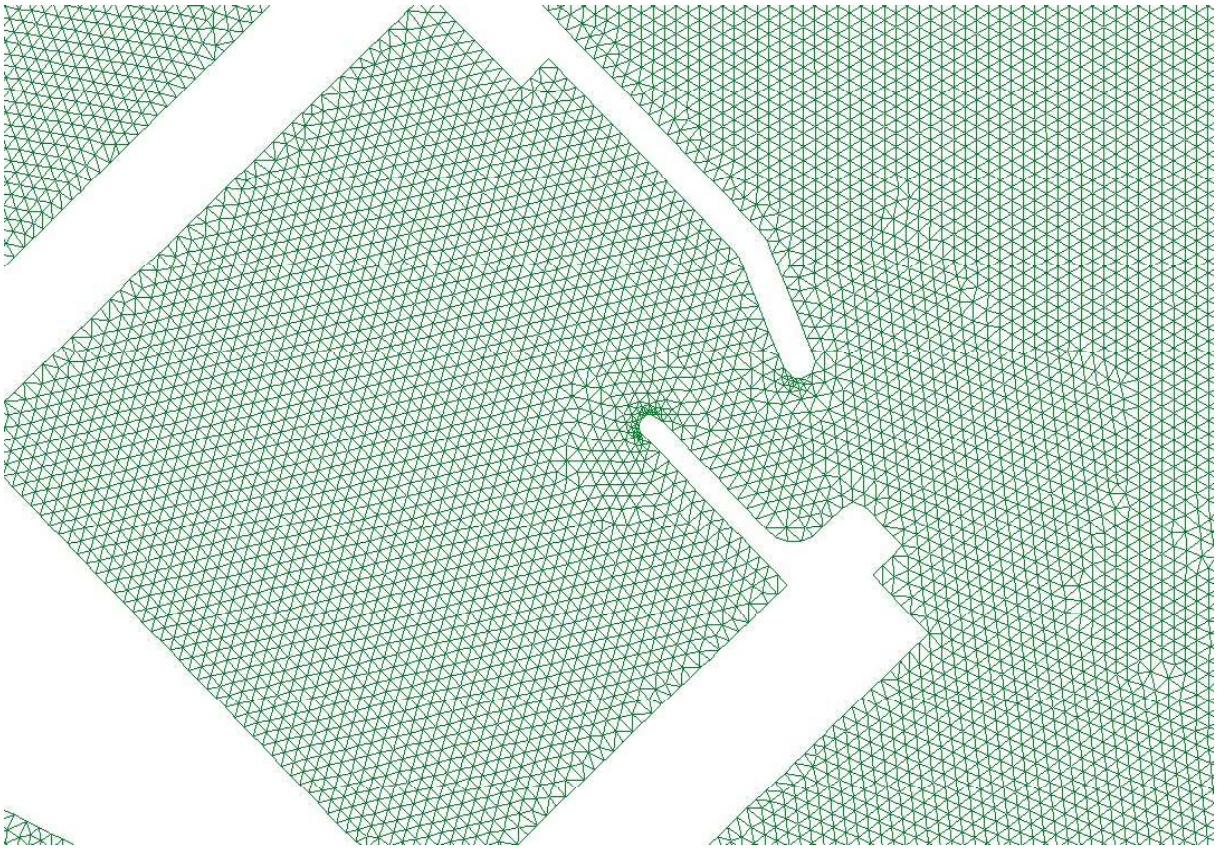


Figura 6. Dettaglio della maglia ad elementi finiti per il molo San Cataldo nella situazione futura

Le condizioni al contorno adottate sono le seguenti (Figure 7 e 8):

- Moto ondoso incidente lungo la corona di entrata. Questa condizione di contorno consente anche la propagazione (radiazione) del moto ondoso riflesso all'interno del dominio computazionale;

- Riflessione parziale in corrispondenza dei diversi moli e delle dighe nel porto, in base ad un valore del coefficiente di riflessione che dipende dalle caratteristiche e dalla tipologia delle scogliere (Kr = 0.45), pareti verticali (Kr = 0.90), banchine con celle antirisacca (Kr = 0.75), scali d'alaggio (Kr = 0.15), terreno con scarpata naturale (Kr=0.20);

- Assorbimento totale lungo il contorno aperto all'imboccatura.

Le condizioni al contorno adottate sono mostrate nelle Figura 7 (assetto attuale) e Figura 8 (layout di variante).

La profondità in corrispondenza di ciascun nodo della maglia agli elementi finiti (Figura) è stata ottenuta mediante l'interpolazione (metodo kriging) dei dati ottenuti durante la campagna batimetrica realizzata all'interno del porto da terzi per conto di AdSPMAM.

Per tutte le simulazioni è stato utilizzato un livello di marea di +0.2 m ed una profondità minima di 3 m.

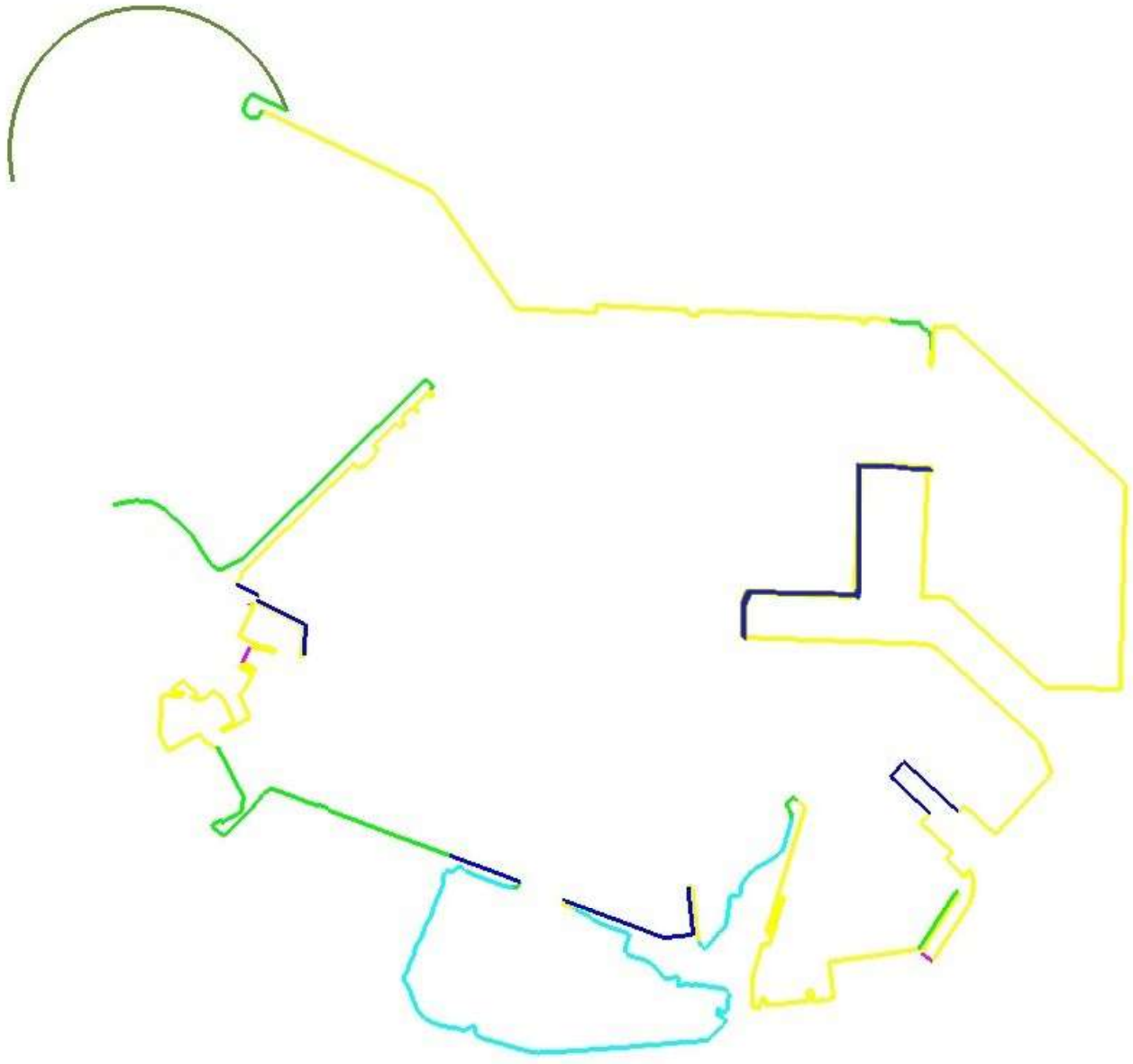


Figura 7. Condizione al contorno utilizzate nelle simulazioni per la situazione attuale; - Corona circolare all'esterno (marrone); - Parete verticale (giallo); - Parete verticale con celle antirisacca (blue scuro); - Scogliera (verde); - Terreno con scarpata naturale (azzurro); - Scalo di alaggio (viola)

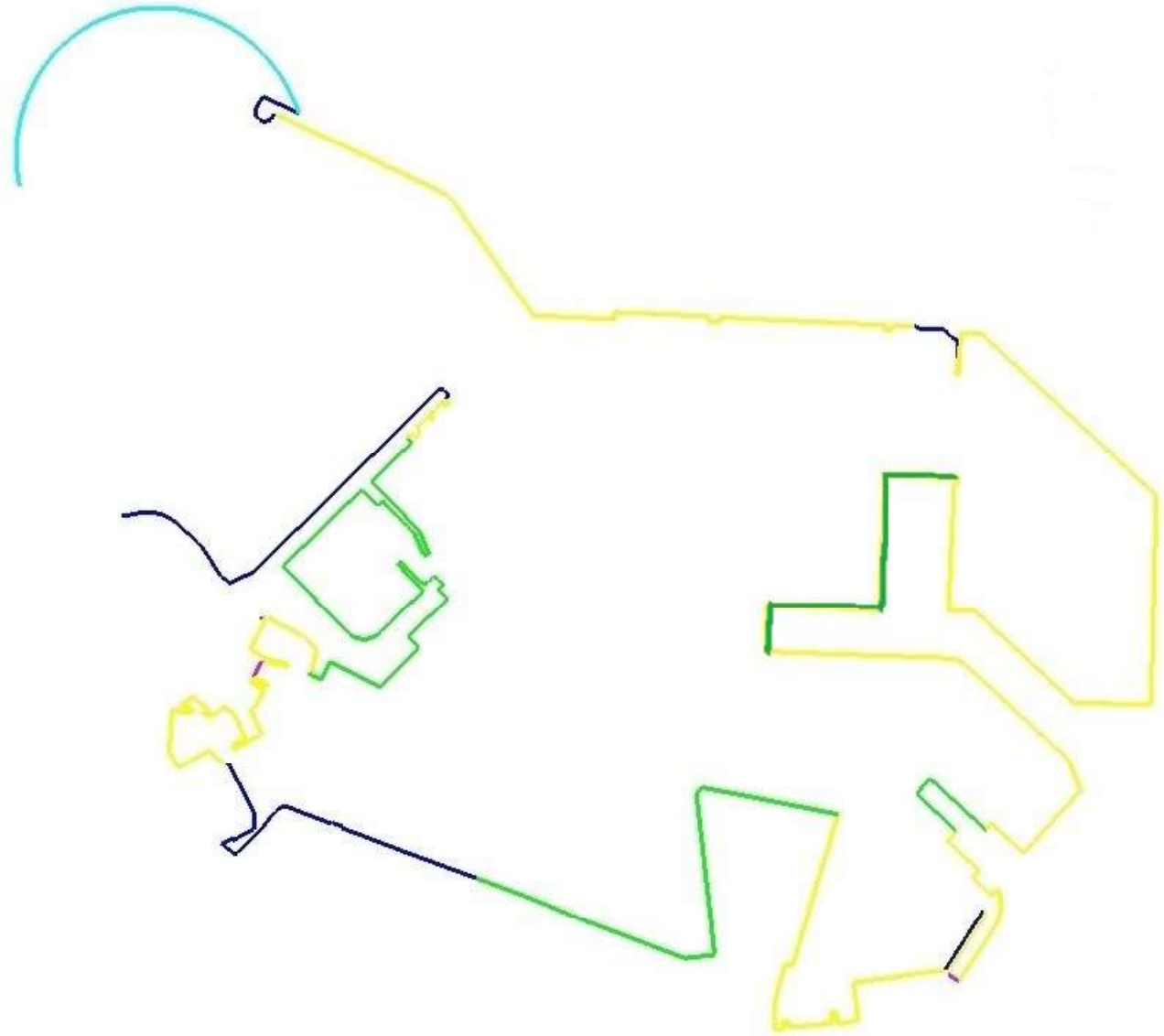


Figura 8. Condizione al contorno utilizzate nelle simulazioni per la situazione futura; - Corona circolare all'esterno (azzurro); - Parete verticale (giallo); - Parete verticale con celle antirisacca (verde); - Scogliera (blu); - Scalo di alaggio (viola)

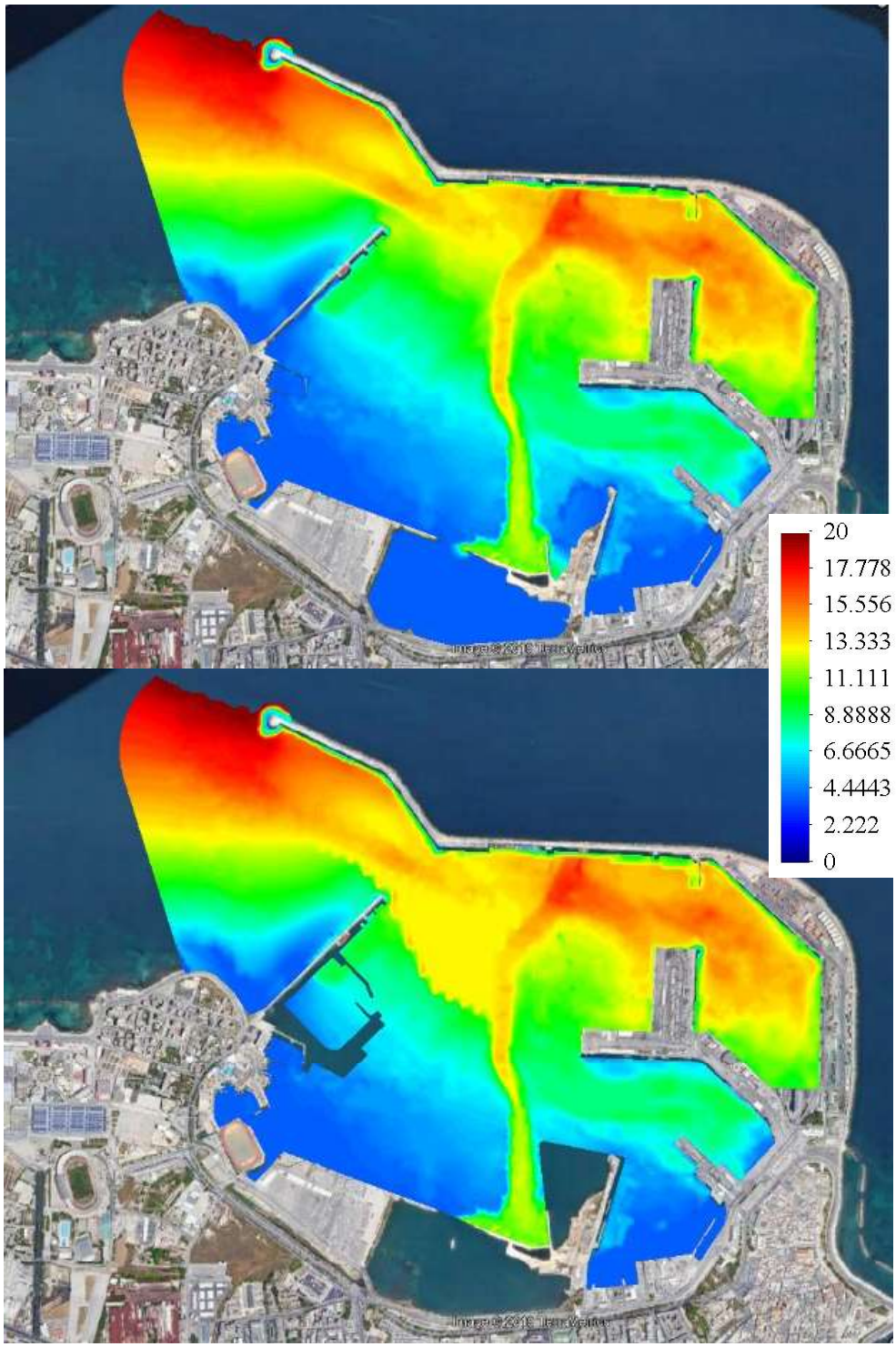


Figura 9. Batimetria, in metri, nel dominio di calcolo. Situazione attuale (su) e futura (giù)

La propagazione del moto ondoso (irregolare e con dispersione direzionale) è stata condotta mediante la sovrapposizione delle differenti componenti in cui è stato suddiviso lo spettro di energia. Il numero totale di componenti (bins) è 50: 10 direzioni e 5 frequenze per direzione.
A causa della linearità dei modelli impiegati nella zona di studio, trascurando possibili meccanismi di dissipazione di energia del moto ondoso, tutti gli spettri energetici sono stati dimensionati per un valore unitario dell'altezza d'onda significativa, in modo da ottenere i coefficienti adimensionali di agitazione rispetto ai valori di altezza d'onda incidente assunti all'imboccatura del porto (Hs,i).
A seguito della valutazione (*"Studio del clima anemometrico e ondoso al largo e studio della propagazione da largo all'imboccatura"*) delle caratteristiche del clima ondoso determinato in prossimità dell'imboccatura del porto, si è stabilito di procedure alla simulazione della propagazione del moto ondoso nel bacino portuale per le seguenti condizioni.

- 8 direzioni di propagazione: 330°N, 340°N, 350°N, 0°N, 10°N, 20°N, 30°N, 40°N
- 4 periodi di picco (Tp): 6 s, 8 s, 10 s, 12 s

6. ANALISI DEI RISULTATI

6.1 COEFFICIENTE DI AGITAZIONE, Ka

I risultati ottenuti, in termini di distribuzione del coefficiente di agitazione all'interno del porto, sono riportati in forma grafica nell'Appendice A per tutte le condizioni di moto ondoso adottate.
A titolo illustrativo, vengono mostrati i risultati ottenuti per la direzione delle onde (330°N) che genera una maggiore agitazione ondosa interna, per valori del periodo di picco dello spettro d'onda: Tp = 6 s (10, Figura 11) e Tp = 12 s (Figura 12, Figura 13). Le Figure mostrano, per la situazione attuale e in 2 punti rappresentativi all'interno del porto (l'imboccatura interna - Figura 7 - e la banchina per la nave di progetto - Figura 8), la variazione del coefficiente di agitazione al variare del periodo e della direzione del moto ondoso.

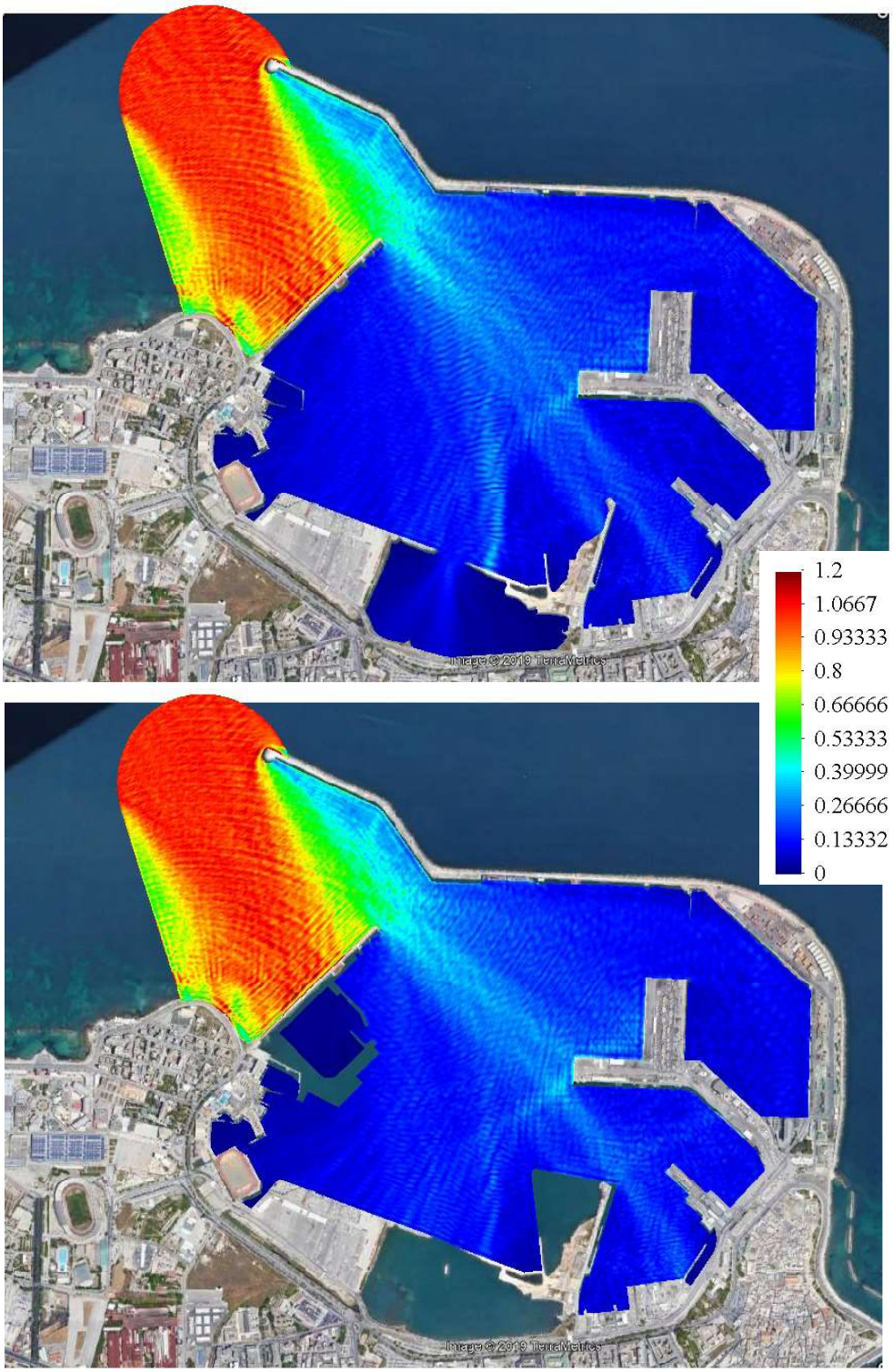


Figura 10. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i).
Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s.
Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala

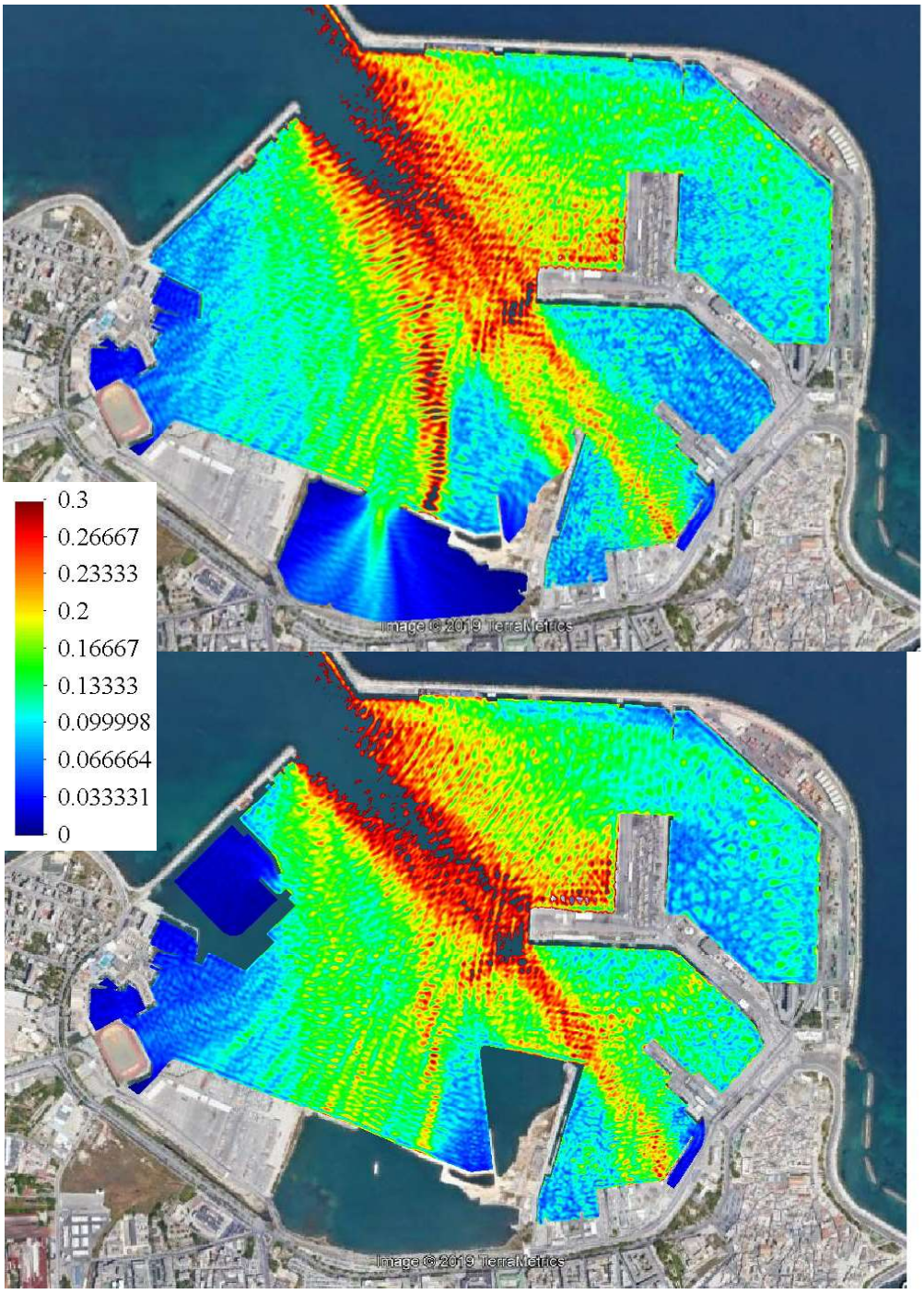


Figura 11. ZOOM. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i).
Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s.
Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio

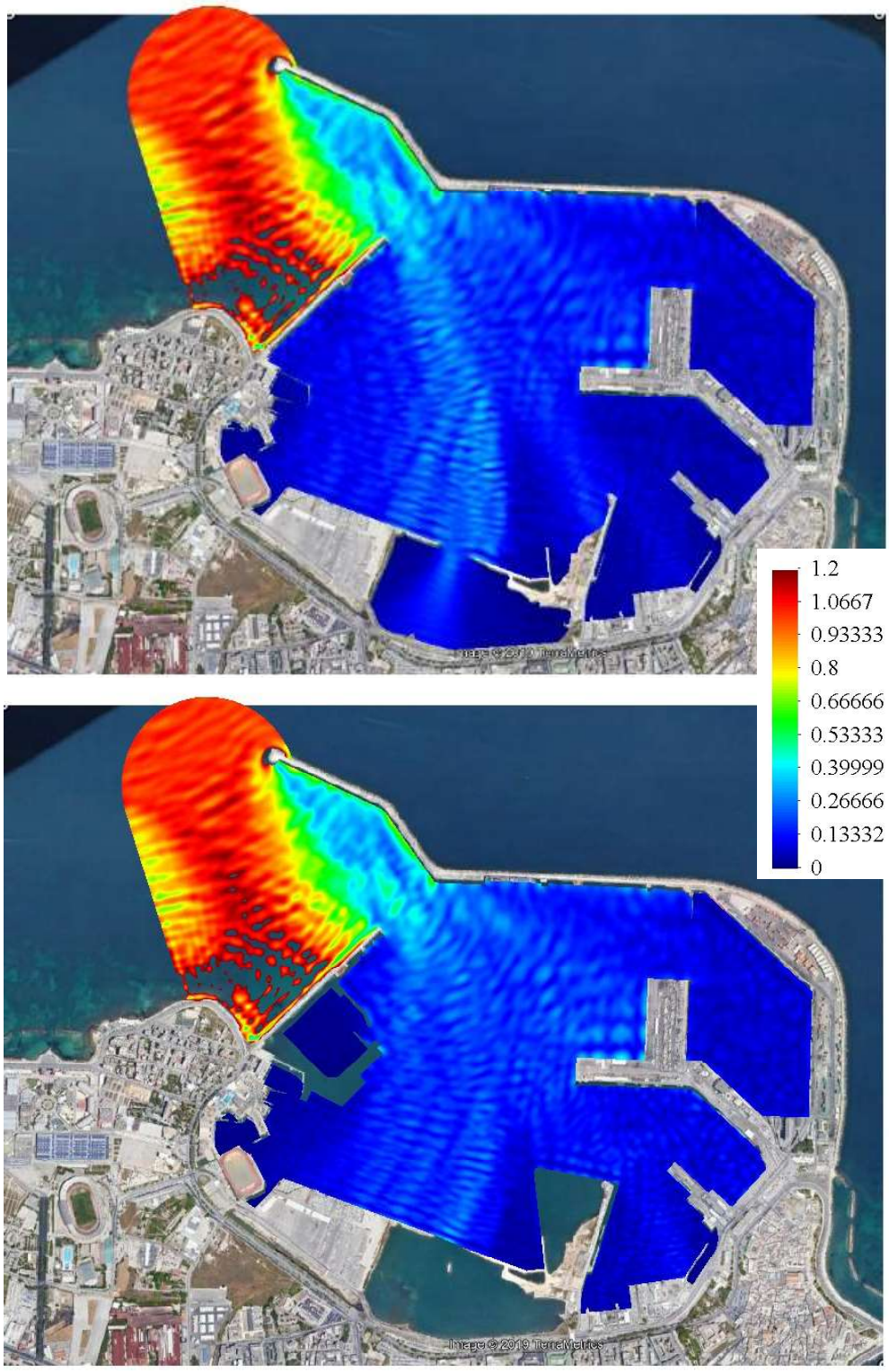


Figura 5. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i).
Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s.
Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala

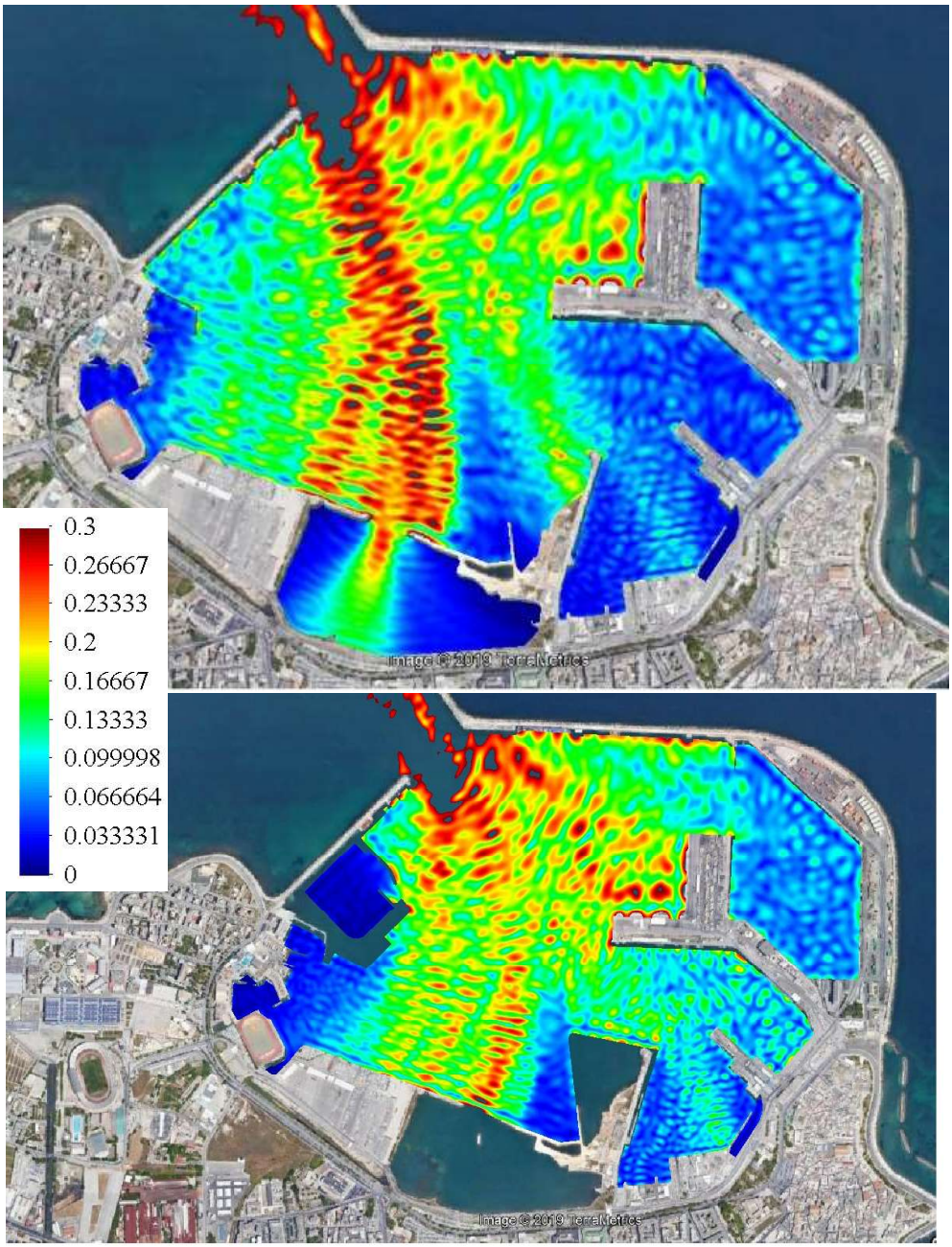


Figura 13. ZOOM. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Hs,i). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio

Nell'ambito dell'intero dominio di calcolo, sono state selezionate 23 zone di interesse (Figura 6) **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**):

- 4 punti di interesse per lo studio di manovrabilità della nave di progetto (P1-P4)
- 12 zone in corrispondenza degli ormeggi per il raffronto delle condizioni di agitazione nell'assetto attuale e in quello di variante localizzata (B1-B12)
- 7 zone ai nuovi ormeggi che scaturiscono dalla variante localizzata (B13-B19).

Tabella 3. Le 23 zone di interesse selezionate

Punti	Nome
P1	Imboccatura esterna
P2	Imboccatura interna
P3	centro del cerchio di evoluzione per nave di progetto
P4	centro del porto
Banchine	
B1	quarto braccio molo foraneo
B2	terzo braccio molo foraneo
B3	terzo braccio molo foraneo
B4	Levante 1 (Mezzaluna)
B5	Levante 2
B6	Levante 3
B7	Ponente Crociere
B8	Interna
B9	Molo San Vito 1
B10	Molo San Vito 2
B11	Approdo Darsena Vecchia
B12	Approdo Marisabella (conc. Ciccio Pascazio)
Nuove Banchine	
B13	Ponente Nuovo Pontile
B14	Nuovo Molo Pizzoli 1
B15	Nuovo Molo Pizzoli 2
B16	Guardia Costiera 1
B17	Guardia Costiera 2
B18	Guardia Costiera 3
B19	Molo San Cataldo



Figura 6. Definizione delle zone di analisi dell'agitazione interna

Le Figure 15 e 16 mostrano, per la configurazione attuale del porto, l'andamento del valore medio del coefficiente di agitazione, Ka=Hs/Hs,i, in corrispondenza del punto P2 e della banchina ove attracca la nave di progetto (B7, ovvero la banchina 10 secondo la numerazione di AdSPMAM). Da esse si può osservare che i valori assunti da Ka sono compresi tra 0,3 e 0,85, se in corrispondenza del punto P2, e tra 0,05 e 0,2, se in corrispondenza del punto B7. Tale evenienza mostra la sufficiente capacità di riduzione dell'energia del moto ondoso che viene offerta dalla geometria del porto di Bari nella sua attuale configurazione.

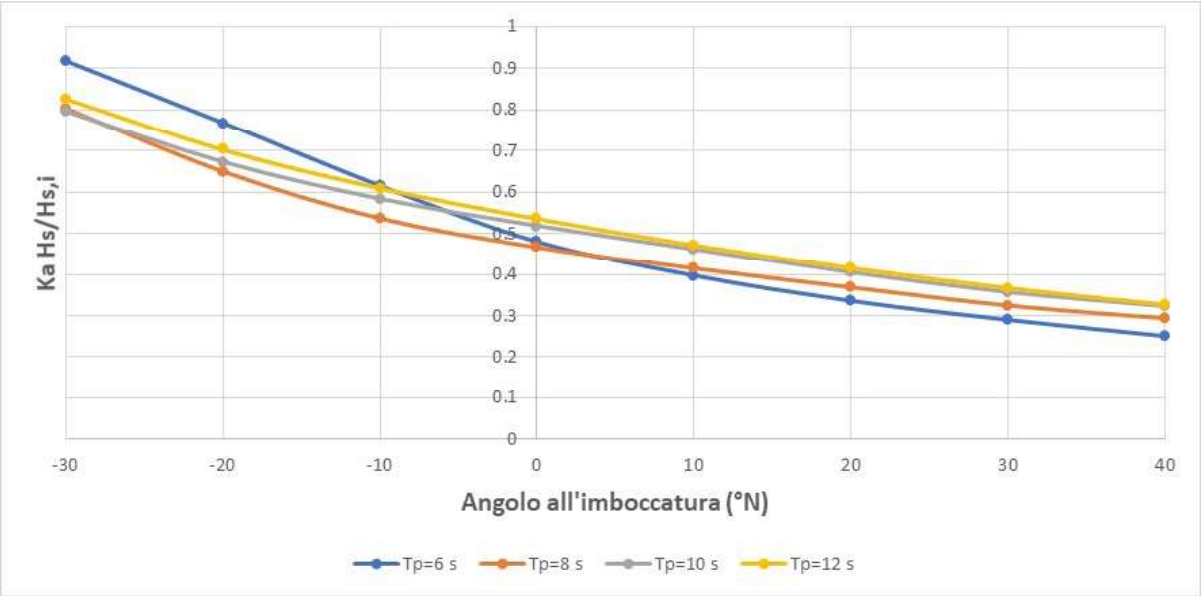


Figura 7. Variazione del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i in corrispondenza dell'imboccatura interna (P2) con la direzione e il periodo del moto ondoso all'imboccatura. Situazione Attuale

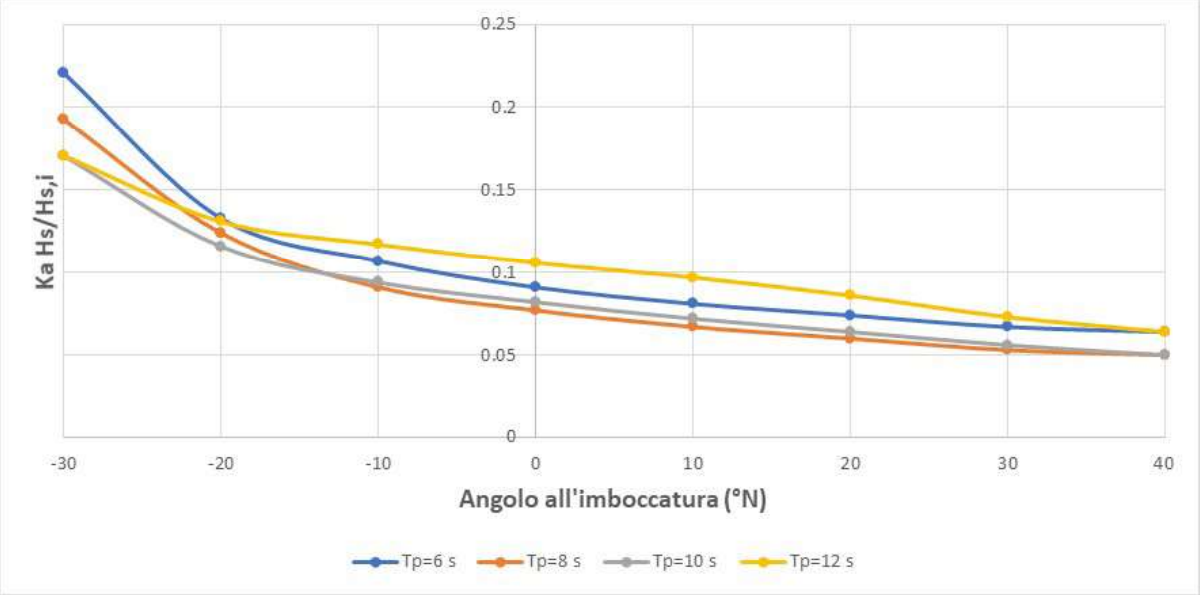


Figura 8. Variazione del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alla banchina per la nave di progetto (B7) con la direzione e il periodo del moto ondoso all'imboccatura. Situazione Attuale

I risultati ottenuti in termini di coefficiente medio di agitazione (Ka=Hs/Hs,imboccatura) nelle zone considerate all'interno del porto sono raccolti in Tabella 4 (punti P1-P4), Tabella 5 (banchine B1-B4), Tabella 6 (banchine B5-B8) e Tabella 7 (banchine B9-12) per la Situazione Attuale e quella Futura ed in Tabella 8 (banchine B13-B19) per la sola Situazione Futura.

Tabella 4. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i ai punti P1-P4. Situazione attuale e situazione futura

Direzione (°N)	Periodo Tp (s)	P1		P2		P3		P4	
		Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura
330	6	0.916	0.906	0.406	0.396	0.316	0.286	0.224	0.190
	8	0.802	0.790	0.399	0.372	0.256	0.263	0.259	0.190
	10	0.795	0.779	0.360	0.358	0.275	0.276	0.229	0.178
	12	0.827	0.820	0.337	0.346	0.193	0.228	0.192	0.194
340	6	0.767	0.769	0.259	0.255	0.175	0.174	0.137	0.128
	8	0.649	0.648	0.275	0.262	0.163	0.177	0.168	0.127
	10	0.672	0.664	0.267	0.268	0.188	0.204	0.163	0.132
	12	0.703	0.700	0.240	0.248	0.136	0.168	0.133	0.148
350	6	0.614	0.624	0.204	0.202	0.120	0.127	0.100	0.090
	8	0.536	0.543	0.211	0.200	0.128	0.135	0.123	0.098
	10	0.583	0.583	0.220	0.227	0.146	0.160	0.130	0.107
	12	0.610	0.612	0.209	0.216	0.113	0.134	0.103	0.124
0	6	0.479	0.490	0.172	0.173	0.104	0.110	0.085	0.076
	8	0.466	0.472	0.178	0.167	0.110	0.115	0.102	0.083
	10	0.518	0.522	0.193	0.200	0.120	0.130	0.108	0.090
	12	0.536	0.541	0.184	0.195	0.098	0.116	0.086	0.110
10	6	0.396	0.402	0.142	0.149	0.089	0.097	0.077	0.068
	8	0.414	0.417	0.146	0.141	0.099	0.105	0.092	0.073
	10	0.461	0.463	0.159	0.167	0.107	0.113	0.094	0.082
	12	0.472	0.478	0.151	0.165	0.085	0.104	0.074	0.099
20	6	0.335	0.337	0.121	0.126	0.079	0.087	0.070	0.060
	8	0.368	0.369	0.118	0.124	0.089	0.095	0.084	0.066
	10	0.404	0.404	0.130	0.139	0.097	0.103	0.086	0.076
	12	0.416	0.420	0.116	0.128	0.072	0.091	0.065	0.088
30	6	0.289	0.287	0.103	0.109	0.069	0.078	0.063	0.055
	8	0.324	0.325	0.103	0.109	0.082	0.086	0.077	0.058
	10	0.356	0.355	0.114	0.124	0.088	0.093	0.078	0.069
	12	0.367	0.370	0.098	0.106	0.062	0.079	0.057	0.077
40	6	0.250	0.253	0.095	0.101	0.062	0.068	0.054	0.051
	8	0.293	0.291	0.092	0.099	0.074	0.077	0.068	0.050
	10	0.322	0.319	0.102	0.112	0.078	0.083	0.069	0.061
	12	0.327	0.330	0.086	0.092	0.057	0.072	0.053	0.069

Tabella 5. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alle banchine B1-B4. Situazione attuale e situazione futura

Direzione (°N)	Periodo Tp (s)	B1		B2		B3		B4	
		Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura
330	6	0.299	0.304	0.172	0.178	0.111	0.113	0.135	0.131
	8	0.319	0.321	0.174	0.170	0.128	0.127	0.114	0.102
	10	0.369	0.378	0.170	0.167	0.142	0.151	0.076	0.072
	12	0.454	0.450	0.196	0.192	0.177	0.196	0.079	0.072
340	6	0.221	0.234	0.124	0.126	0.071	0.075	0.085	0.092
	8	0.231	0.236	0.120	0.117	0.080	0.083	0.069	0.066
	10	0.297	0.301	0.132	0.127	0.111	0.117	0.050	0.049
	12	0.384	0.384	0.167	0.163	0.151	0.159	0.057	0.047
350	6	0.188	0.192	0.100	0.096	0.052	0.055	0.058	0.068
	8	0.206	0.208	0.102	0.097	0.062	0.065	0.047	0.050
	10	0.272	0.274	0.119	0.116	0.100	0.109	0.037	0.040
	12	0.355	0.355	0.159	0.156	0.142	0.149	0.046	0.037
0	6	0.166	0.165	0.085	0.079	0.045	0.050	0.046	0.052
	8	0.186	0.183	0.086	0.082	0.052	0.055	0.037	0.041
	10	0.249	0.248	0.104	0.102	0.090	0.098	0.031	0.034
	12	0.320	0.319	0.142	0.141	0.125	0.135	0.040	0.031
10	6	0.136	0.132	0.066	0.062	0.037	0.043	0.038	0.043
	8	0.159	0.154	0.065	0.063	0.039	0.045	0.029	0.030
	10	0.215	0.213	0.079	0.078	0.073	0.080	0.025	0.027
	12	0.275	0.274	0.111	0.110	0.096	0.110	0.033	0.025
20	6	0.105	0.105	0.051	0.051	0.033	0.035	0.030	0.037
	8	0.132	0.129	0.045	0.045	0.027	0.034	0.023	0.021
	10	0.183	0.182	0.054	0.052	0.053	0.058	0.019	0.021
	12	0.229	0.228	0.083	0.079	0.070	0.084	0.027	0.021
30	6	0.088	0.093	0.039	0.041	0.027	0.030	0.027	0.033
	8	0.115	0.111	0.037	0.037	0.023	0.030	0.021	0.017
	10	0.162	0.160	0.044	0.040	0.042	0.046	0.016	0.018
	12	0.200	0.198	0.069	0.063	0.057	0.069	0.023	0.018
40	6	0.079	0.092	0.034	0.038	0.024	0.029	0.026	0.033
	8	0.103	0.100	0.033	0.032	0.020	0.026	0.018	0.017
	10	0.147	0.145	0.039	0.035	0.037	0.041	0.014	0.016
	12	0.180	0.178	0.060	0.055	0.050	0.060	0.020	0.016

Tabella 6. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i nelle banchine B5-B8. Situazione attuale e situazione futura

Direzione	Periodo	B5		B6		B7		B8	
(°N)	Tp (s)	Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura
330	6	0.106	0.100	0.085	0.073	0.221	0.246	0.076	0.122
	8	0.090	0.088	0.076	0.070	0.193	0.215	0.065	0.127
	10	0.075	0.083	0.053	0.067	0.171	0.189	0.050	0.124
	12	0.086	0.089	0.067	0.088	0.171	0.216	0.044	0.104
340	6	0.066	0.070	0.048	0.051	0.133	0.144	0.045	0.079
	8	0.058	0.055	0.044	0.044	0.124	0.133	0.044	0.086
	10	0.055	0.058	0.039	0.048	0.116	0.122	0.031	0.089
	12	0.065	0.063	0.048	0.073	0.131	0.167	0.031	0.075
350	6	0.045	0.052	0.035	0.036	0.107	0.113	0.034	0.057
	8	0.043	0.044	0.030	0.034	0.091	0.098	0.034	0.064
	10	0.045	0.051	0.033	0.040	0.094	0.100	0.026	0.069
	12	0.058	0.054	0.045	0.066	0.117	0.145	0.026	0.059
0	6	0.037	0.040	0.027	0.029	0.091	0.098	0.029	0.048
	8	0.036	0.037	0.024	0.028	0.077	0.083	0.028	0.053
	10	0.041	0.048	0.029	0.036	0.082	0.087	0.022	0.055
	12	0.050	0.044	0.041	0.056	0.106	0.130	0.023	0.050
10	6	0.031	0.034	0.022	0.025	0.081	0.085	0.025	0.041
	8	0.029	0.029	0.020	0.022	0.067	0.073	0.024	0.046
	10	0.036	0.040	0.024	0.031	0.072	0.074	0.020	0.047
	12	0.039	0.033	0.035	0.044	0.097	0.118	0.021	0.044
20	6	0.025	0.030	0.019	0.023	0.074	0.073	0.021	0.038
	8	0.023	0.019	0.016	0.017	0.060	0.066	0.022	0.042
	10	0.029	0.032	0.021	0.027	0.064	0.065	0.017	0.042
	12	0.029	0.026	0.028	0.036	0.086	0.105	0.020	0.039
30	6	0.022	0.028	0.017	0.022	0.067	0.067	0.018	0.034
	8	0.020	0.015	0.015	0.014	0.053	0.060	0.020	0.038
	10	0.025	0.028	0.018	0.023	0.056	0.057	0.016	0.038
	12	0.025	0.024	0.023	0.032	0.073	0.090	0.017	0.036
40	6	0.022	0.029	0.018	0.021	0.064	0.067	0.017	0.030
	8	0.017	0.014	0.012	0.013	0.050	0.057	0.018	0.035
	10	0.023	0.025	0.016	0.020	0.050	0.052	0.014	0.034
	12	0.022	0.021	0.020	0.029	0.064	0.079	0.015	0.034

Tabella 7. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i nelle banchine B9-B12. Situazione attuale e situazione futura

Direzione (°N)	Periodo Tp (s)	B13 Futura	B14 Futura	B15 Futura	B16 Futura	B17 Futura	B18 Futura	B19 Futura
330	6	0.175	0.173	0.087	0.114	0.090	0.056	0.100
	8	0.175	0.162	0.062	0.096	0.079	0.051	0.125
	10	0.154	0.176	0.064	0.098	0.086	0.054	0.113
	12	0.186	0.142	0.058	0.126	0.074	0.046	0.109
340	6	0.118	0.110	0.059	0.072	0.054	0.034	0.068
	8	0.116	0.112	0.042	0.068	0.054	0.034	0.084
	10	0.107	0.131	0.040	0.071	0.060	0.038	0.076
	12	0.131	0.105	0.044	0.105	0.058	0.033	0.078
350	6	0.091	0.077	0.041	0.055	0.039	0.025	0.051
	8	0.094	0.084	0.034	0.060	0.047	0.028	0.064
	10	0.087	0.104	0.032	0.064	0.051	0.032	0.062
	12	0.119	0.086	0.040	0.098	0.052	0.028	0.064
0	6	0.081	0.066	0.035	0.045	0.034	0.021	0.044
	8	0.078	0.070	0.028	0.051	0.041	0.024	0.052
	10	0.079	0.086	0.027	0.059	0.047	0.028	0.054
	12	0.108	0.072	0.036	0.088	0.048	0.026	0.055
10	6	0.070	0.059	0.032	0.039	0.030	0.020	0.040
	8	0.065	0.062	0.025	0.042	0.033	0.020	0.045
	10	0.071	0.075	0.023	0.051	0.040	0.024	0.047
	12	0.092	0.061	0.029	0.074	0.042	0.022	0.050
20	6	0.062	0.053	0.030	0.034	0.027	0.018	0.035
	8	0.056	0.057	0.023	0.036	0.026	0.017	0.040
	10	0.064	0.067	0.020	0.042	0.033	0.020	0.041
	12	0.073	0.052	0.024	0.057	0.033	0.018	0.045
30	6	0.059	0.048	0.028	0.032	0.025	0.016	0.030
	8	0.050	0.052	0.021	0.033	0.023	0.015	0.036
	10	0.057	0.061	0.018	0.037	0.029	0.018	0.036
	12	0.060	0.047	0.021	0.049	0.029	0.015	0.038
40	6	0.062	0.042	0.026	0.033	0.025	0.016	0.029
	8	0.045	0.046	0.019	0.031	0.020	0.013	0.032
	10	0.051	0.055	0.017	0.034	0.026	0.016	0.032
	12	0.052	0.045	0.019	0.044	0.026	0.013	0.033

Tabella 8. Valori del coefficiente medio di agitazione Ka=Hs/Hs,i alle banchine B13-B19. Situazione futura

Direzione (°N)	Periodo Tp (s)	B9		B10		B11		B12	
		Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura	Attuale	Futura
330	6	0.075	0.122	0.130	0.138	0.077	0.084	0.107	0.103
	8	0.062	0.121	0.102	0.125	0.069	0.091	0.114	0.092
	10	0.051	0.116	0.075	0.102	0.041	0.094	0.123	0.081
	12	0.042	0.082	0.055	0.072	0.031	0.052	0.147	0.105
340	6	0.044	0.078	0.069	0.081	0.045	0.055	0.063	0.067
	8	0.040	0.083	0.062	0.089	0.041	0.065	0.076	0.063
	10	0.031	0.082	0.047	0.074	0.024	0.068	0.081	0.059
	12	0.031	0.061	0.039	0.050	0.022	0.033	0.111	0.076
350	6	0.036	0.054	0.047	0.057	0.032	0.040	0.046	0.050
	8	0.031	0.063	0.049	0.070	0.031	0.051	0.059	0.052
	10	0.026	0.062	0.038	0.058	0.019	0.053	0.060	0.049
	12	0.026	0.050	0.033	0.040	0.018	0.026	0.104	0.068
0	6	0.032	0.045	0.041	0.047	0.027	0.033	0.038	0.043
	8	0.026	0.052	0.042	0.059	0.026	0.042	0.050	0.043
	10	0.022	0.049	0.032	0.047	0.015	0.043	0.052	0.043
	12	0.022	0.042	0.027	0.034	0.016	0.021	0.095	0.057
10	6	0.028	0.041	0.036	0.041	0.024	0.028	0.034	0.036
	8	0.023	0.046	0.037	0.052	0.022	0.037	0.040	0.034
	10	0.020	0.041	0.028	0.041	0.013	0.038	0.043	0.037
	12	0.020	0.036	0.023	0.029	0.013	0.018	0.079	0.045
20	6	0.023	0.038	0.031	0.036	0.021	0.025	0.030	0.033
	8	0.020	0.042	0.033	0.047	0.019	0.034	0.034	0.029
	10	0.018	0.036	0.025	0.038	0.011	0.034	0.037	0.031
	12	0.019	0.031	0.021	0.024	0.012	0.015	0.061	0.035
30	6	0.020	0.034	0.026	0.033	0.017	0.022	0.028	0.030
	8	0.018	0.038	0.030	0.042	0.018	0.030	0.029	0.026
	10	0.016	0.032	0.023	0.034	0.010	0.030	0.032	0.028
	12	0.018	0.029	0.019	0.021	0.010	0.014	0.050	0.030
40	6	0.019	0.030	0.023	0.030	0.016	0.019	0.026	0.029
	8	0.016	0.034	0.027	0.039	0.016	0.027	0.025	0.023
	10	0.015	0.029	0.021	0.030	0.009	0.027	0.029	0.025
	12	0.015	0.027	0.017	0.020	0.009	0.014	0.044	0.027

6.2 ANALISI STATISTICA

Una volta ottenuti i valori del coefficiente di agitazione Ka nelle aree prestabilite nel porto, risulta difficoltoso produrre i relativi livelli di agitazione. Per tale scopo, noti i valori del coefficiente di agitazione dell'onda nell'area di interesse nel porto, occorre preliminarmente determinare le serie storiche di moto ondoso in ciascuna delle diverse aree del porto sulla base dell'applicazione della tecnica d'interpolazione bilineare (già descritta nel rapporto di *"Studio del clima anemometrico e ondoso al largo e studio della propagazione da largo all'imboccatura"*) alla serie storica di moto ondoso all'imboccatura.

Nota, attraverso la tecnica d'interpolazione lineare, la registrazione di moto ondoso in una delle aree prescelte nel porto, per la situazione attuale e per quella futura, è possibile ottenere i valori di altezza d'onda significativa associati a diversi valori della probabilità di non superamento. I risultati delle calcolazioni sono riportati in

Tabella 9 (punti P1-P4), Tabella (banchine B1-B4), Tabella (banchine B5-B8) , Tabella 8 (banchine B9-B12) , e Tabella 9 (banchine B13-B19).

La registrazione di moto ondoso consente anche di calcolare il valore del "downtime[2]" per diverse soglie di valori di Hs. Il numero di ore/anno di superamento di un'assegnata soglia di Hs sono riportate in Tabella 10 (punti P1-P4), Tabella 11 (banchine B1-B4), Tabella 12 (banchine B5-B8) , Tabella 13 (banchine B9-B12) , and Tabella 14 (banchine B13-B19).

[2] Downtime stimato in ore di superamento per anno di una certa soglia di altezza d'onda significativa

Tabella 9. Valori di altezza d'onda significativa associati a valori di probabilità, situazione attuale e situazione futura, nei punti P1-P4

Prob (Hs>X)	Hs (m)							
	P1		P2		P3		P4	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.500	0.12	0.12	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02
0.750	0.41	0.41	0.15	0.15	0.11	0.10	0.08	0.07
0.900	0.75	0.75	0.30	0.29	0.22	0.21	0.16	0.14
0.950	1.00	1.00	0.40	0.39	0.30	0.28	0.22	0.19
0.990	1.55	1.53	0.67	0.64	0.48	0.45	0.38	0.31
0.995	1.72	1.71	0.75	0.72	0.54	0.51	0.44	0.35
0.999	2.13	2.12	0.97	0.93	0.66	0.65	0.60	0.46

Tabella 10. Valori di altezza d'onda significativa associati a valori di probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B1 a B4

Prob (Hs>X)	Hs (m)							
	B1		B2		B3		B4	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.500	0.04	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
0.750	0.13	0.13	0.07	0.07	0.04	0.04	0.05	0.05
0.900	0.24	0.25	0.13	0.13	0.08	0.08	0.10	0.10
0.950	0.32	0.33	0.18	0.18	0.11	0.12	0.13	0.13
0.990	0.53	0.54	0.29	0.29	0.19	0.20	0.21	0.20
0.995	0.60	0.61	0.33	0.33	0.22	0.23	0.23	0.22
0.999	0.80	0.80	0.42	0.42	0.30	0.30	0.28	0.27

Tabella 11. Valori di altezza d'onda significativa associati a valori di probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B5 a B8

Prob (Hs>X)	Hs (m)							
	B5		B6		B7		B8	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.500	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.01
0.750	0.04	0.04	0.03	0.03	0.08	0.09	0.03	0.05
0.900	0.08	0.07	0.06	0.05	0.16	0.17	0.05	0.09
0.950	0.10	0.10	0.08	0.07	0.21	0.23	0.07	0.12
0.990	0.16	0.16	0.13	0.12	0.34	0.38	0.12	0.20
0.995	0.18	0.18	0.15	0.13	0.39	0.43	0.13	0.23
0.999	0.23	0.22	0.18	0.17	0.48	0.53	0.16	0.30

Tabella 8. Valori di altezza d'onda significativa associati a valori di probabilità, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12

Prob (Hs>X)	Hs (m)							
	B9		B10		B11		B12	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.500	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.750	0.03	0.05	0.04	0.05	0.03	0.03	0.04	0.04
0.900	0.05	0.09	0.09	0.10	0.05	0.06	0.08	0.08
0.950	0.07	0.12	0.12	0.13	0.07	0.09	0.10	0.10
0.990	0.11	0.20	0.19	0.22	0.12	0.14	0.18	0.16
0.995	0.13	0.23	0.22	0.25	0.13	0.17	0.20	0.18
0.999	0.16	0.29	0.26	0.31	0.17	0.22	0.27	0.23

Tabella 9. Valori di altezza d'onda significativa associati a valori di probabilità, situazione attuale e situazione futura, da B13 a B19

Prob (Hs>X)	Hs (m)						
	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
0.500	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.750	0.07	0.06	0.03	0.05	0.03	0.02	0.04
0.900	0.13	0.13	0.06	0.09	0.06	0.04	0.08
0.950	0.18	0.17	0.09	0.12	0.09	0.05	0.10
0.990	0.29	0.28	0.13	0.19	0.14	0.09	0.18
0.995	0.32	0.32	0.15	0.22	0.16	0.10	0.21
0.999	0.42	0.40	0.18	0.27	0.20	0.13	0.29

Tabella 10. Numero d'ore/anno di superamento dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, punti P1-P2-P3-P4

Hs (m)	Ore annuali di superamento di Hs (m)							
	P1		P2		P3		P4	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.25	3222.4	3233.0	1230.5	1204.4	684.1	604.8	347.1	217.5
0.75	1734.3	1734.3	253.1	231.3	71.2	53.9	24.1	5.0
1.00	898.5	894.9	44.9	35.8	3.4	3.4	0.9	0.0
1.25	440.7	439.3	6.5	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1.50	223.6	218.9	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
1.75	104.4	101.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.00	39.2	36.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.25	16.0	15.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.50	6.1	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.75	1.8	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3.00	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 11. Numero d'ore/anno di superamento dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B1 a B4

Hs (m)	Ore annuali di superamento di Hs (m)							
	B1		B2		B3		B4	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.20	1269.9	1308.9	343.5	365.8	80.0	89.0	114.1	100.3
0.30	541.2	570.3	81.1	85.2	9.5	10.4	5.2	2.7
0.40	239.2	257.2	14.9	14.4	1.6	1.6	0.0	0.0
0.50	110.7	118.8	2.3	2.0	0.0	0.2	0.0	0.0
0.60	45.5	50.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.70	20.3	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.80	8.8	8.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.90	4.5	5.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	1.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.10	1.1	1.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.20	0.7	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 12. Numero d'ore/anno di superamento dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B5 a B8

Hs (m)	Ore annuali di superamento di Hs (m)							
	B5		B6		B7		B8	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.20	29.1	23.9	4.5	2.7	550.2	679.4	0.9	101.9
0.30	0.0	0.0	0.0	0.0	160.5	232.2	0.0	11.5
0.40	0.0	0.0	0.0	0.0	36.3	69.9	0.0	0.7
0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	16.2	0.0	0.0
0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	3.2	0.0	0.0
0.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 13. Numero d'ore/anno di superamento dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12

Hs (m)	Ore annuali di superamento di Hs (m)							
	B9		B10		B11		B12	
	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut	Att	Fut
0.20	0.2	96.9	81.4	139.5	1.4	17.4	55.9	29.8
0.30	0.0	8.1	2.7	13.7	0.0	0.5	5.0	0.2
0.40	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0	0.2	0.0
0.50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.60	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabella 14. Numero d'ore/anno di superamento dei valori di altezza d'onda significativa, situazione attuale e situazione futura, banchine da B9 a B12

Hs (m)	Ore annuali di superamento di Hs (m)						
	B13	B14	B15	B16	B17	B18	B19
0.20	335.9	313.1	2.5	85.7	11.0	0.0	63.8
0.30	79.3	65.6	0.0	4.5	0.0	0.0	7.2
0.40	14.7	10.4	0.0	0.2	0.0	0.0	0.5
0.50	2.0	1.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.60	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.70	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.80	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.90	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

7 ANALISI DI SINTESI DEI RISULTATI

Nel presente paragrafo si discutono i risultati statistici ottenuti. In particolare, si analizzano le informazioni ottenute dalle elaborazioni condotte per stabilire i livelli di agitazione in corrispondenza delle aree selezionate. Per una più agevole lettura dei risultati, si riporta nuovamente la Figura 14 ove sono indicate le 23 aree dello specchio acqueo selezionate.



Figura 9. Definizione delle zone di analisi dell'agitazione interna

Quarto braccio molo foraneo (B1)

- I livelli di agitazione dinanzi a questa banchina posta in area esterna al porto sono piuttosto elevati, raggiungendo valori anche pari a 1,2 m;
- Il *downtime* per valori di soglia di Hs pari a 0.8 m, 0.6 m and 0.4 m risulta pari a 9 ore/anno, 45-50 ore/anno, e 240-260 ore/anno, rispettivamente.
- Il layout di variante non influenza significativamente i livelli di agitazione esistenti, sebbene è stato osservato un lieve incremento dell'agitazione ondosa.

Terzo braccio molo foraneo (B2-B3)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono bassi, decrescenti al crescere della distanza dall'imboccatura, con un valore massimo di Hs sino a 0,6 m alla banchina più a ovest (B2) e sino a 0.5 m alla banchina più a est (B3).
- I valori di *downtime* per valore soglia di Hs pari a 0,4 m sono 15 ore/anno (B2) e 1,5 ore/anno (B3).
- Il layout di variante non modifica gli attuali livelli di agitazione.

Darsena di Levante (B4-B5-B6)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono molto ridotti, con il valore massimo di Hs sino a 0,4 m in corrispondenza della banchina più a nord (B4) e sino a 0,3 m alle banchine più a sud (B5 and B6).
- Il valore del *downtime* per soglia di Hs pari a 0,4 m è trascurabile in corrispondenza di tutti gli ormeggi.
- Il layout di variante determina una lieve riduzione rispetto ai livelli attuali dell'agitazione ondosa.

Banchina per nave di progetto (B7)

- I livelli di agitazione risultano accettabili, con valore massimo di Hs pari a 0,65 m.
- Il *downtime* per valori di soglia di Hs pari a 0.6 m, 0.5 m e 0.4 m sono 1-3 ore/anno, 7-16 ore/anno, e 160-232 ore/anno, rispettivamente.
- La variante determina un molto lieve incremento dei livelli di agitazione attuali, principalmente a causa del ripristino dei fondali che l'AdSPMAM effettuerà in corrispondenza dell'imboccatura e che indurranno una riduzione della rifrazione delle onde che attraversano l'imboccatura.

Darsena Interna (B8) - Molo San Vito (B9-B10) - Darsena Vecchia (B11)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono molto ridotti, con valore massimo di Hs pari a 0,3 m nella situazione attuale.
- Il layout di variante determina un incremento dei livelli attuali di agitazione a causa della riflessione che subiscono le onde in corrispondenza del lato nord del nuovo molo Pizzoli.
- Tuttavia, nello scenario di variante, il *downtime* per valore soglia di Hs pari a 0,4 m risulta trascurabile.

Marisabella (B12)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono molto ridotti, con valore massimo sino a 0,4 m nell'assetto attuale del porto.
- Il layout di variante determina una riduzione significativa dei livelli di agitazione attuali, causata dall'azione di ridosso prodotta dal nuovo porto turistico lungo il molo San Cataldo.
- Per il layout di variante, i valori del *downtime* per valore soglia di Hs pari a 0.3 m risultano trascurabili in tutta l'area.

Nuovo Pontile radicato alla Darsena di Ponente (B13)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono ridotti, minori rispetto al vicino ormeggio per la nave da crociera di progetto, con valore massimo di Hs pari a 0,50 m.
- Il *downtime* per valori di soglia di Hs pari a 0.5 m, 0.4 m e 0.3 m sono 2 ore/anno, 15 ore/anno, and 80 ore/anno, rispettivamente, che risultano ottimali per un ormeggio sicuro.

Nuovo Molo Pizzoli (B14-B15)

- I livelli di agitazione alla banchina nord (B14) saranno accettabili e molto bassi alla banchina più a ovest (B15), con valore massimo di Hs sino a 0,60 m (B14) e 0,25 (B15).
- Il *downtime* per valori soglia di Hs pari a 0.5 m, 0.4 m e 0.3 m alla banchina B14 sono 1-2 ore/anno, 10 ore/anno, and 65 ore/anno, rispettivamente, che risultano ottimali per un ormeggio sicuro.

Nuovi ormeggi della nuova base Guardia Costiera (B16-B17-B18)

- I livelli di agitazione a queste banchine sono molto ridotti, con valore massimo di Hs sino a 0.40 m (B16), 0.25 m (B17), e 0.20 m (B18).
- Il valore del *downtime* per valore soglia di Hs pari a 0.4 m e per il layout di variante risulta trascurabile lungo tutti gli ormeggi.

Molo San Cataldo (B19)

- I livelli di agitazione alla banchina sono molto bassi, con valore massimo di Hs sino a 0,40 m.
- Per il layout di variante localizzata, il valore del *downtime* per soglia di Hs pari a 0.3 m risulta pari a 0,7 ore/anno.

8 CONDIZIONI PER LA SIMULAZIONE DI MANOVRA

La simulazione delle manovre della nave di progetto verrà eseguita in condizioni "real time full mission" presso un centro dotato di un appropriato simulatore. Le condizioni meteomarine per le quali verranno eseguite le prove di manovra verranno assegnate ai punti riportati in Figura 15.



Figura 15. I punti "Porto", P1, P2 e P3 ove assumere le condizioni di moto ondoso per le simulazioni della manovra con nave di progetto

Le condizioni di moto ondoso saranno assunte di tipo "cattive", "severe" e "molto severe", secondo quanto riportato nella Tabella 19.

Tabella 19. Condizioni di moto ondoso estreme

		Prob=0.9	Prol
Condizioni d'onda		**Cattive**	**Se**
Molo esterno	**Porto**	1,19	2
Imboccatura esterna	**P1**	1,53	1

(prof. ing. Giuseppe R. Tomasicchio)

Bari, dicembre 2019

APPENDICE A

SIMULAZIONE DELL'AGITAZIONE ONDOSA NEL PORTO DI BARI
RACCOLTA DI TUTTE LE FIGURE

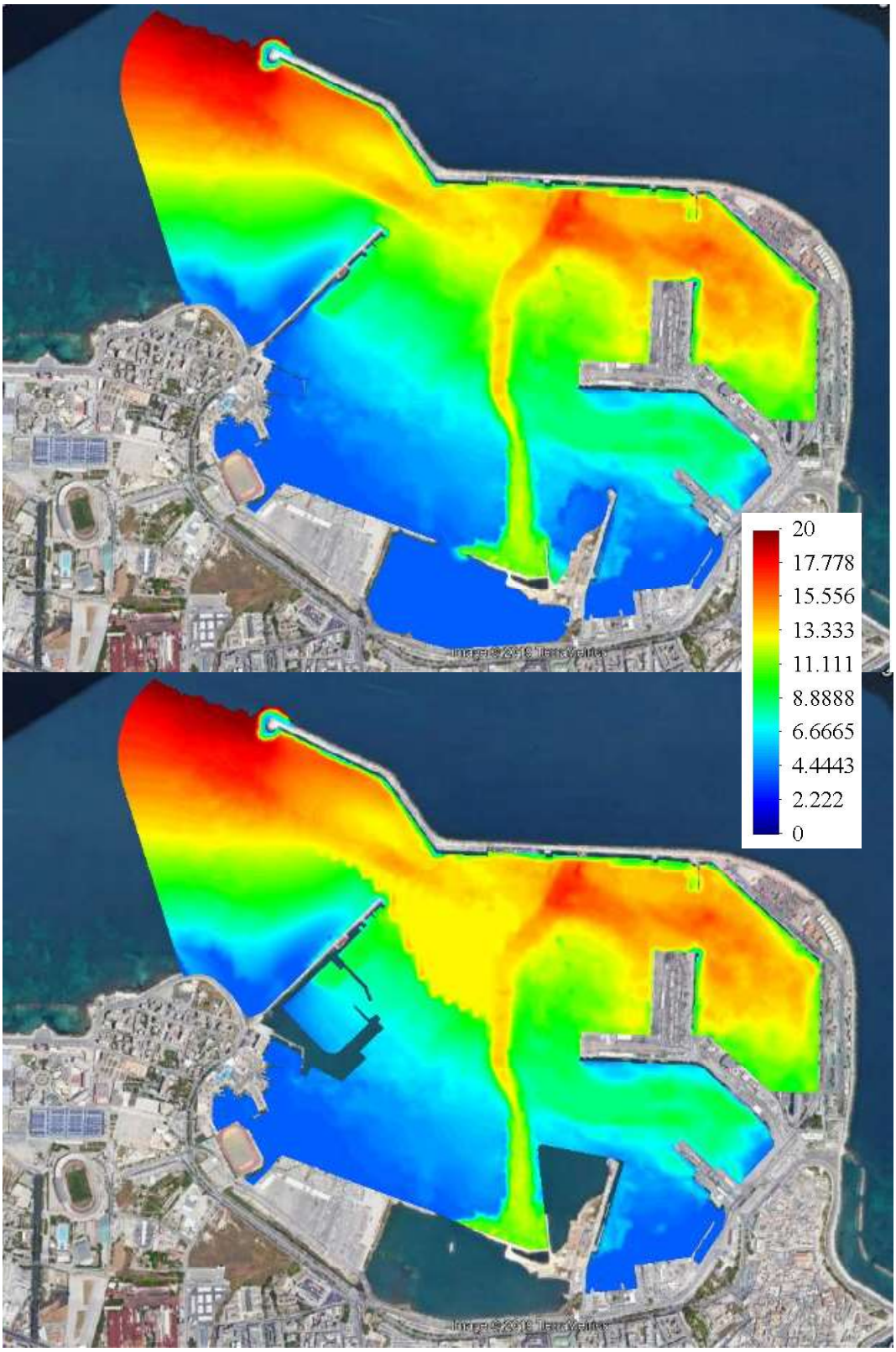


Figura 10. Batimetria nel dominio di calcolo. Situazione attuale (su) e futura (giù).

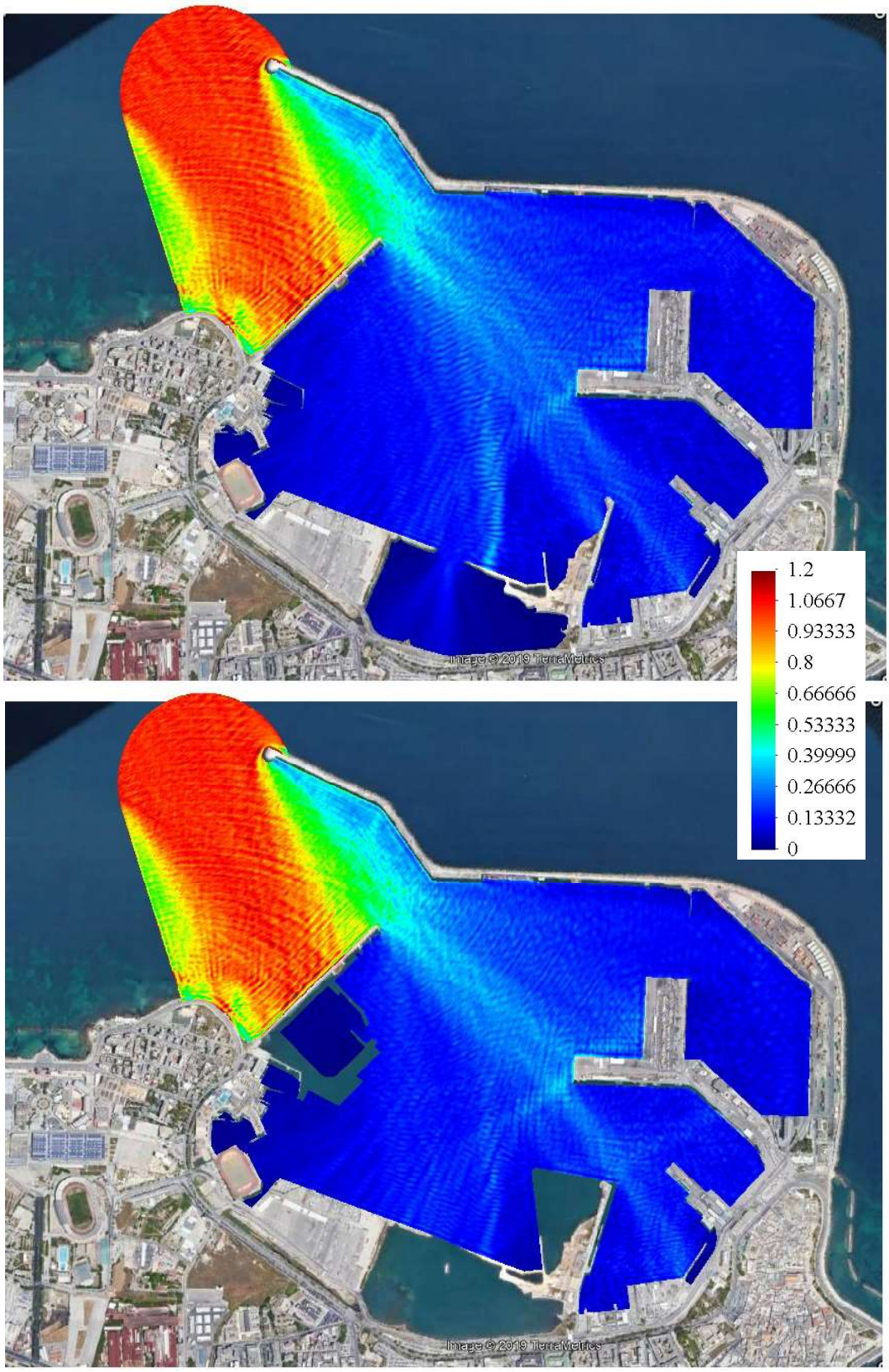


Figura 11. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

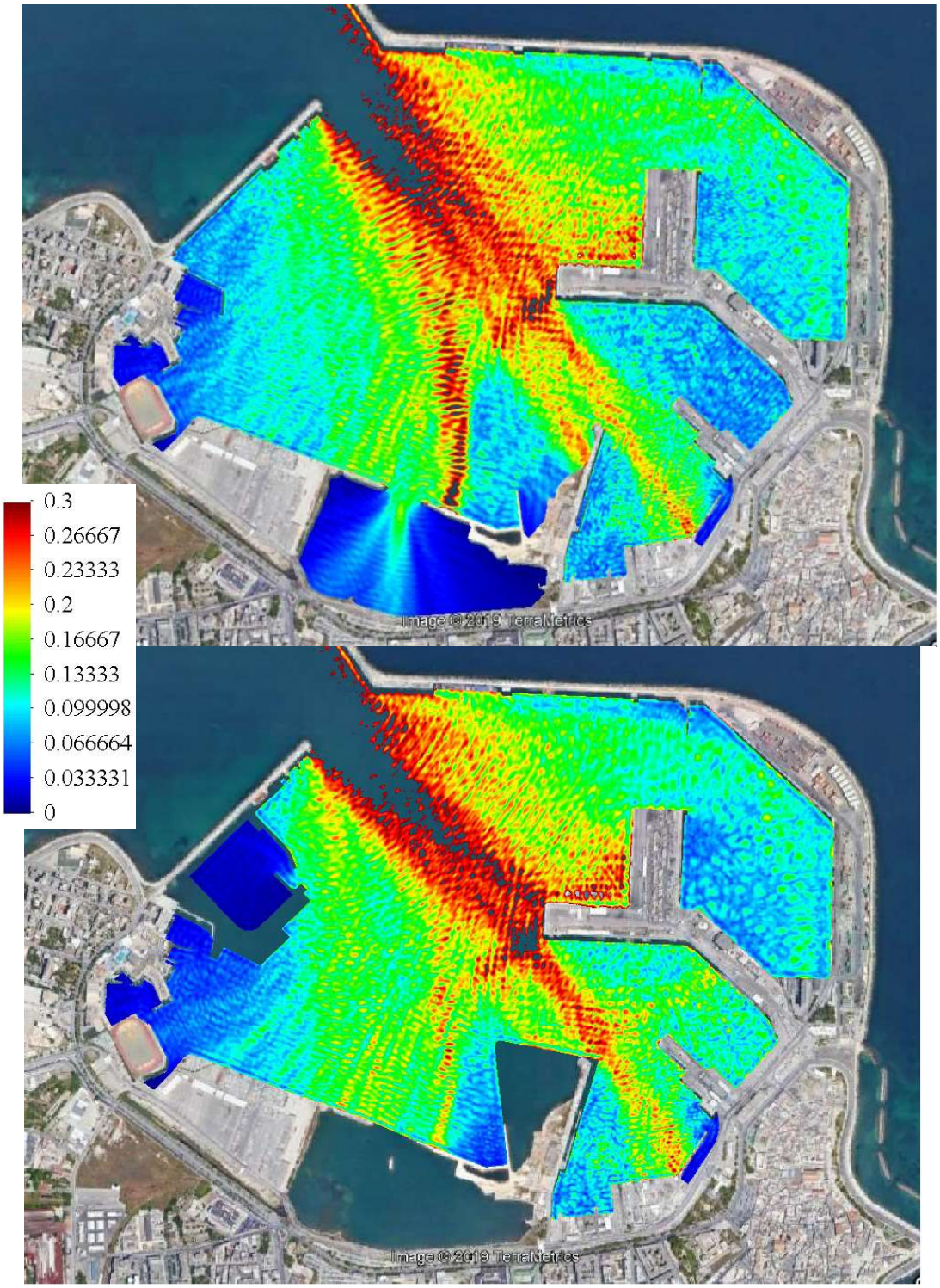


Figura 12. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

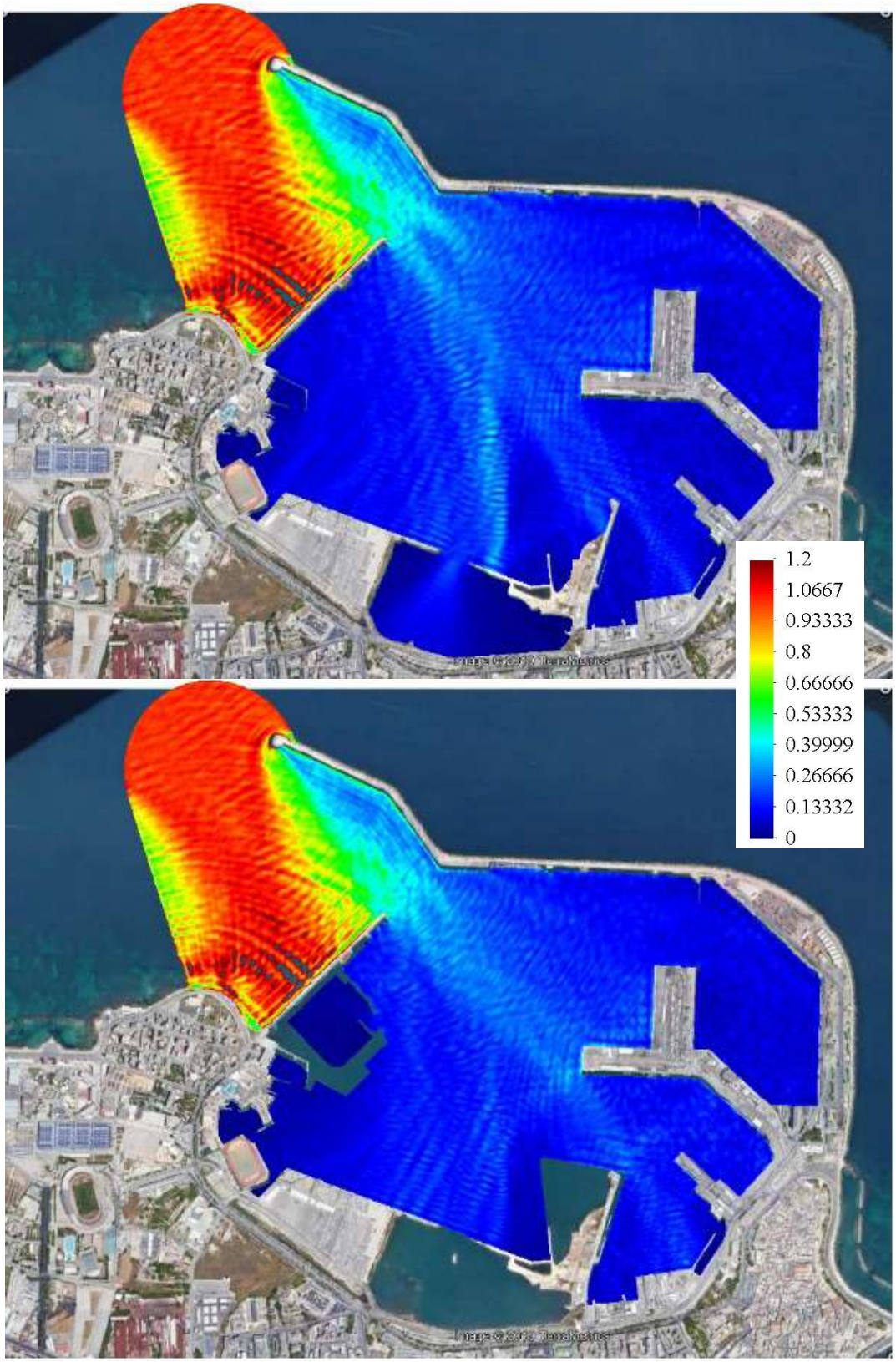


Figura 13. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

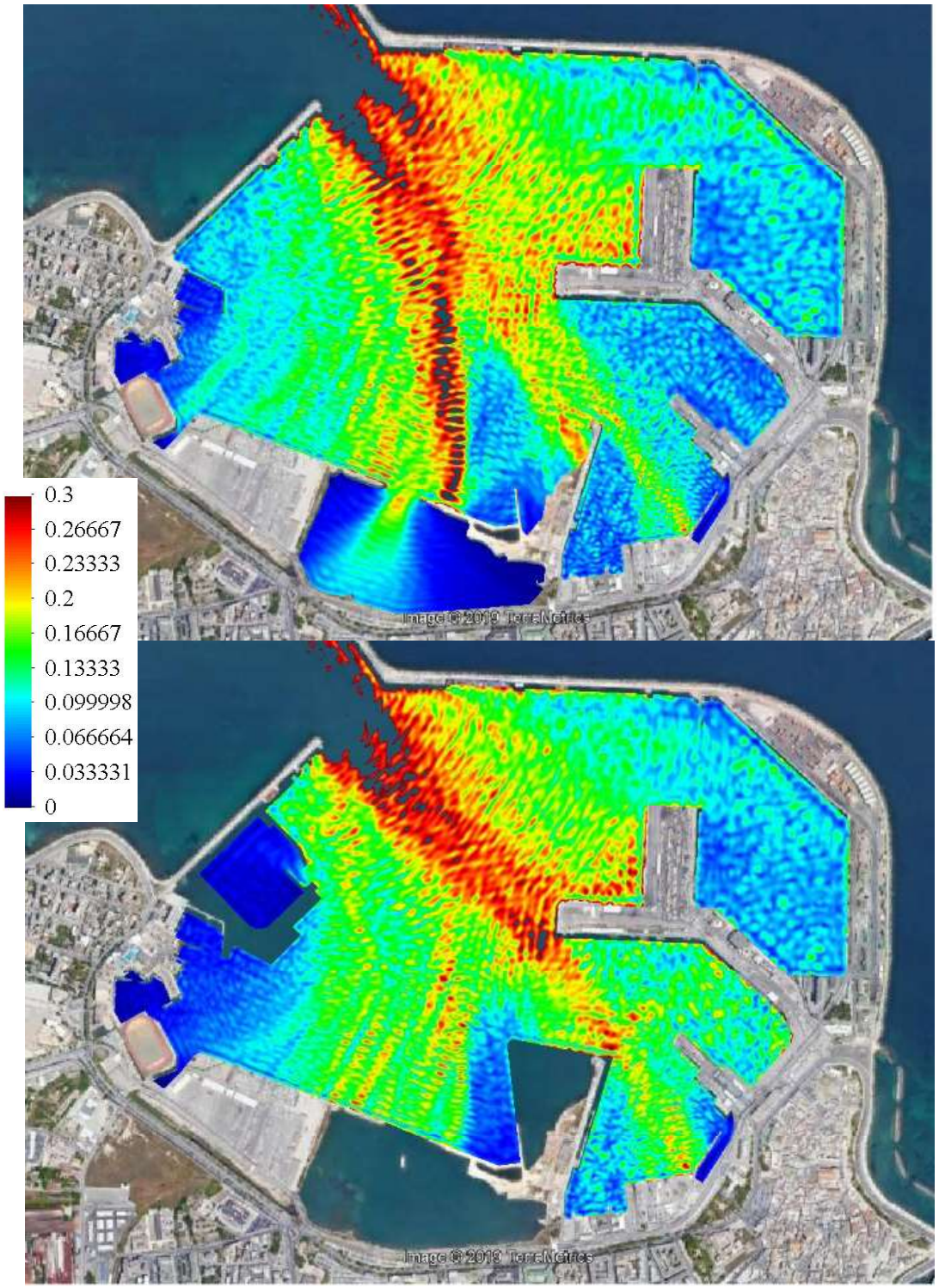


Figura 14. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

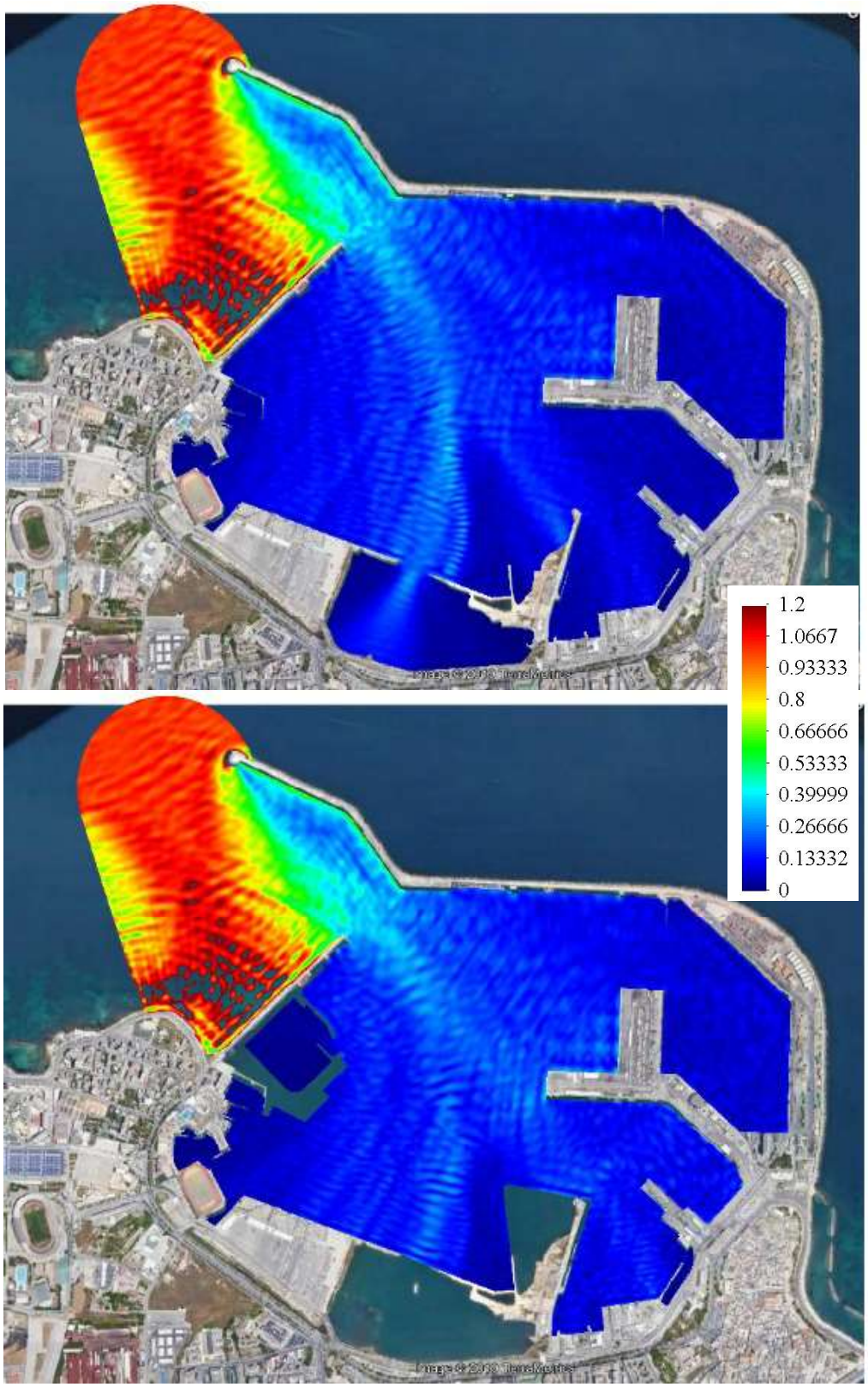


Figura 15. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

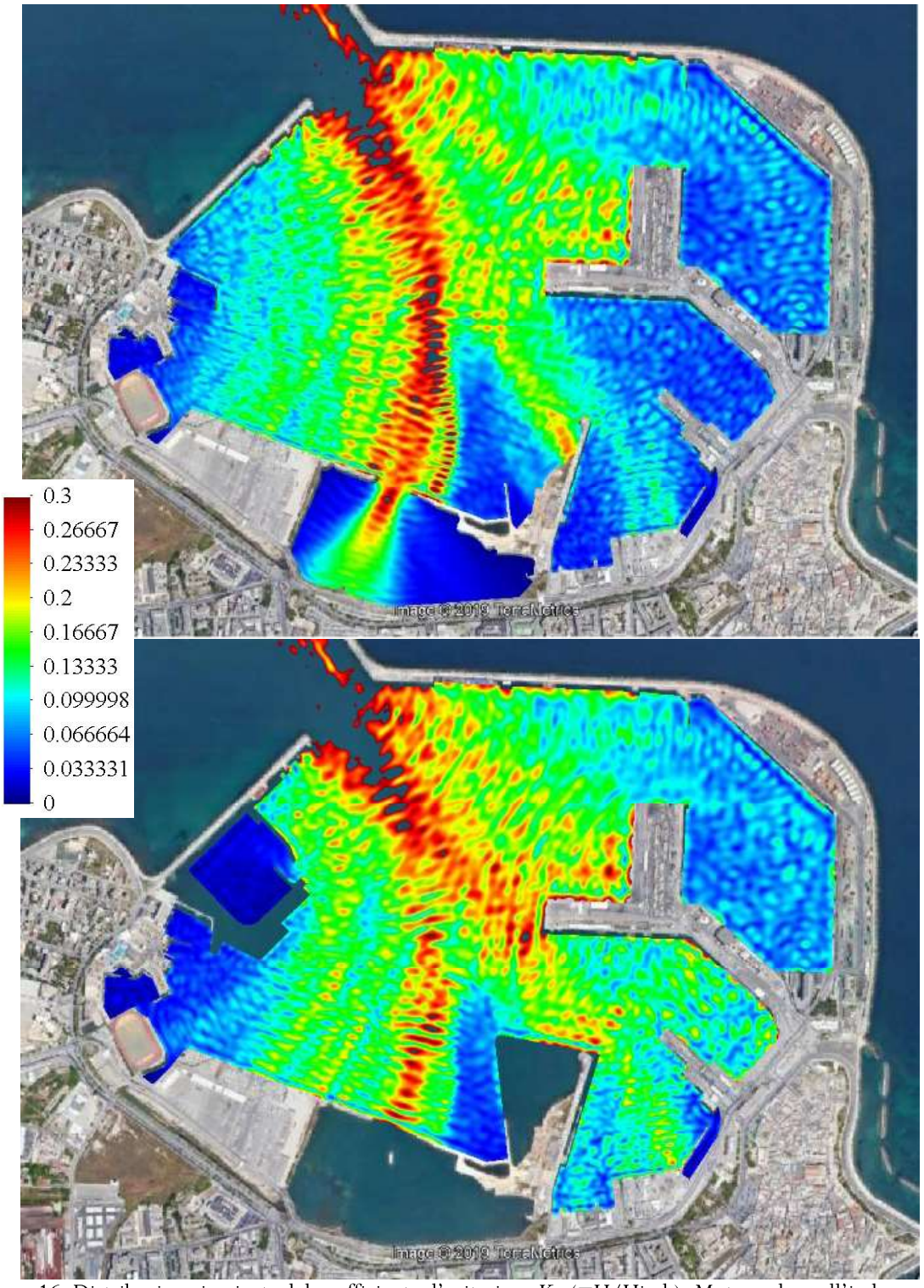


Figura 16. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

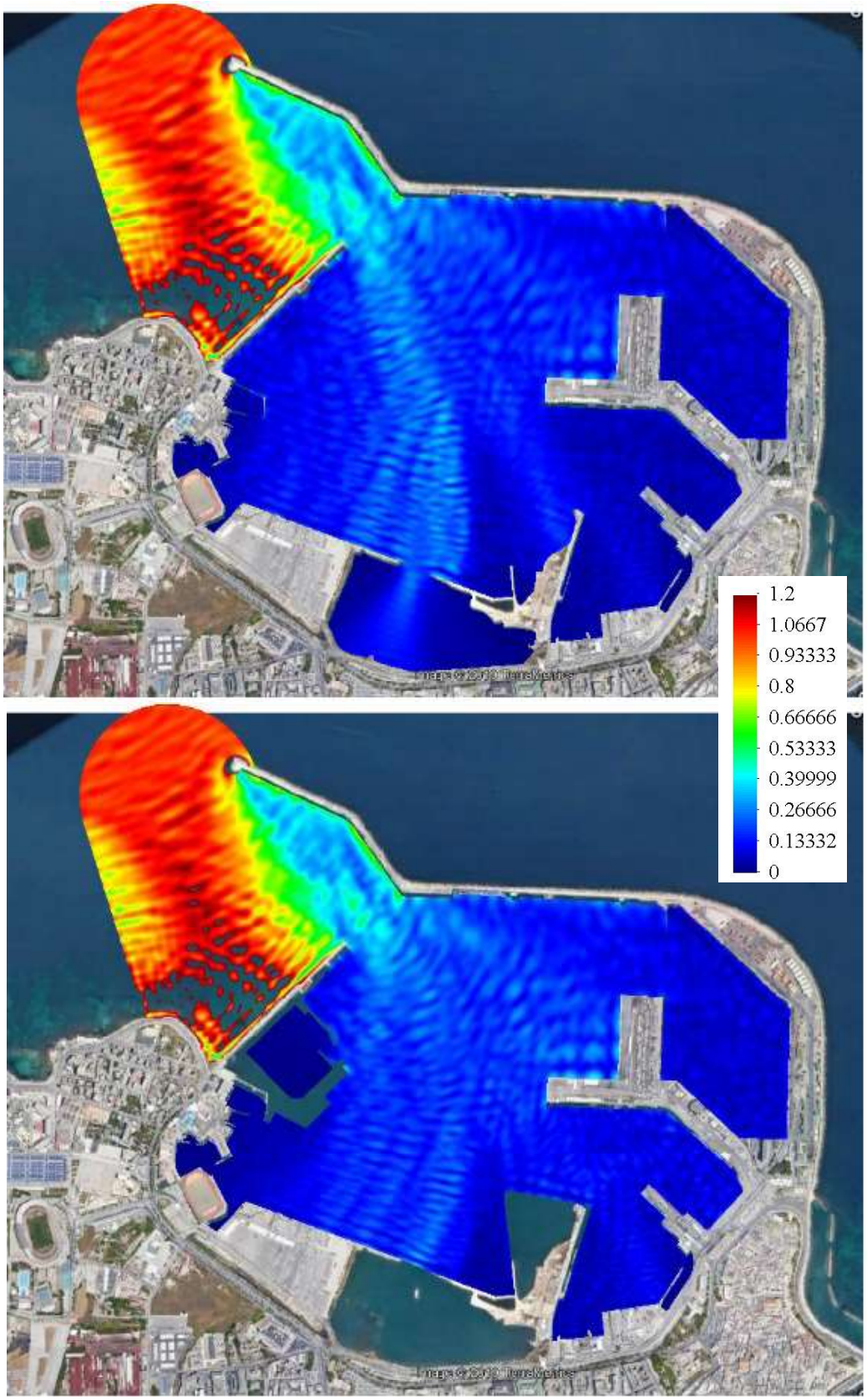


Figura 17. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

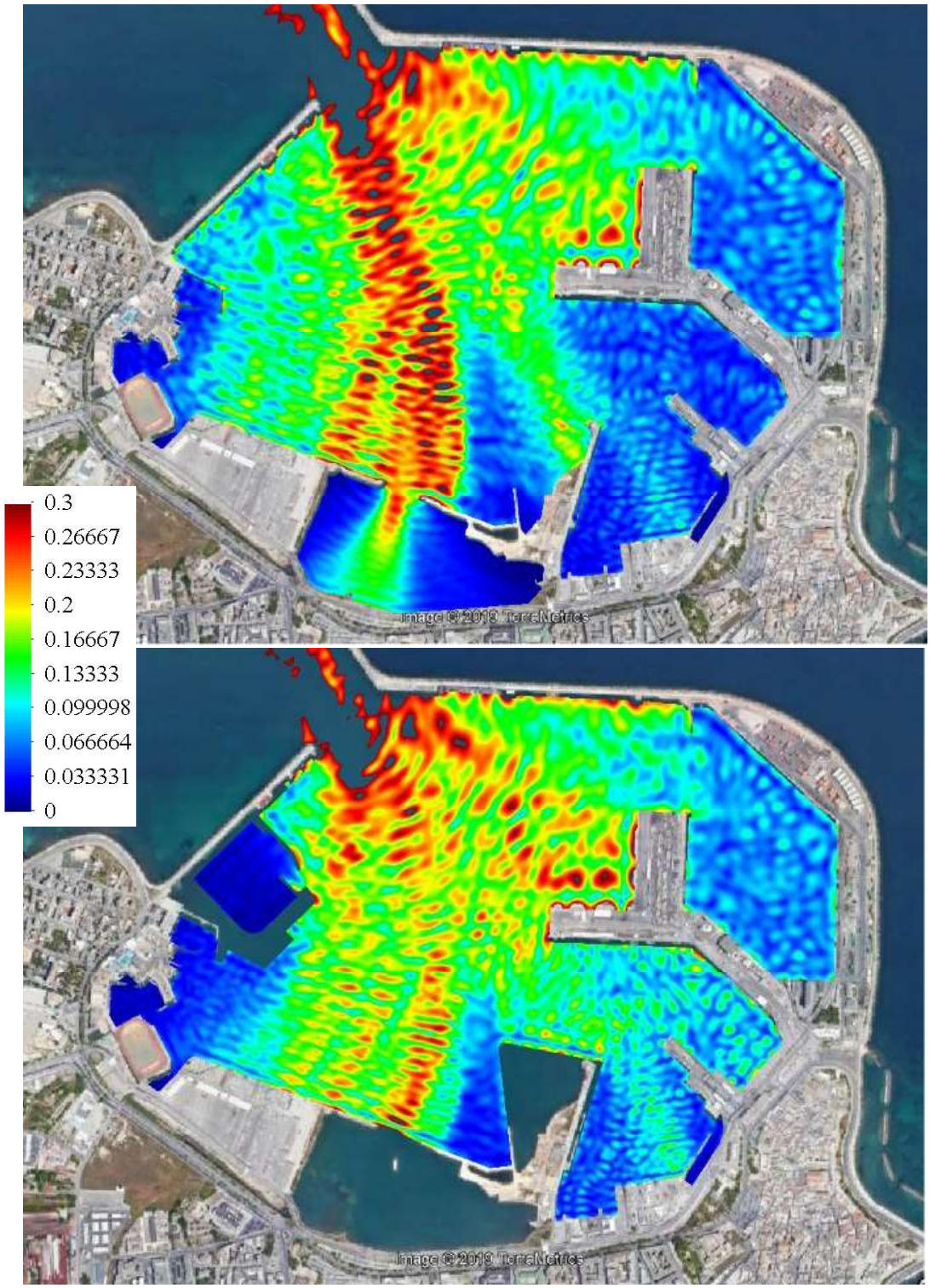


Figura 18. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =330°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

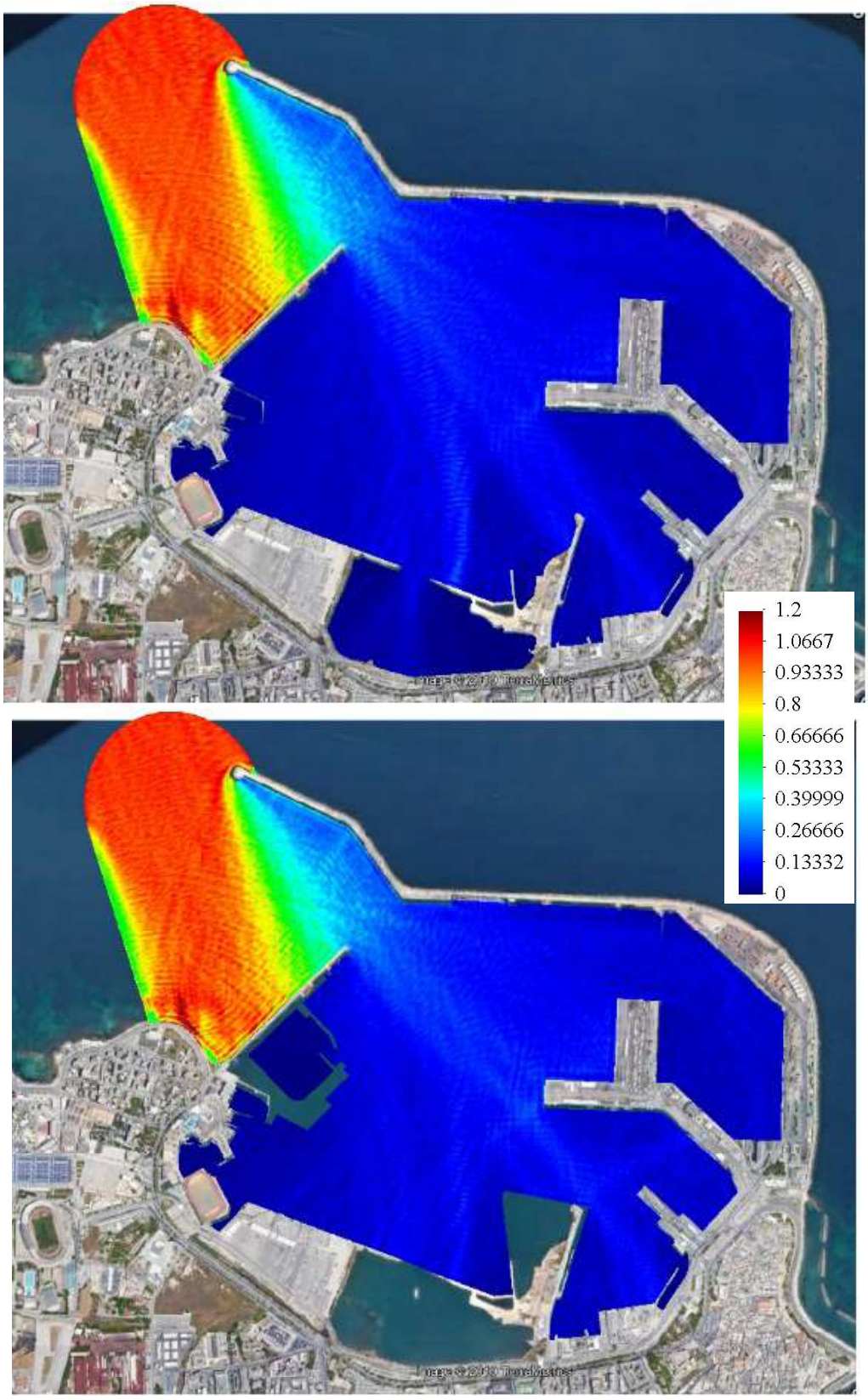


Figura 19. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

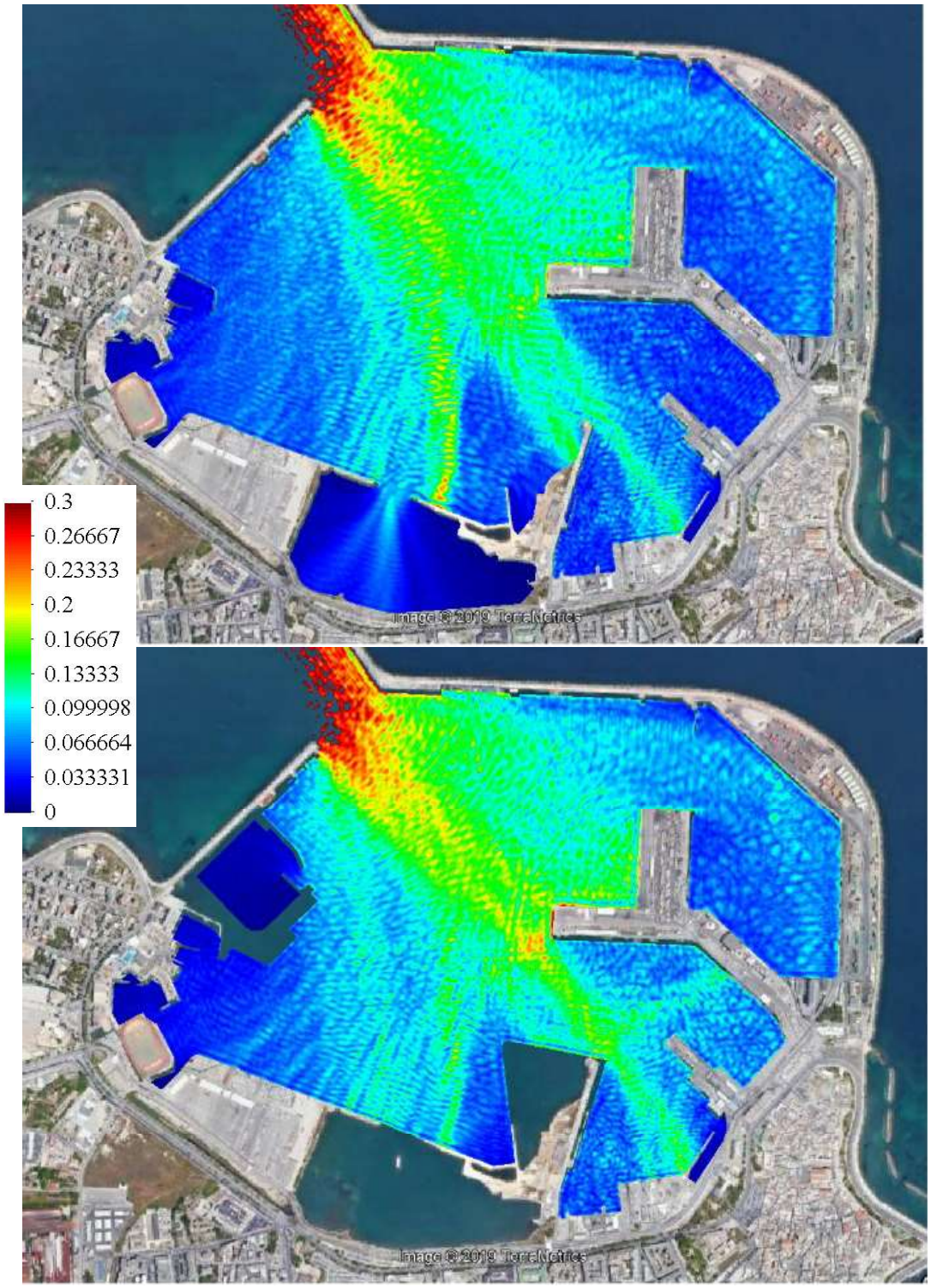


Figura 20. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

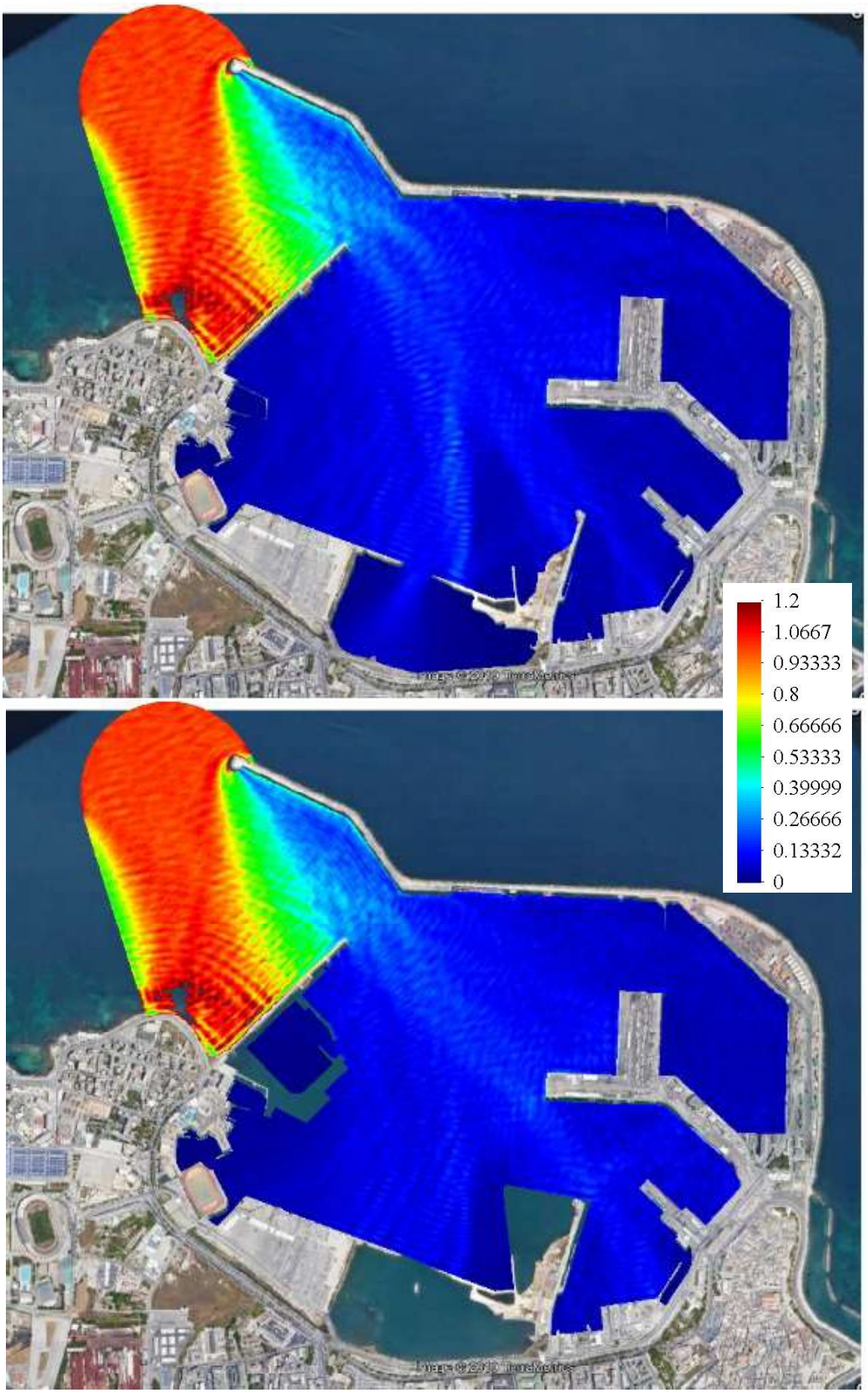


Figura 21. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

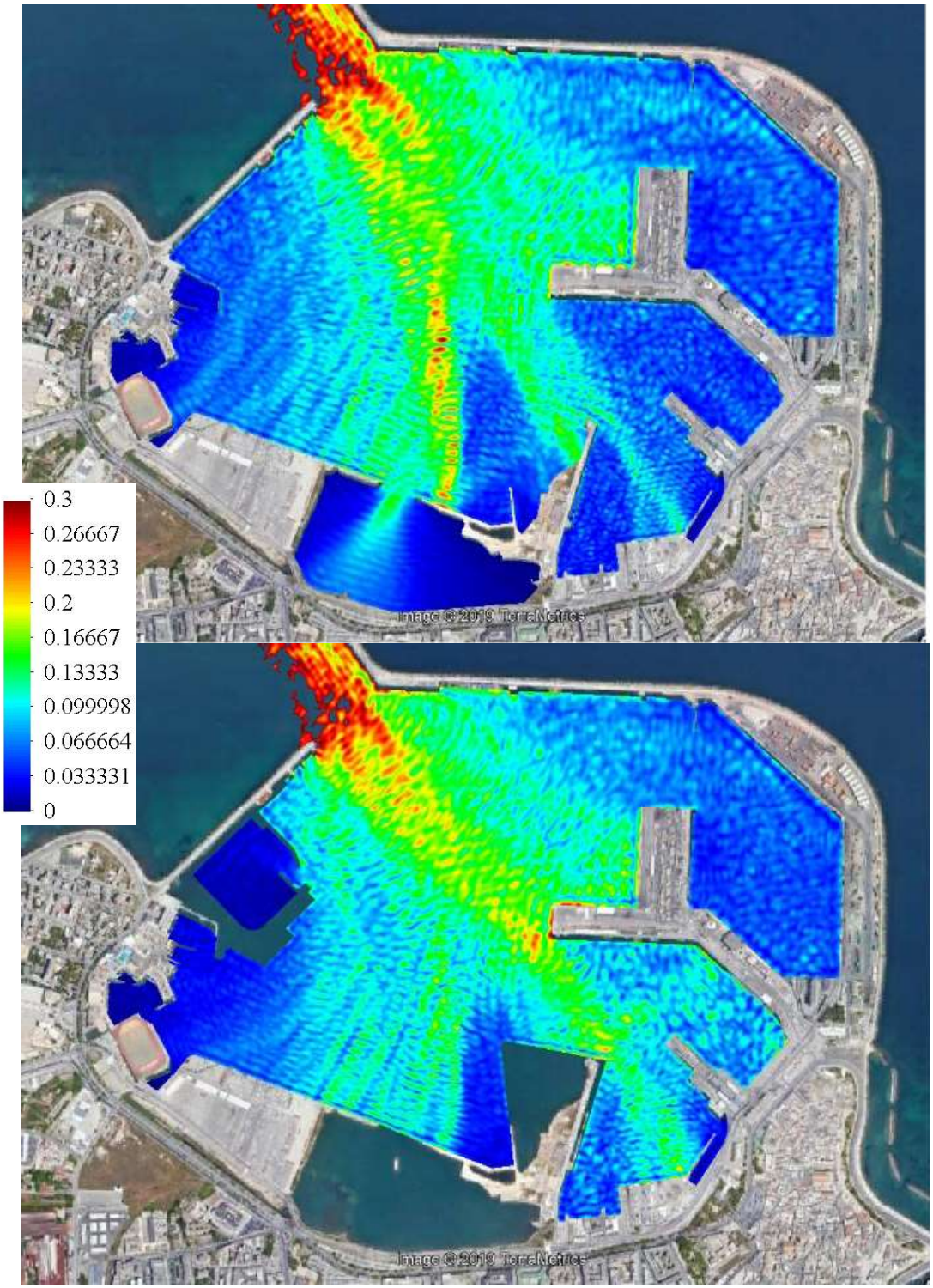


Figura 22. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

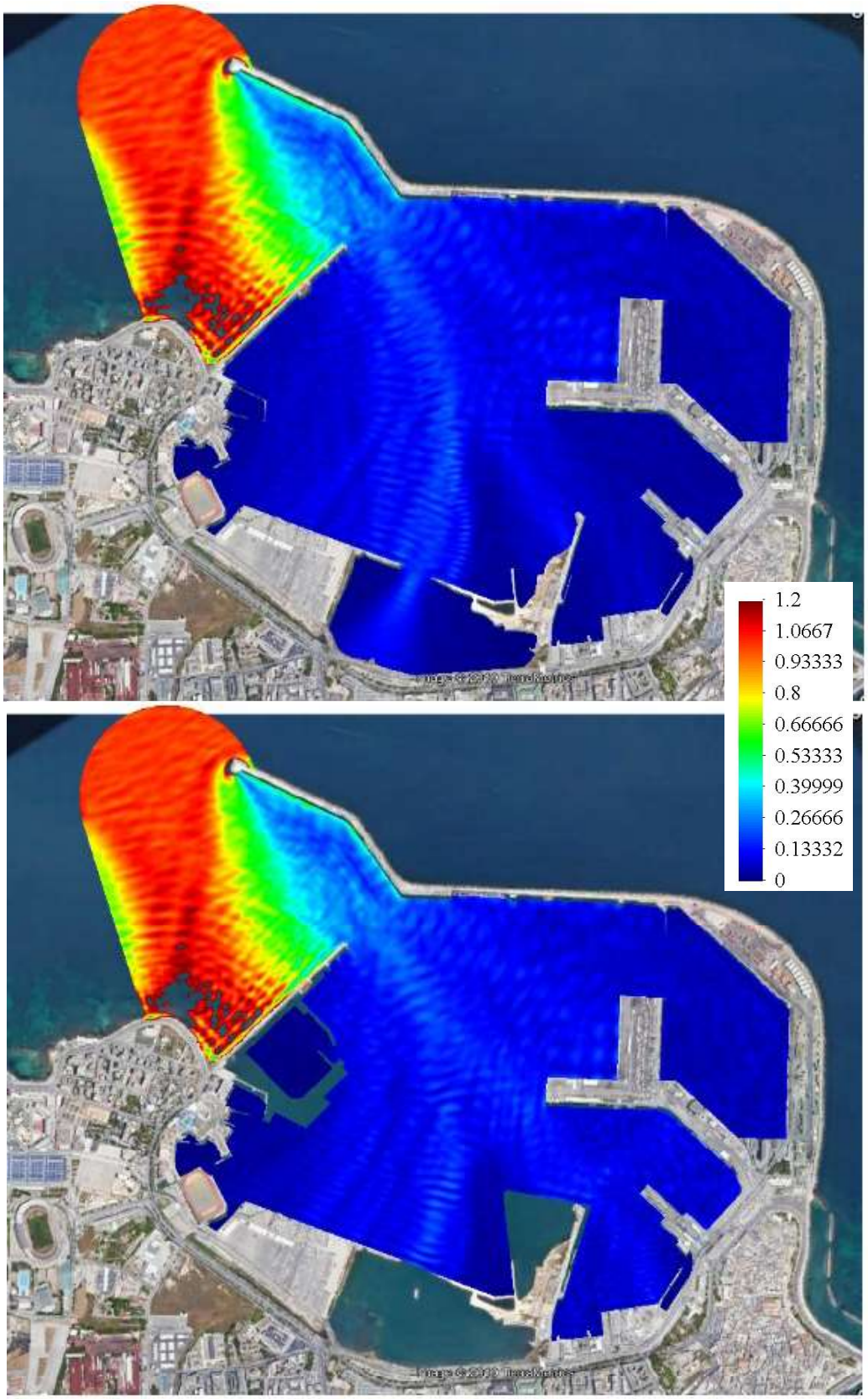


Figura 23. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

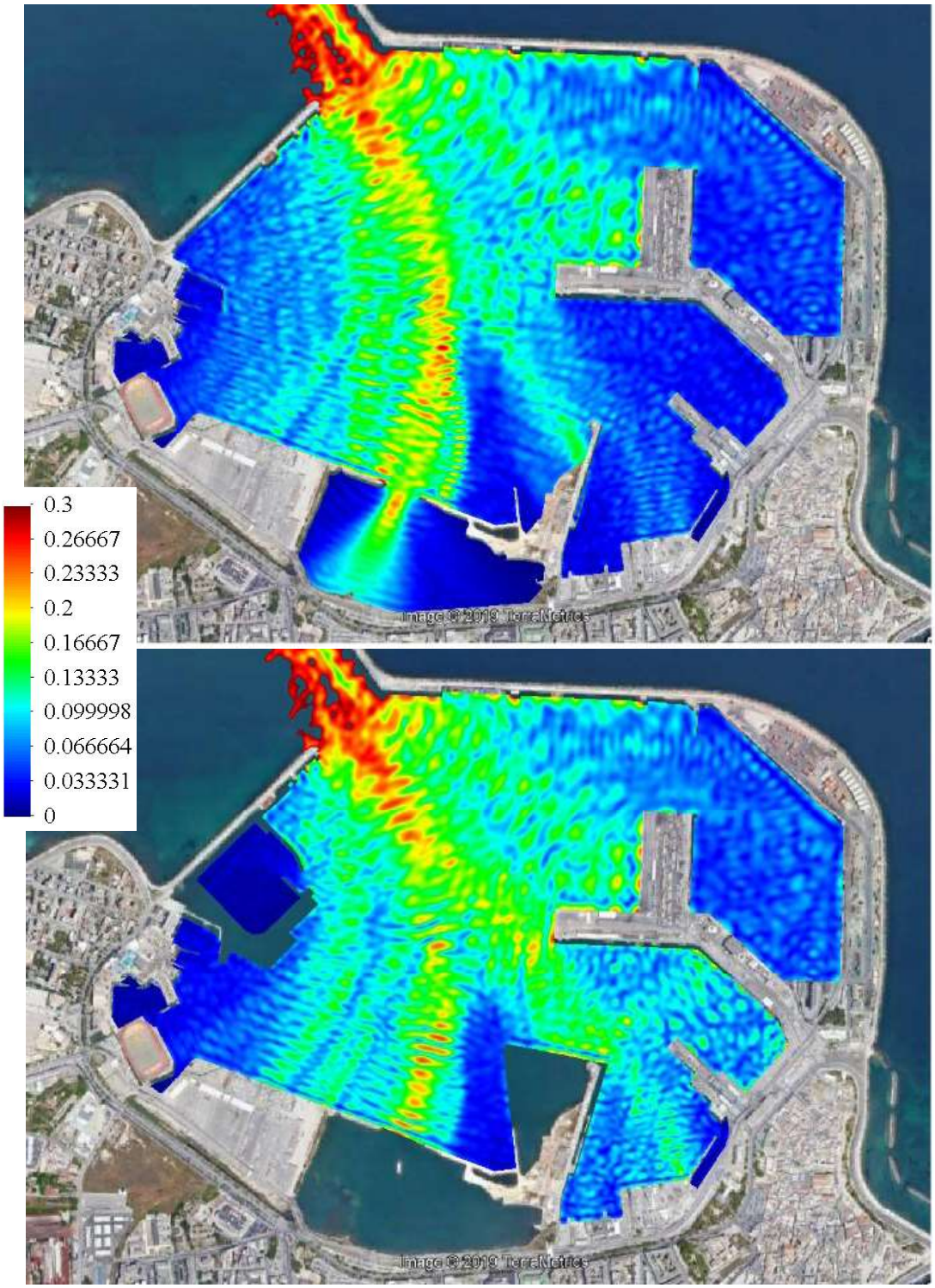


Figura 24. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

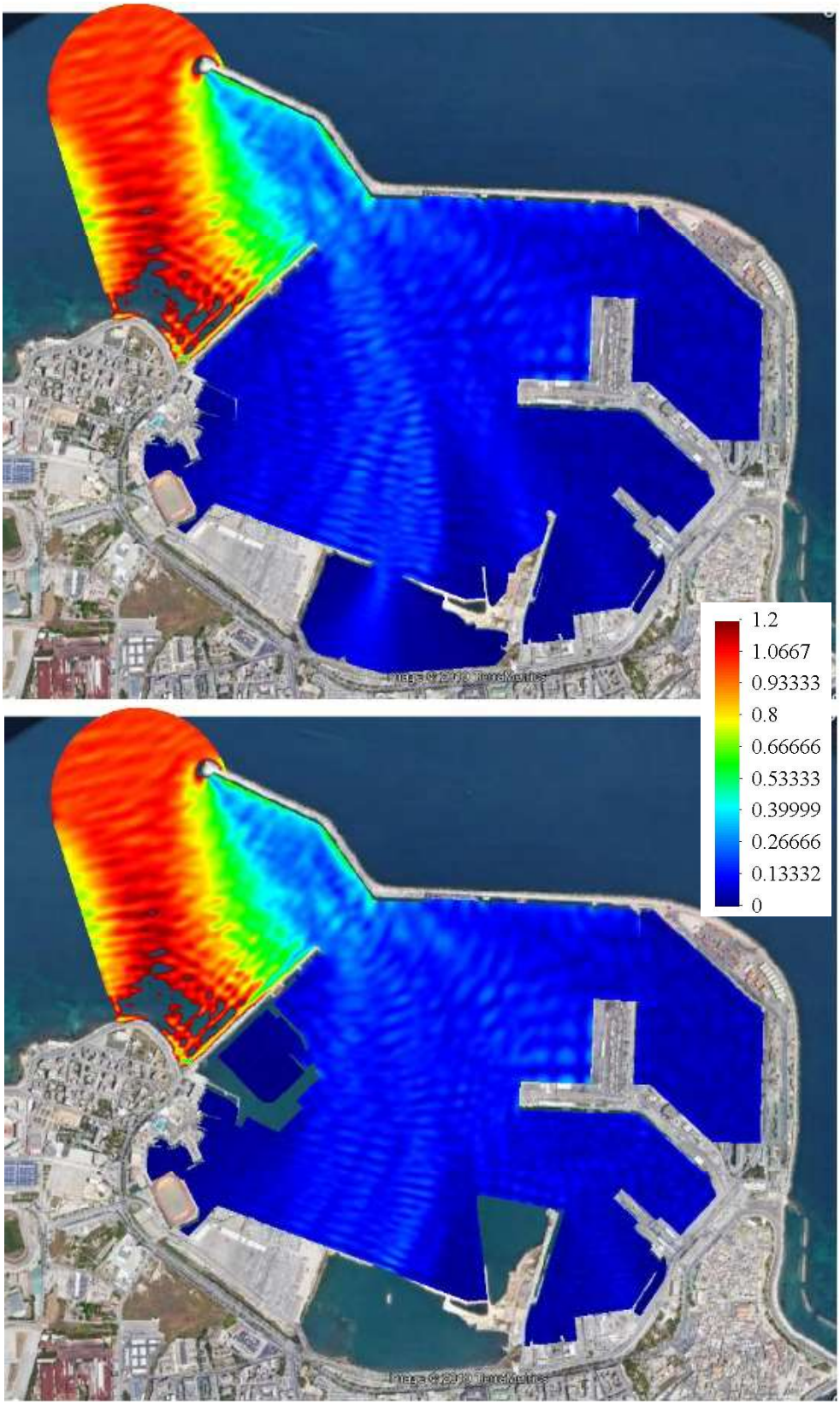


Figura 25. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

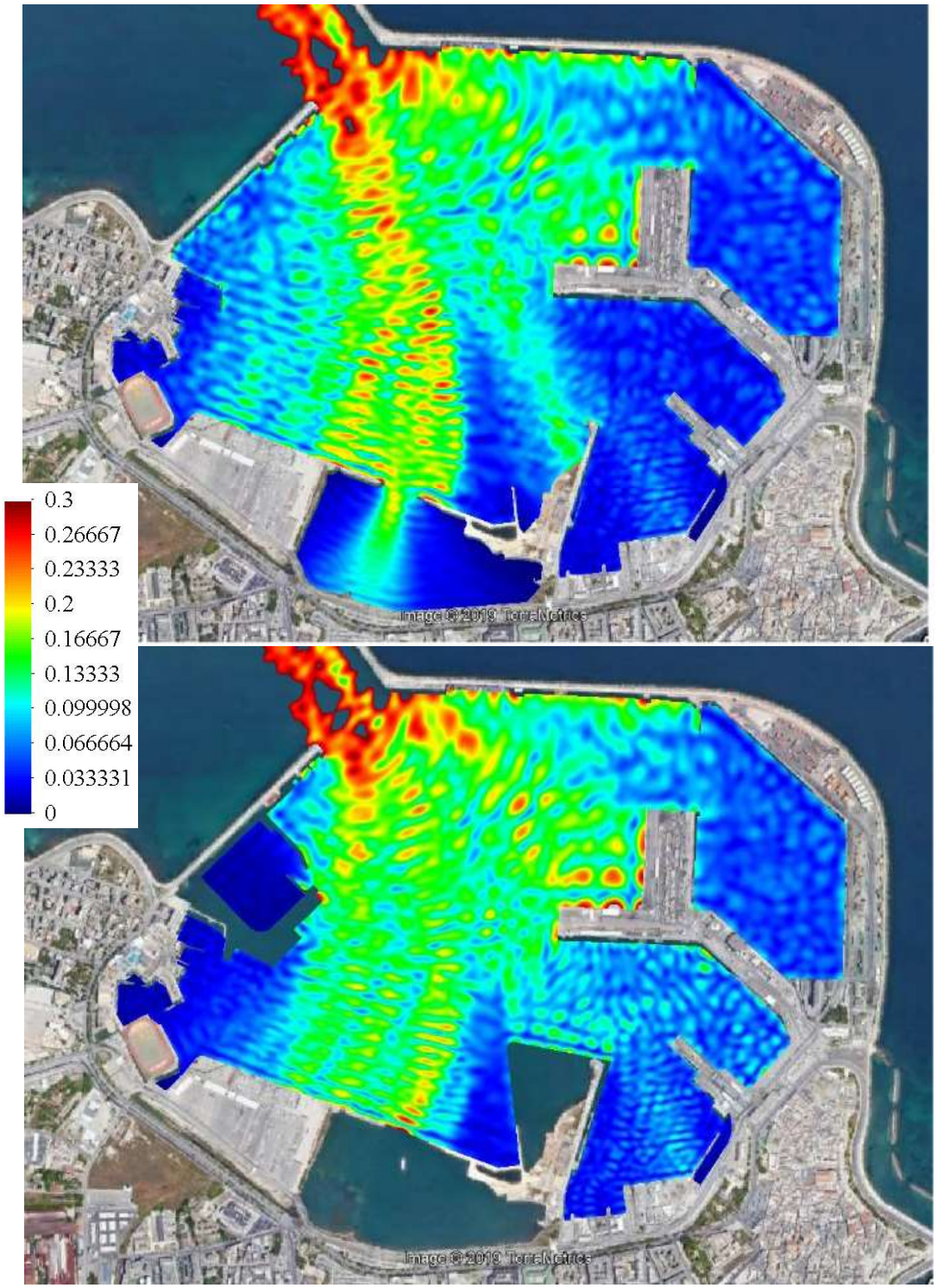


Figura 26. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =340°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

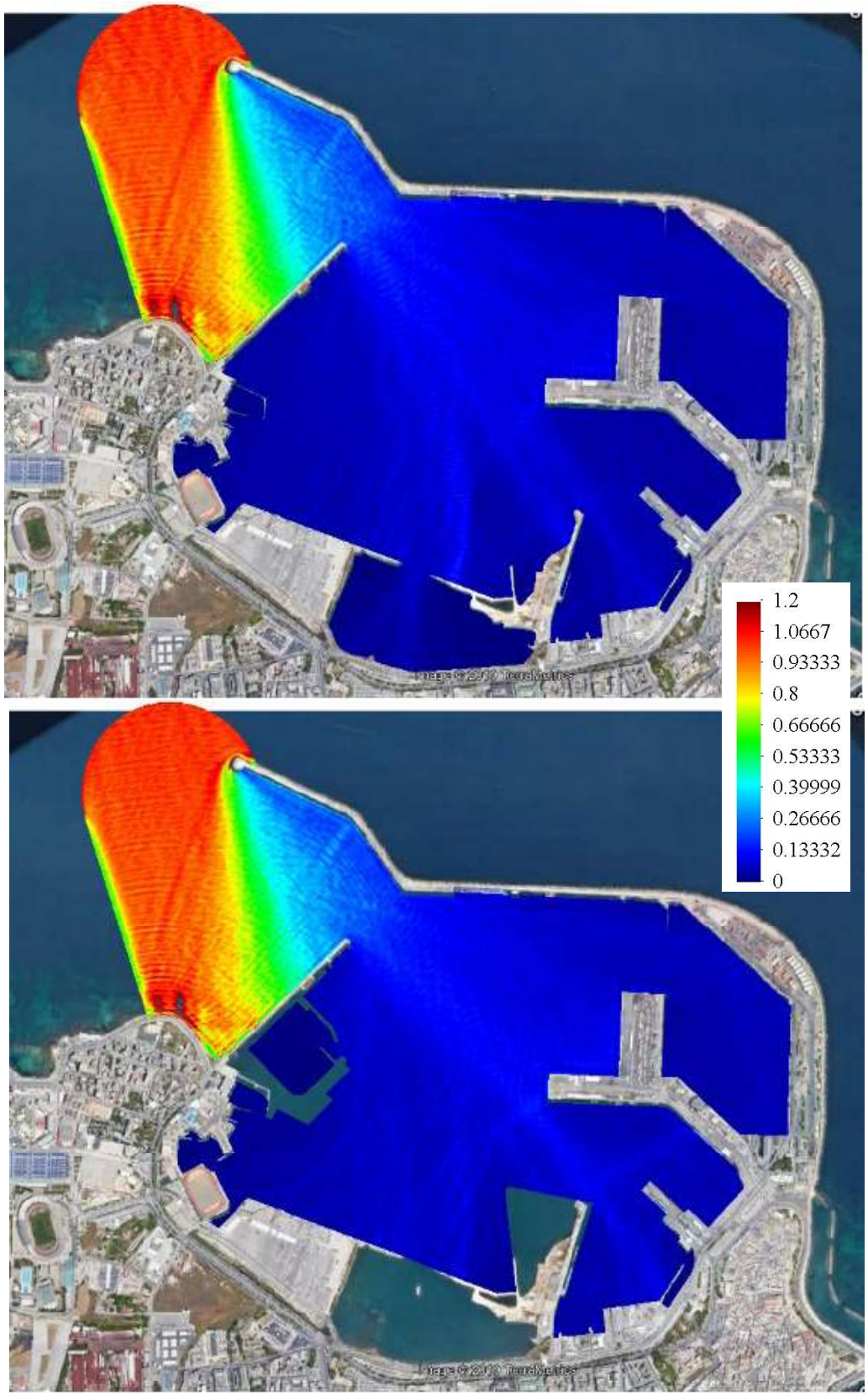


Figura 27. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

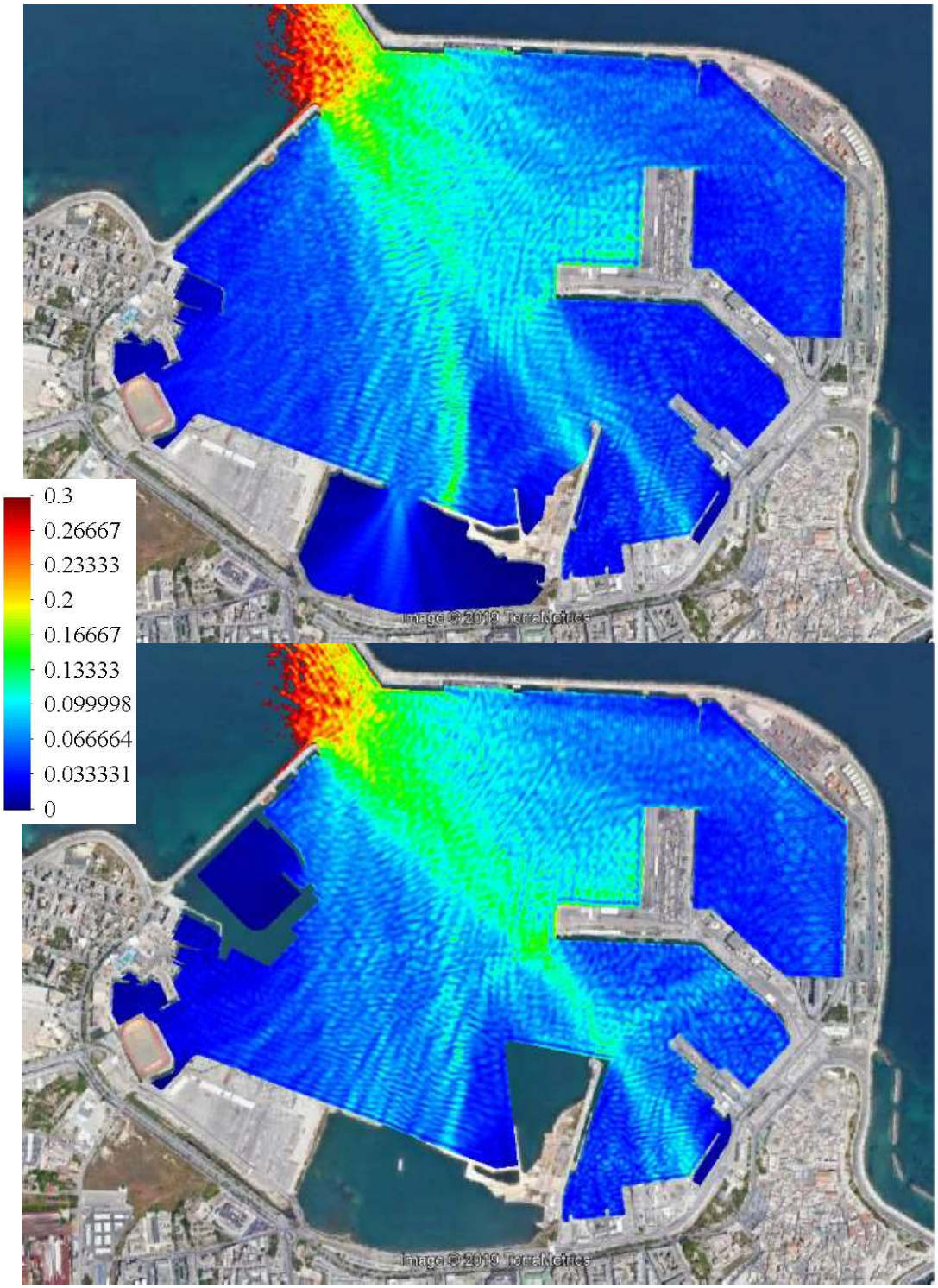


Figura 28. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

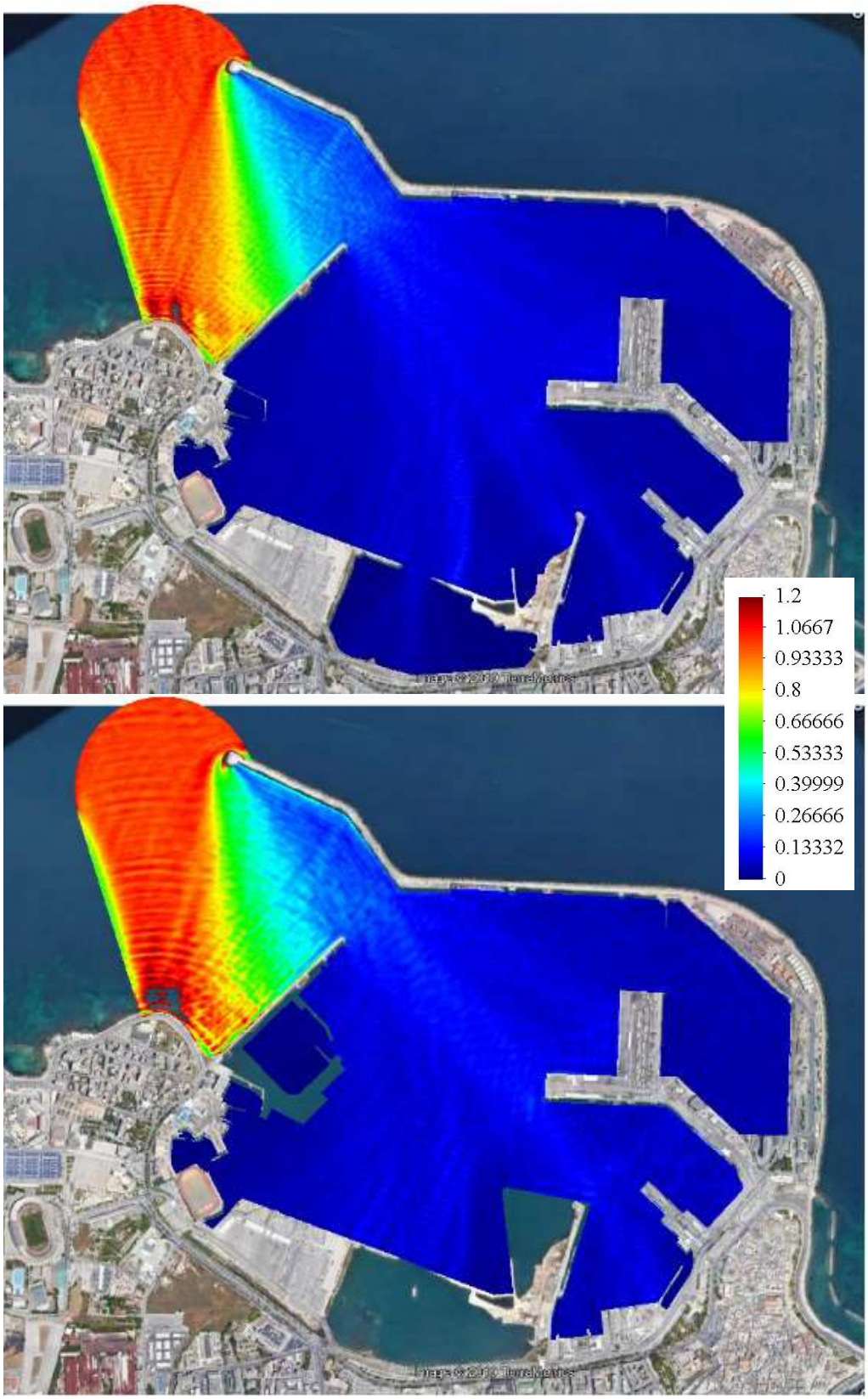


Figura 29. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

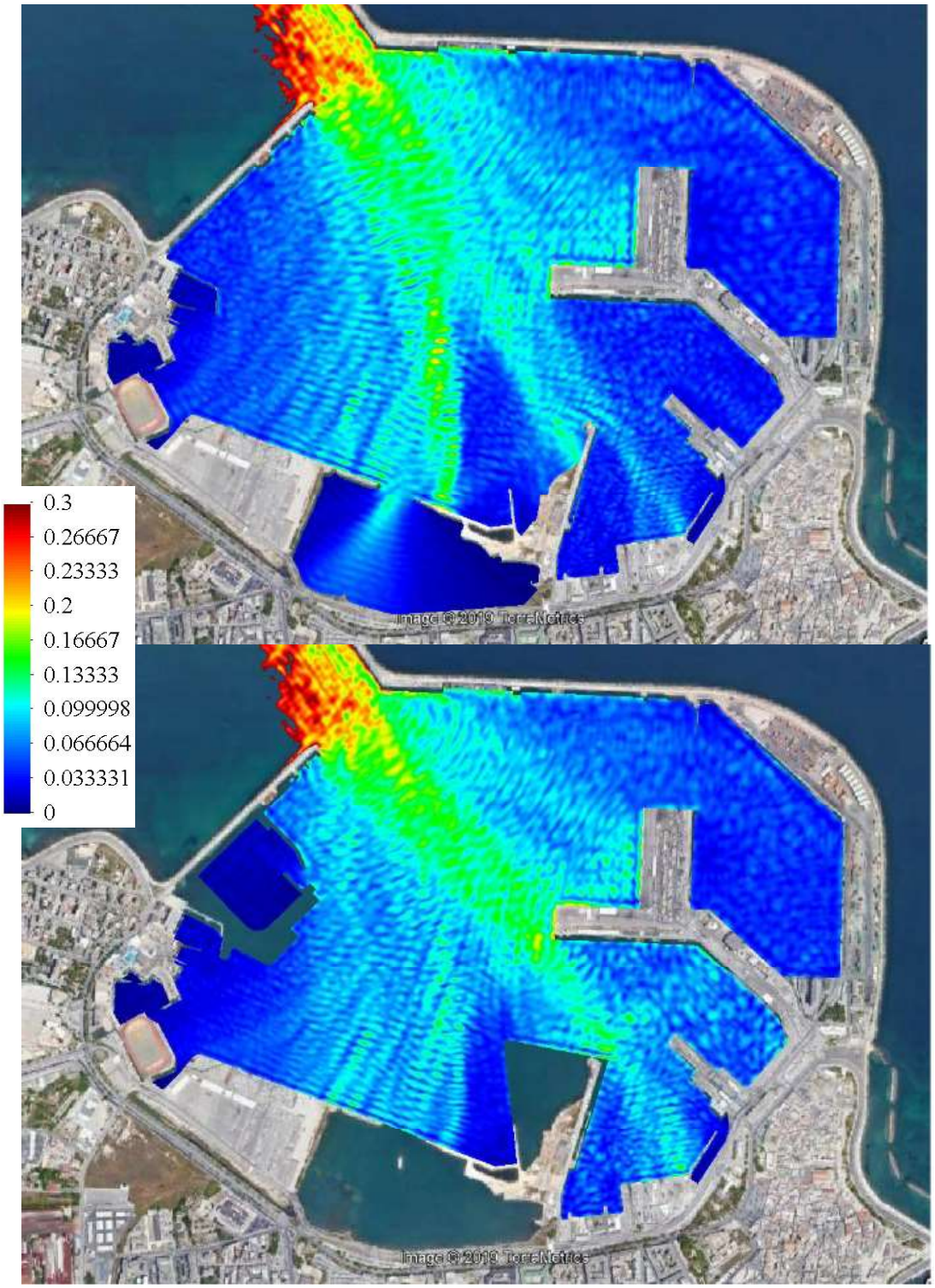


Figura 30. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

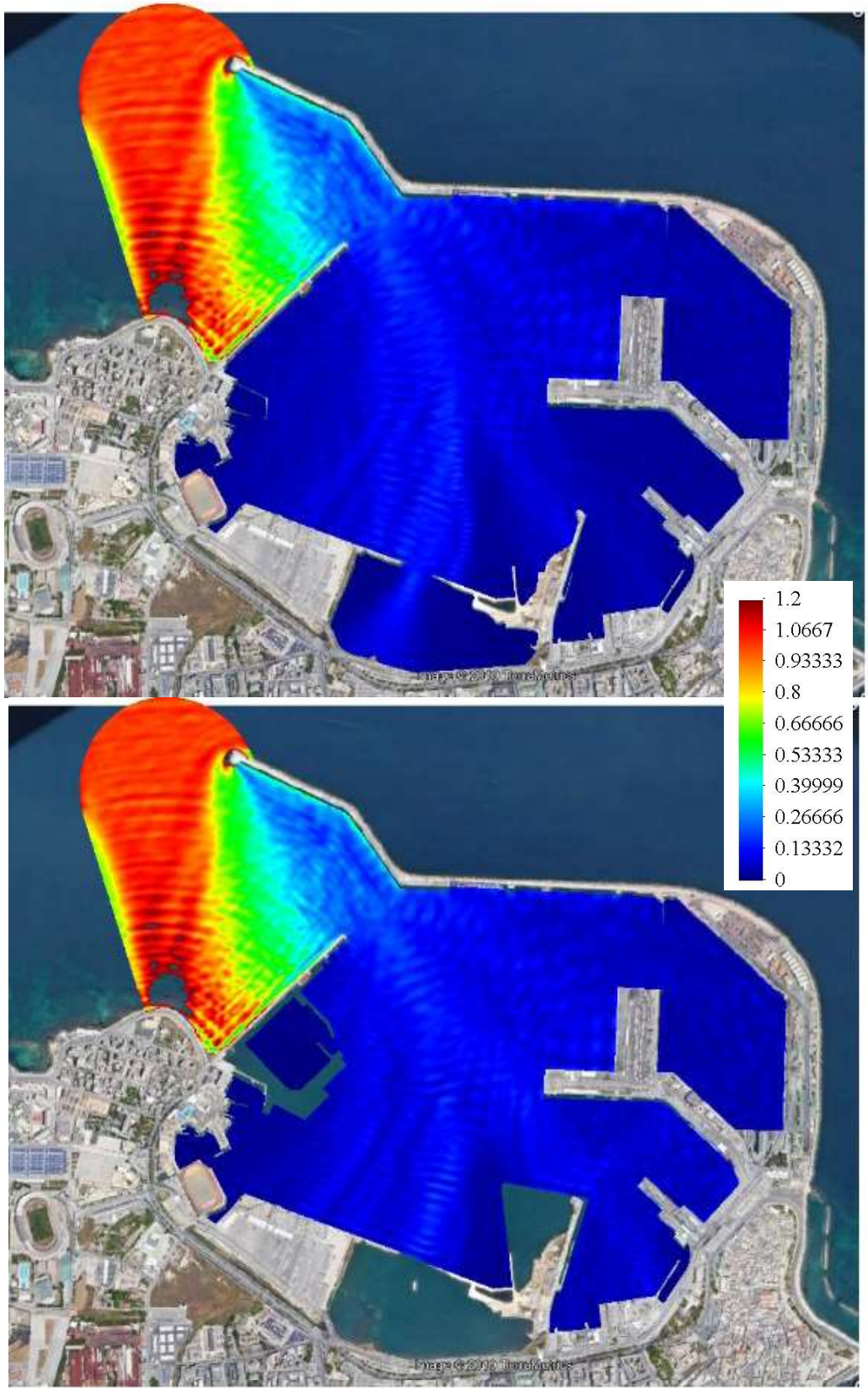


Figura 31. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

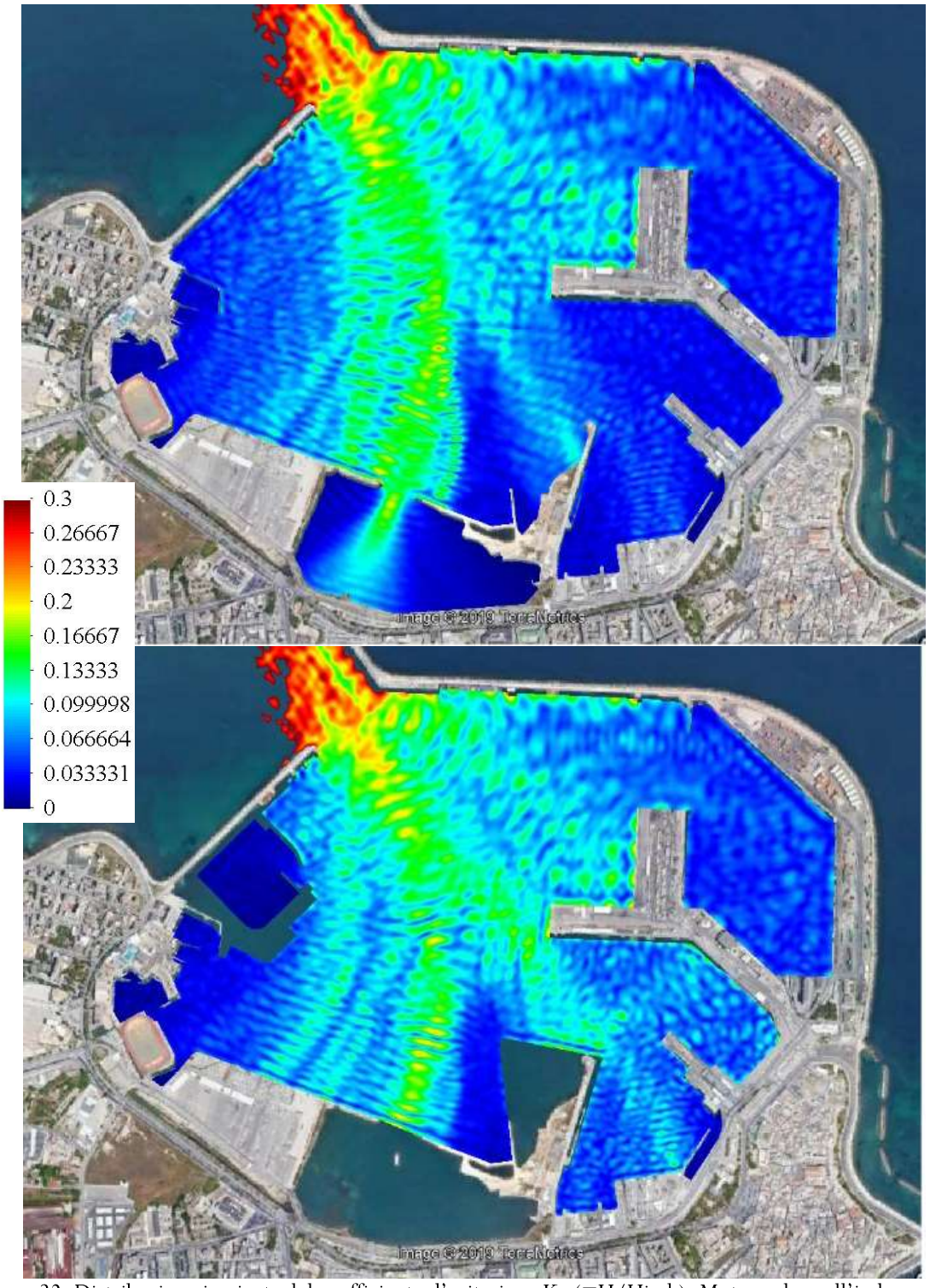


Figura 32. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

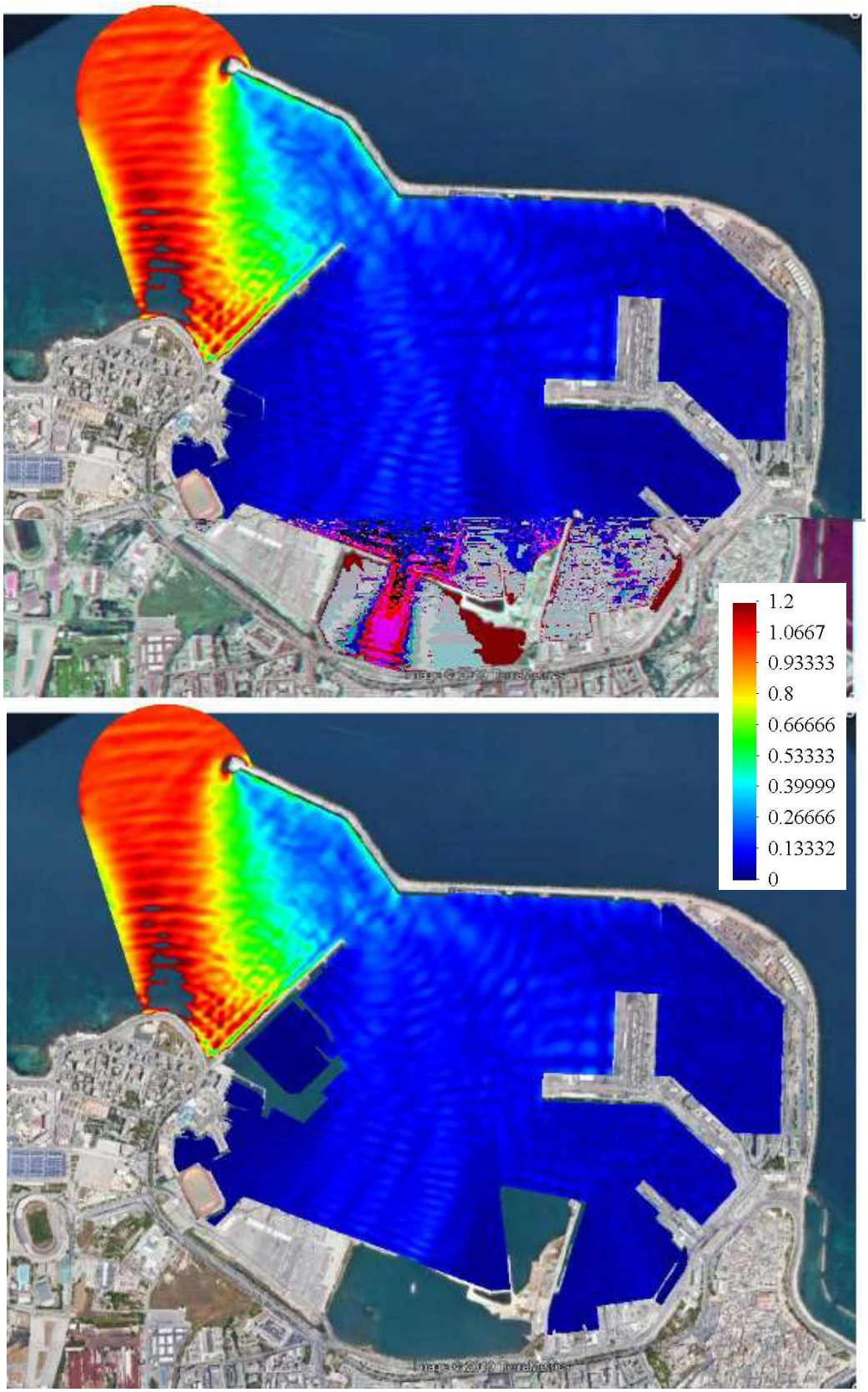


Figura 33. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

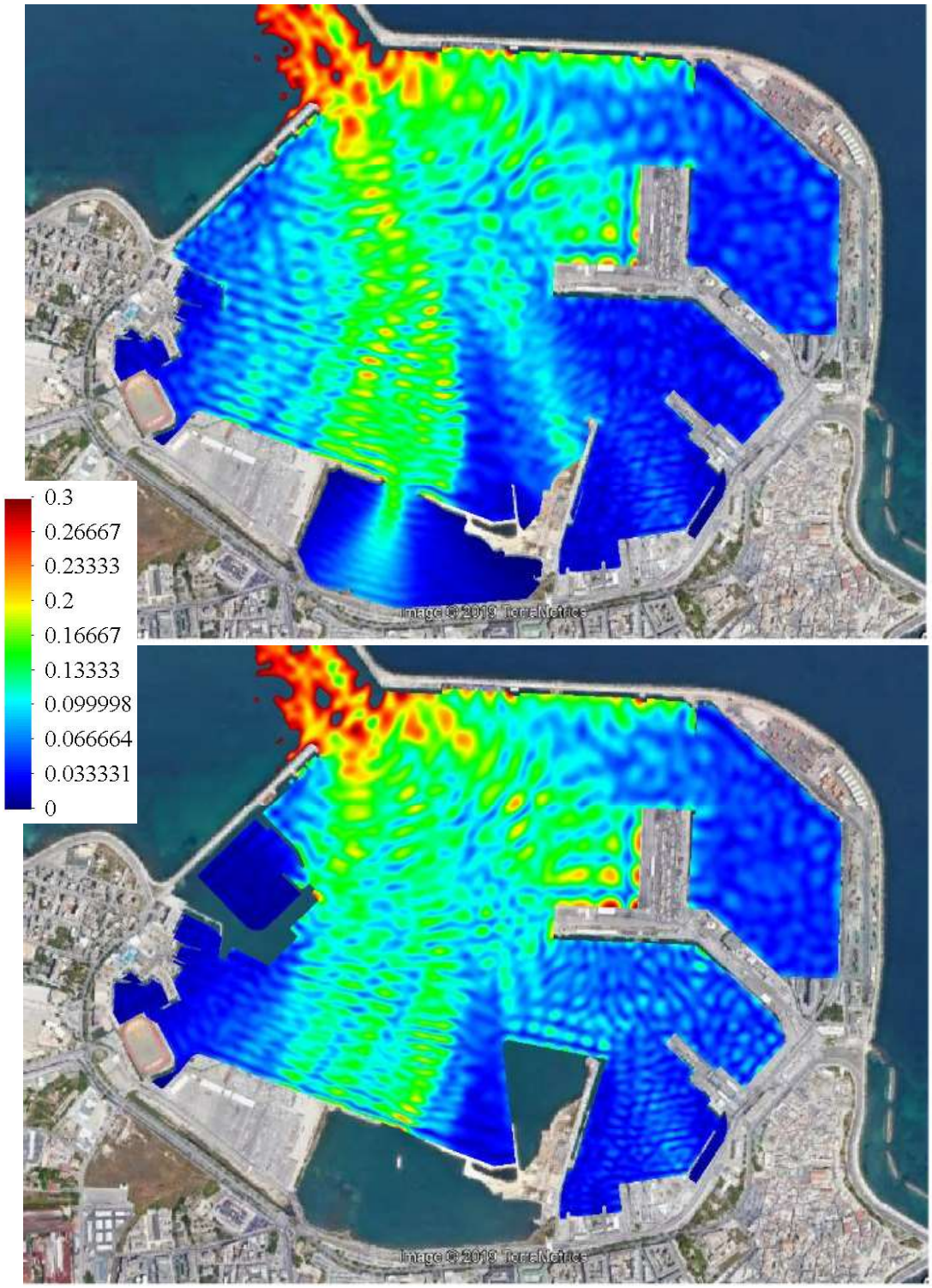


Figura 34. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =350°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

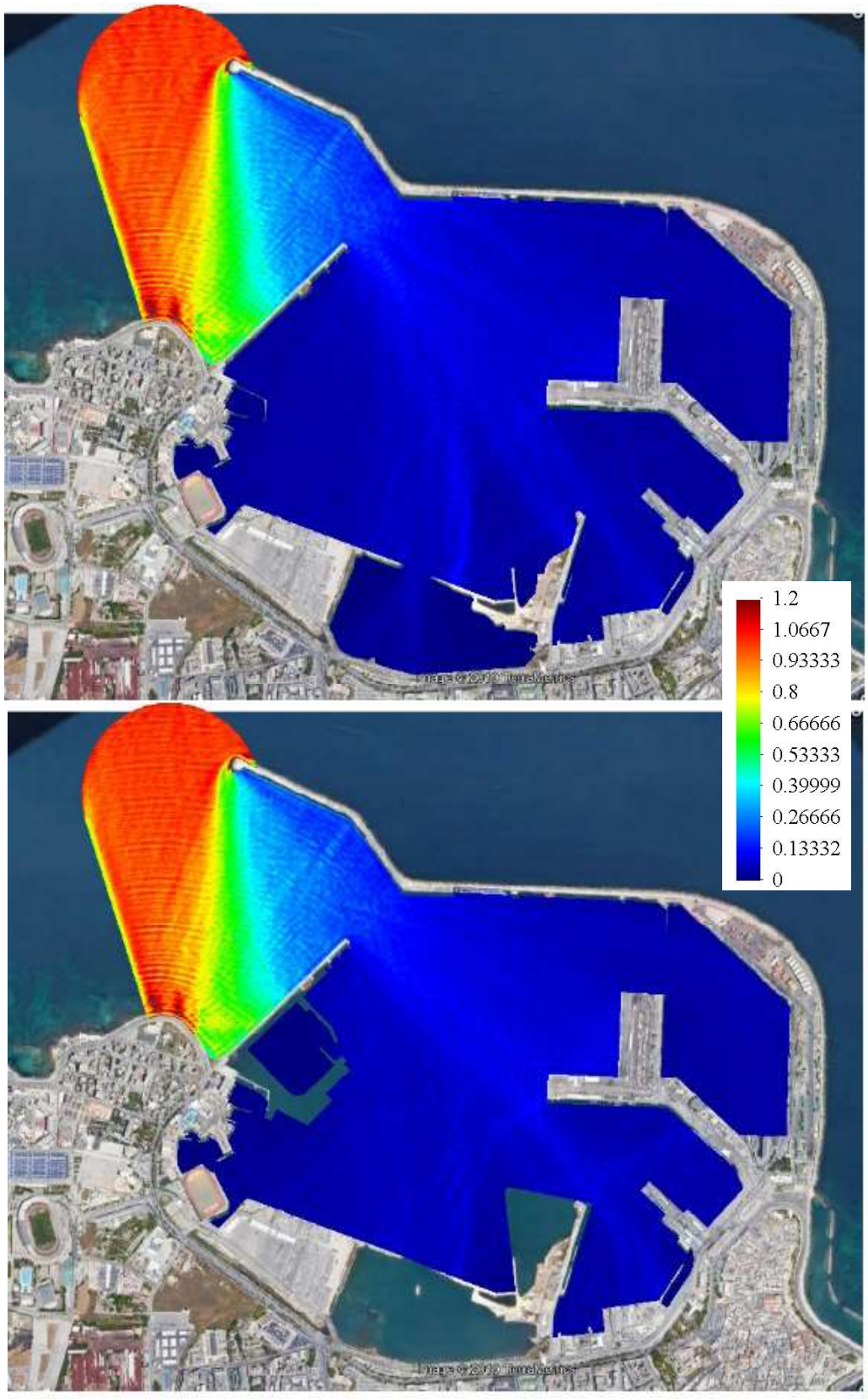


Figura 35. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

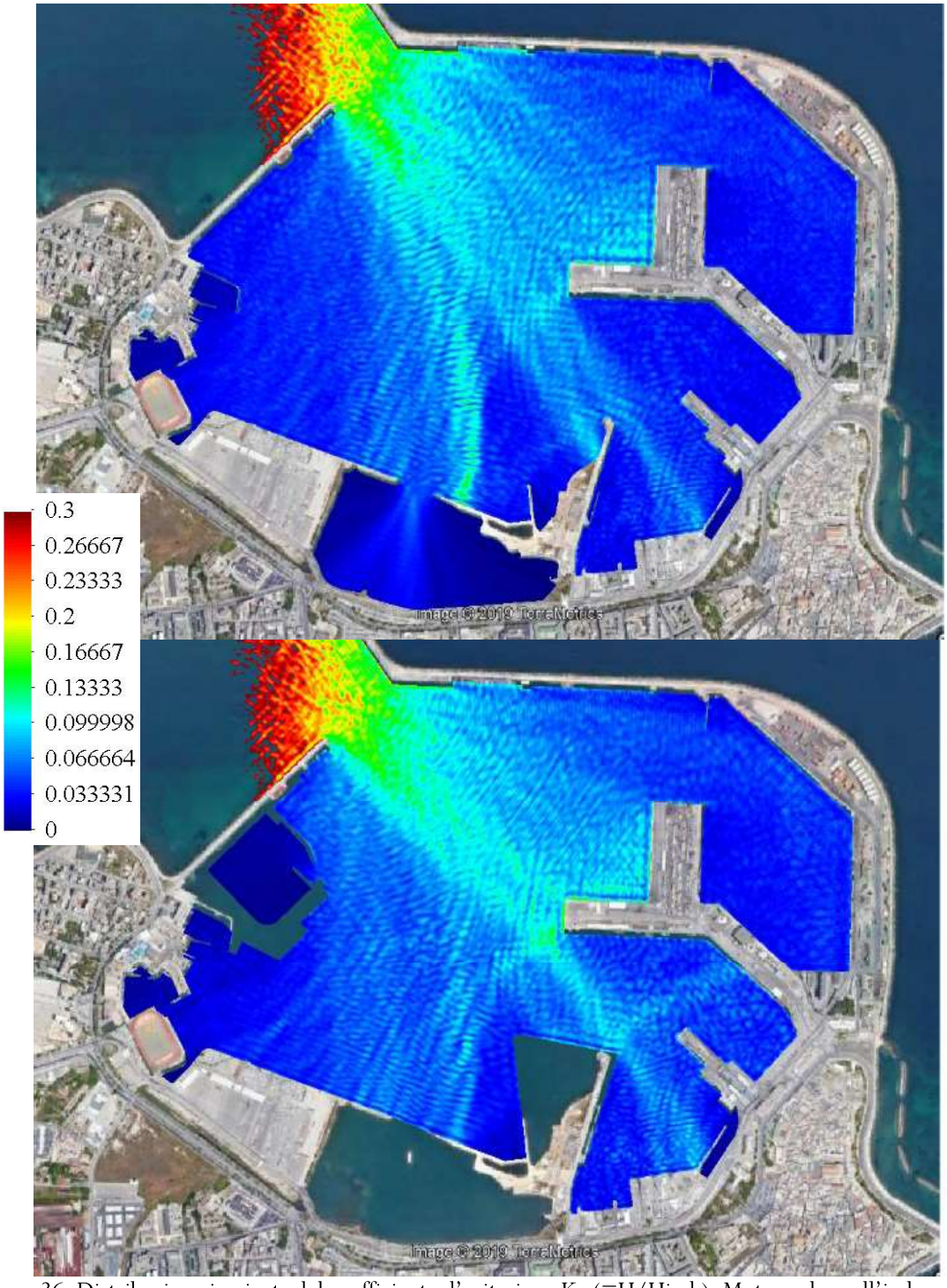


Figura 36. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

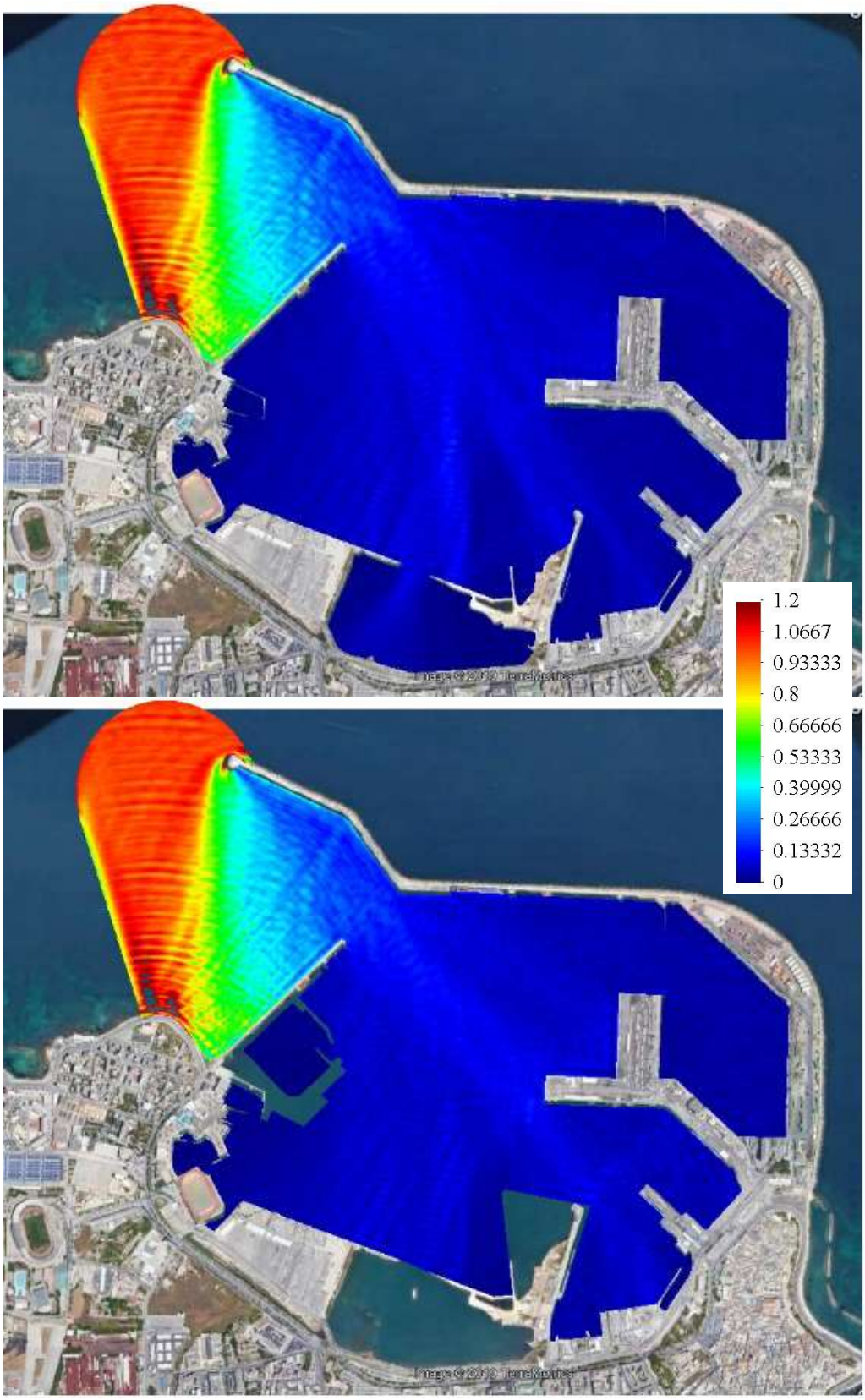


Figura 37. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

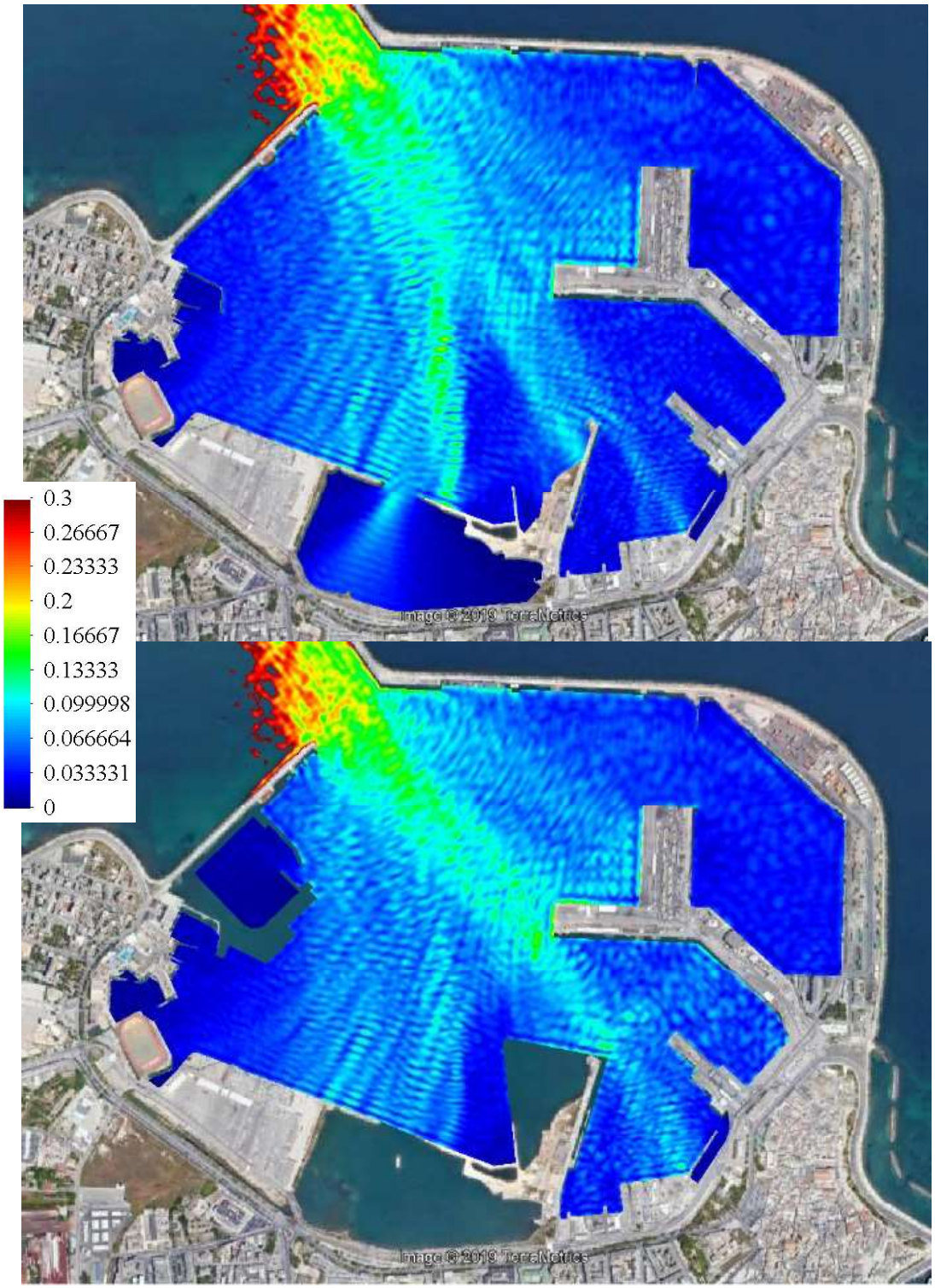


Figura 38. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

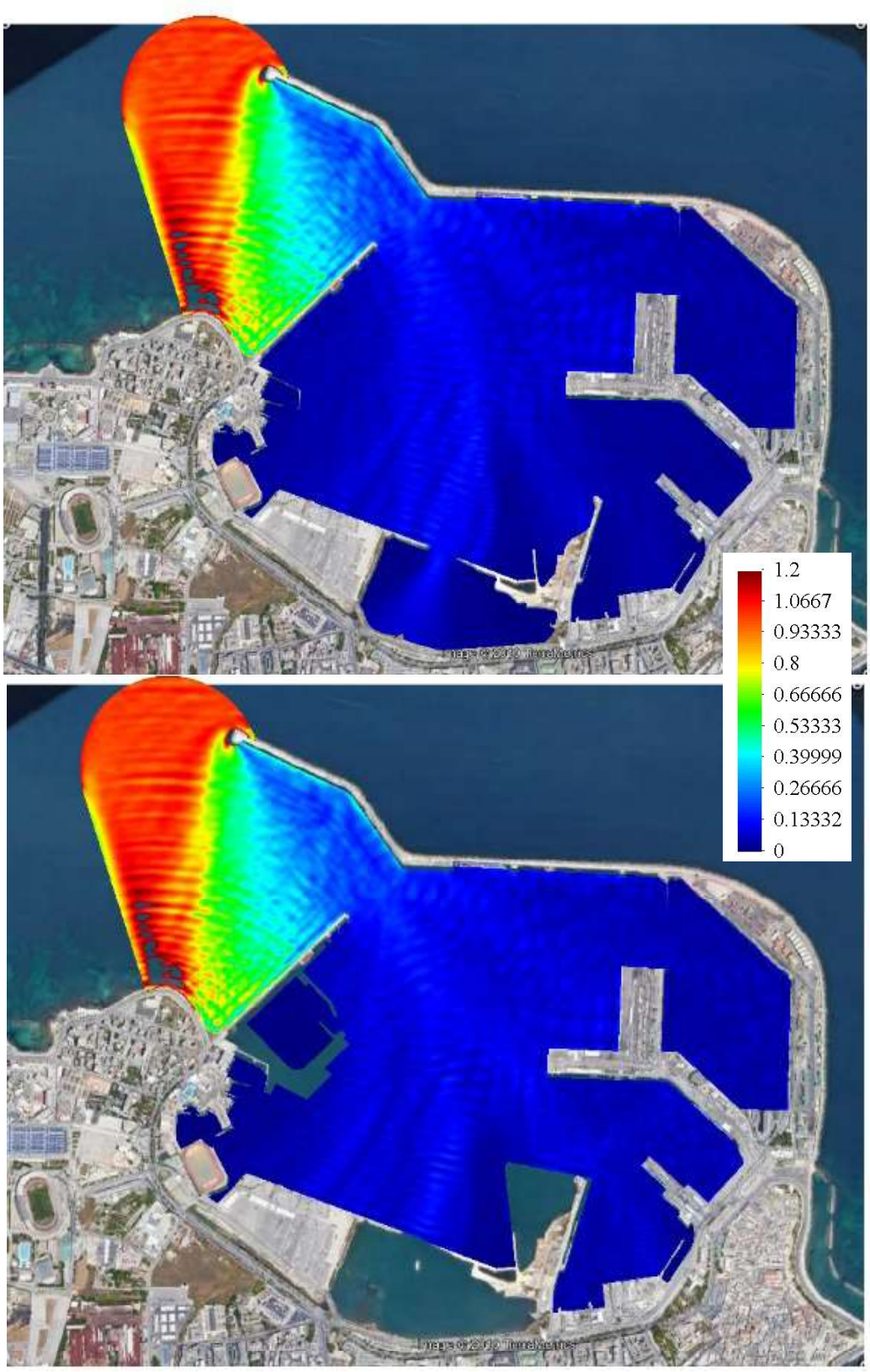


Figura 39. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

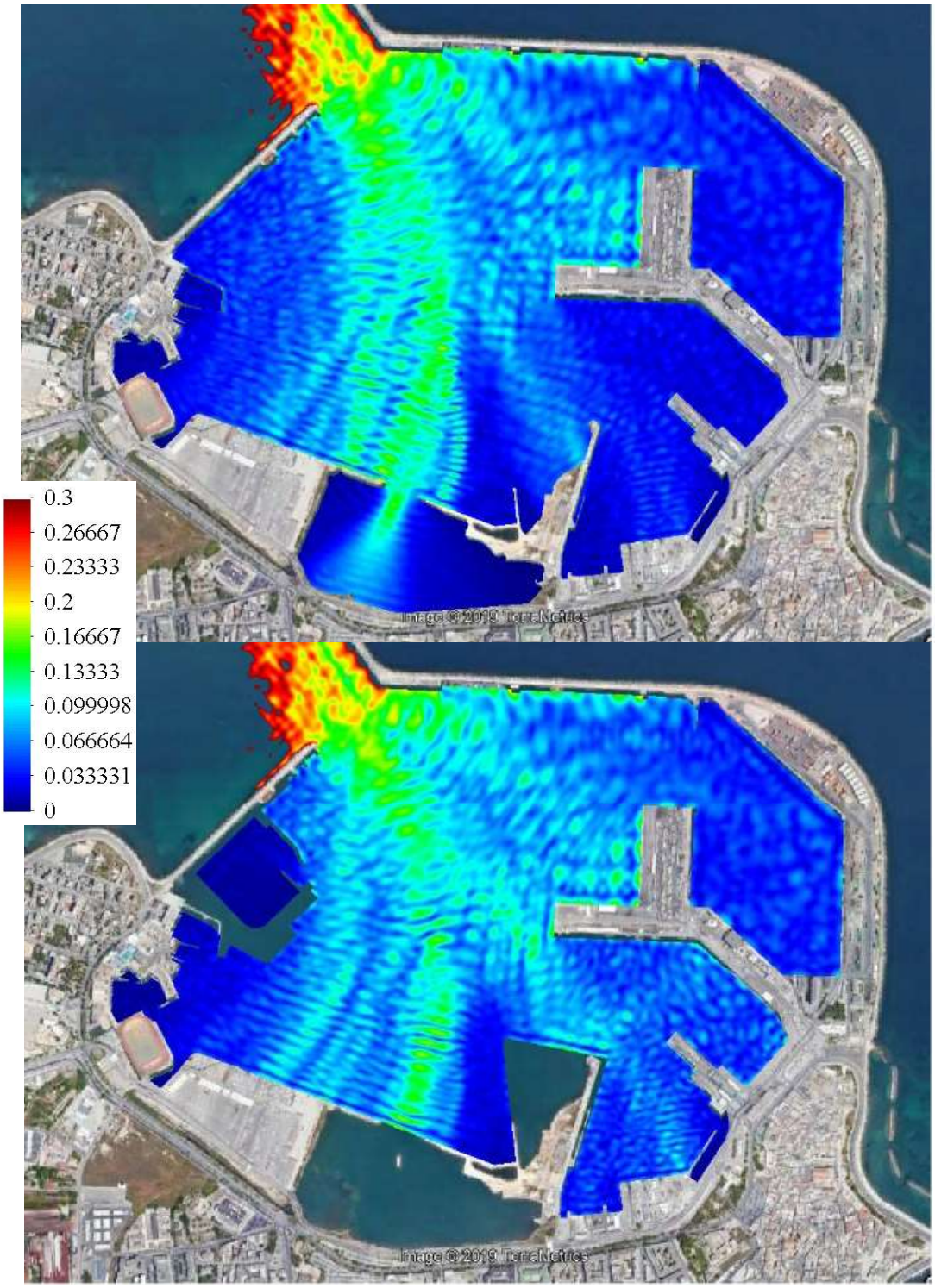


Figura 40. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

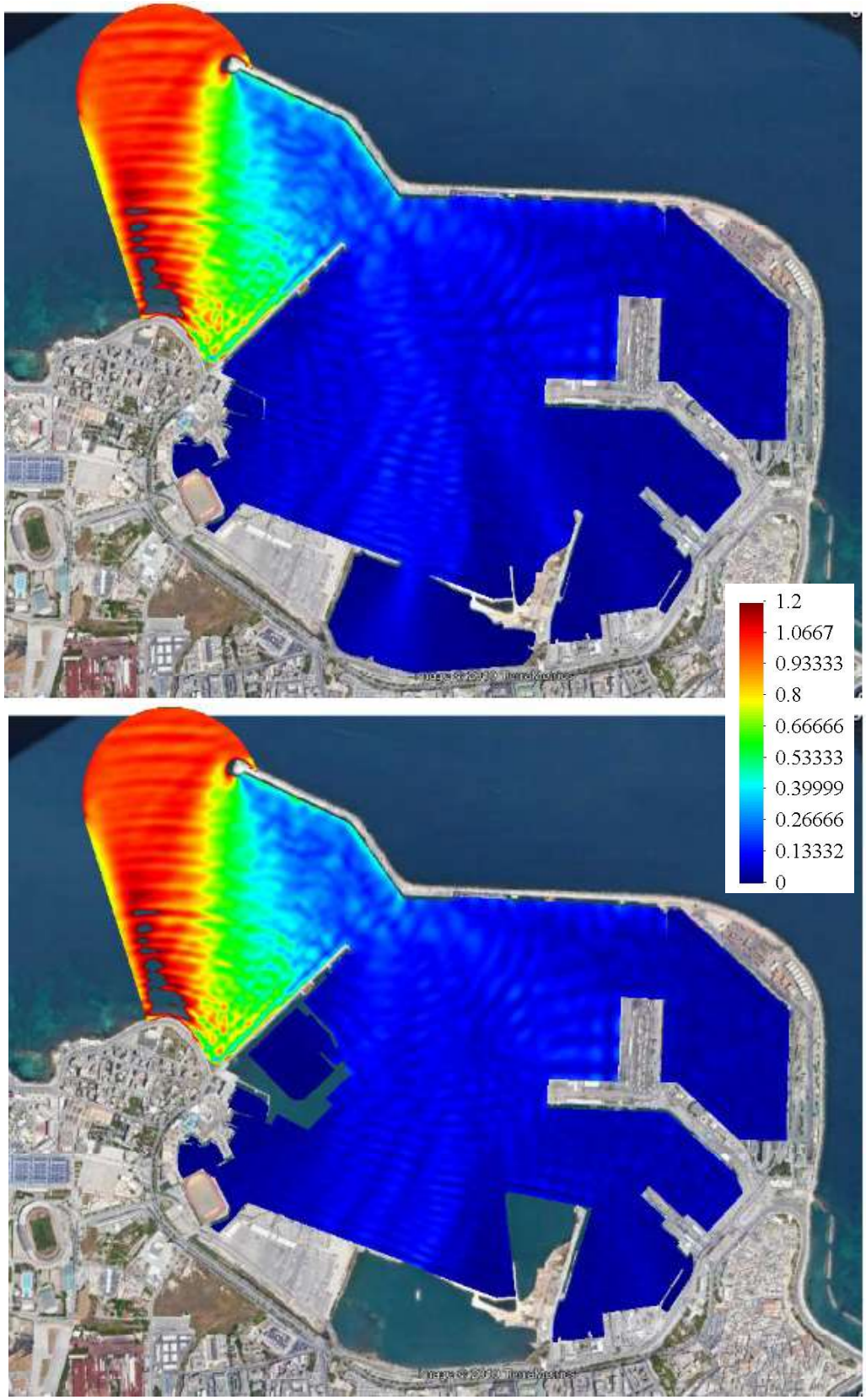


Figura 41. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

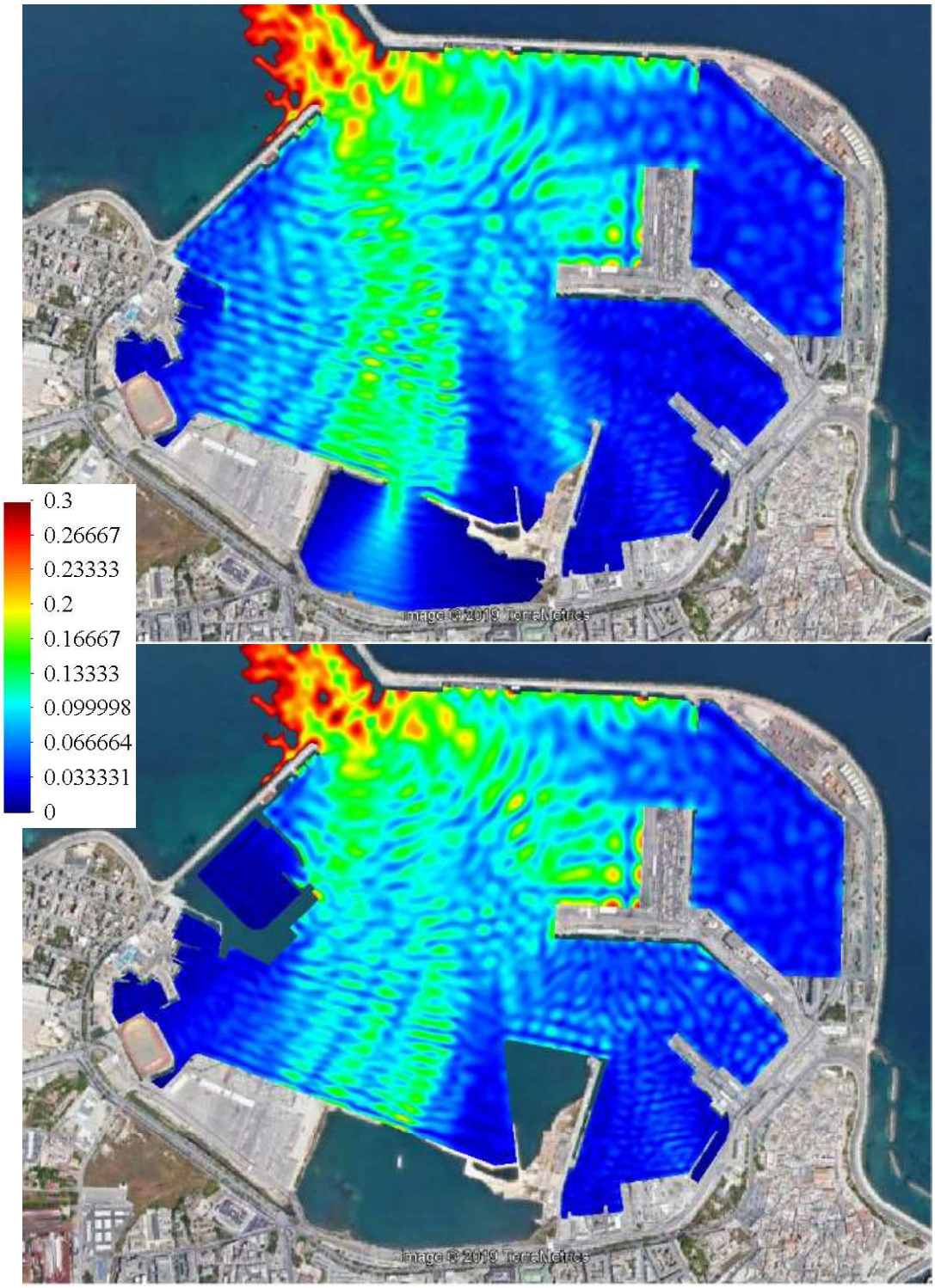


Figura 42. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =0°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

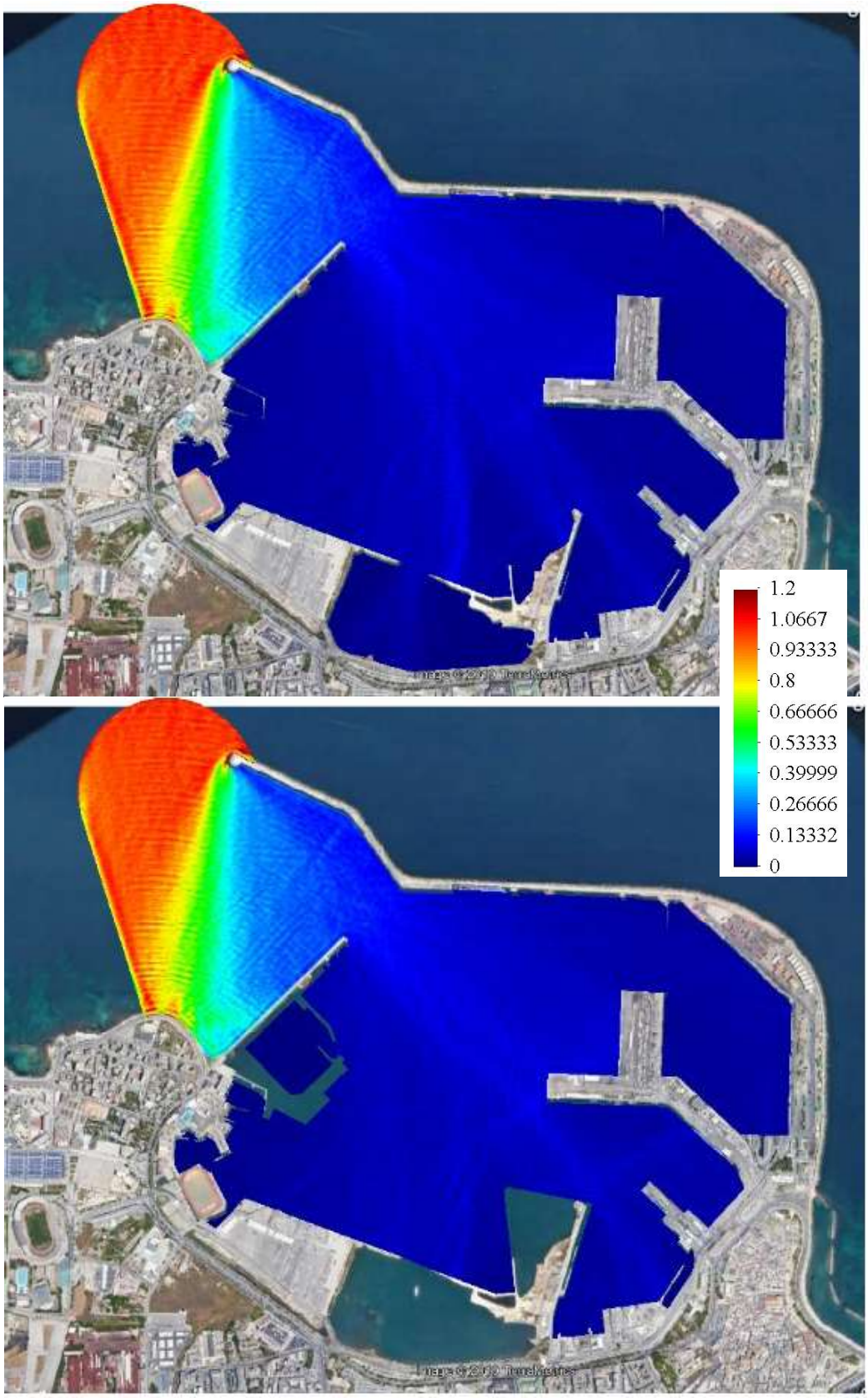

1.2
1.0667
0.93333
0.8
0.66666
0.53333
0.39999
0.26666
0.13332
0

Figura 43. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

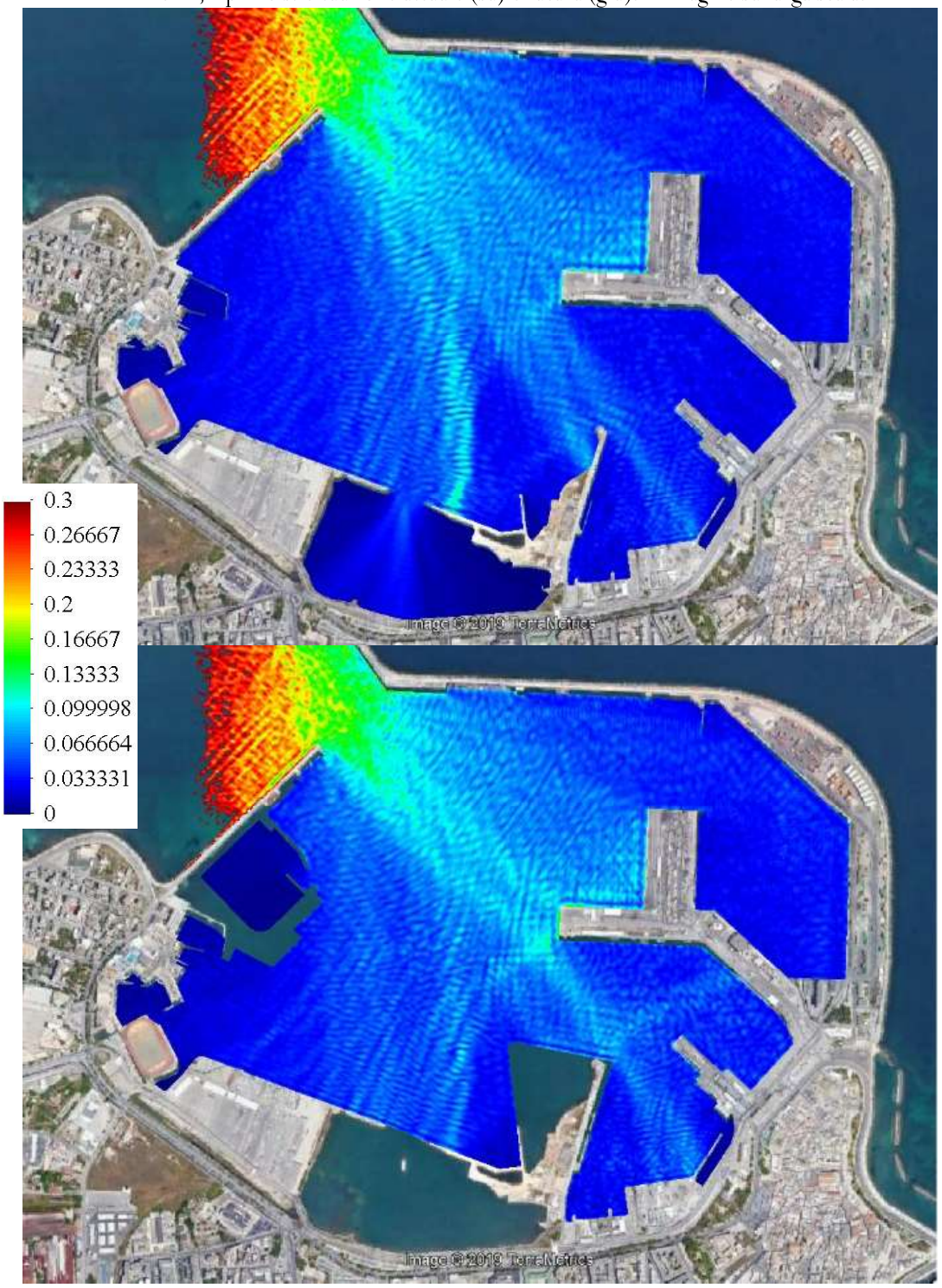


Figura 44. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

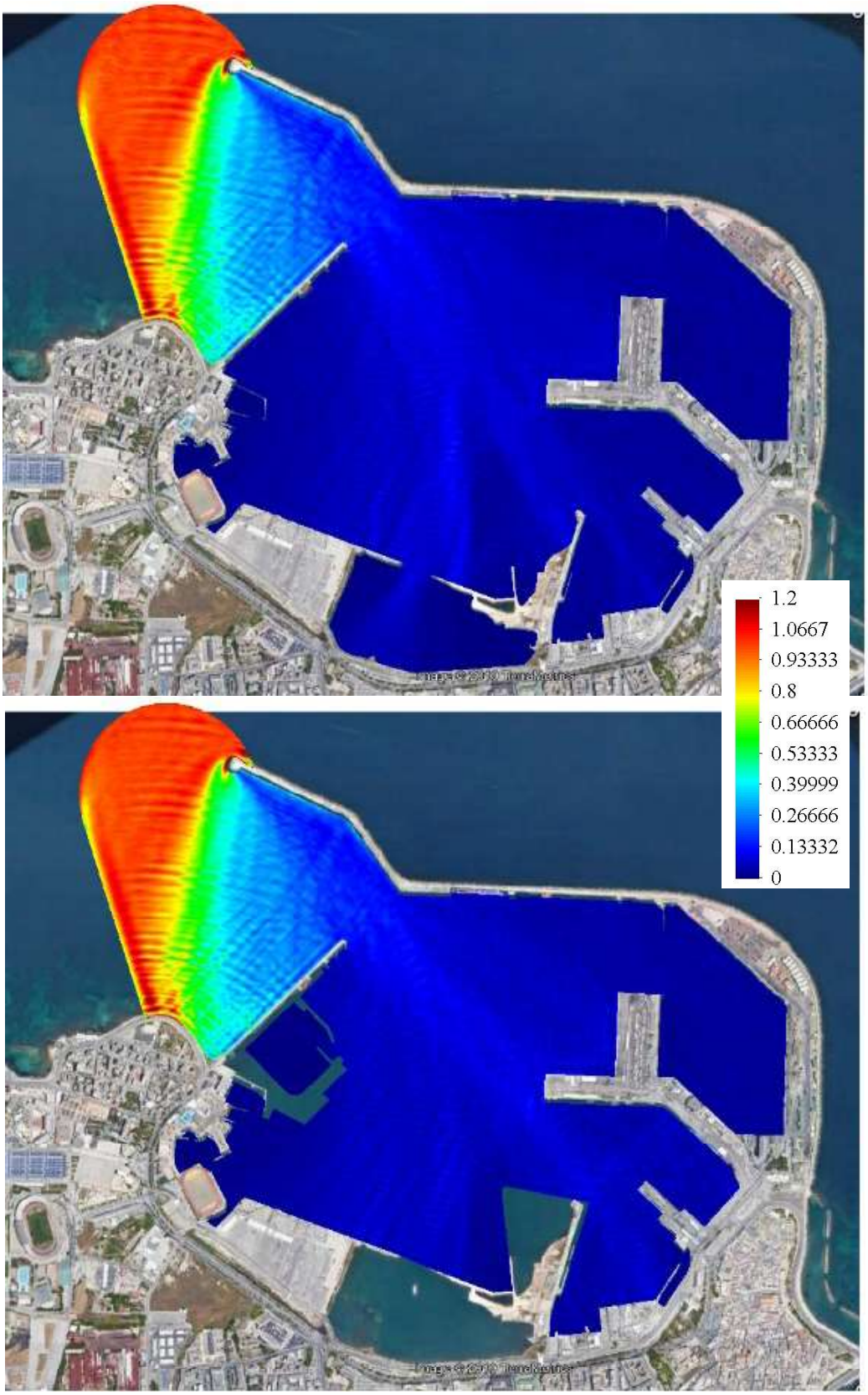


Figura 45. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

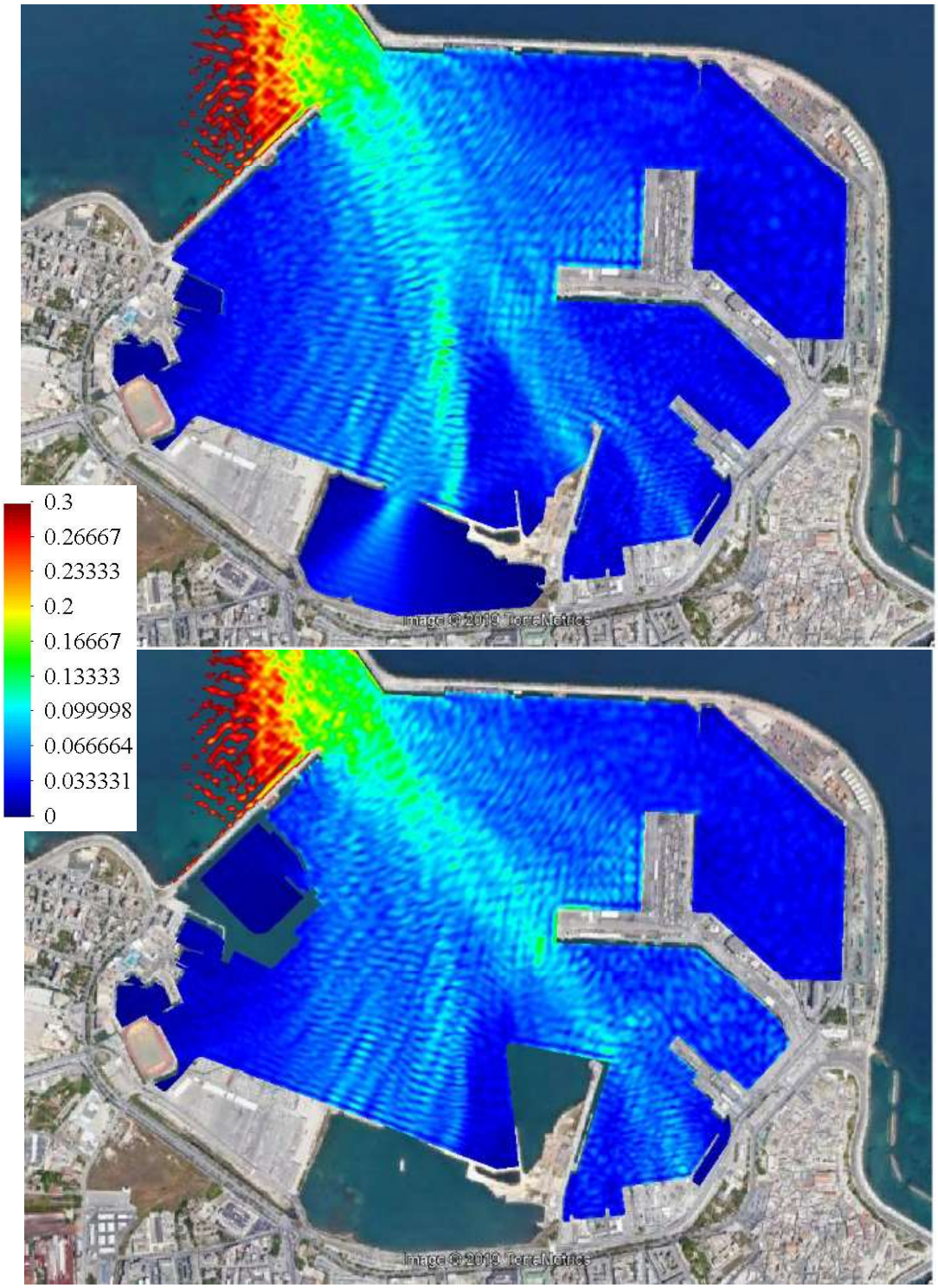


Figura 46. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

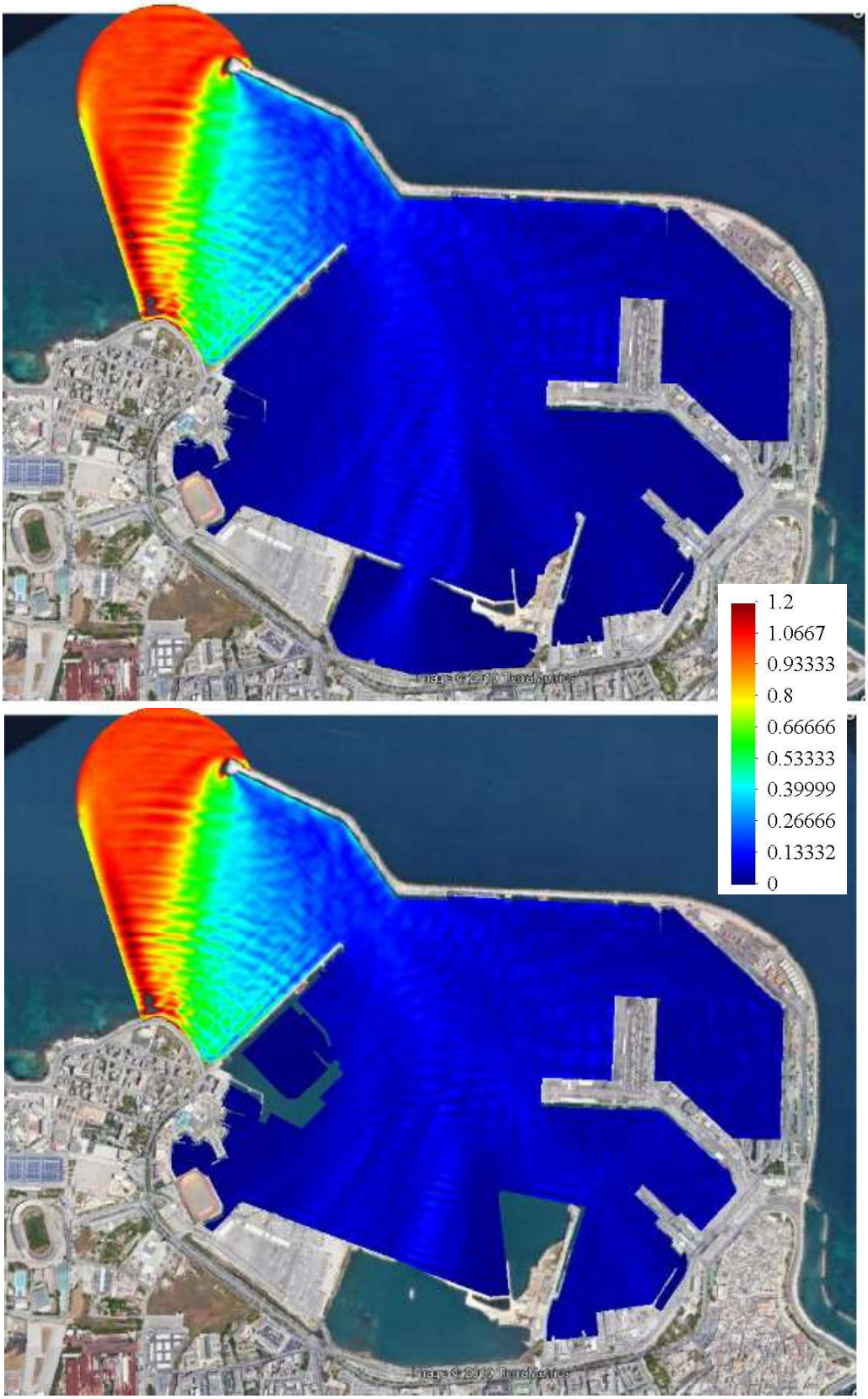


Figura 47. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

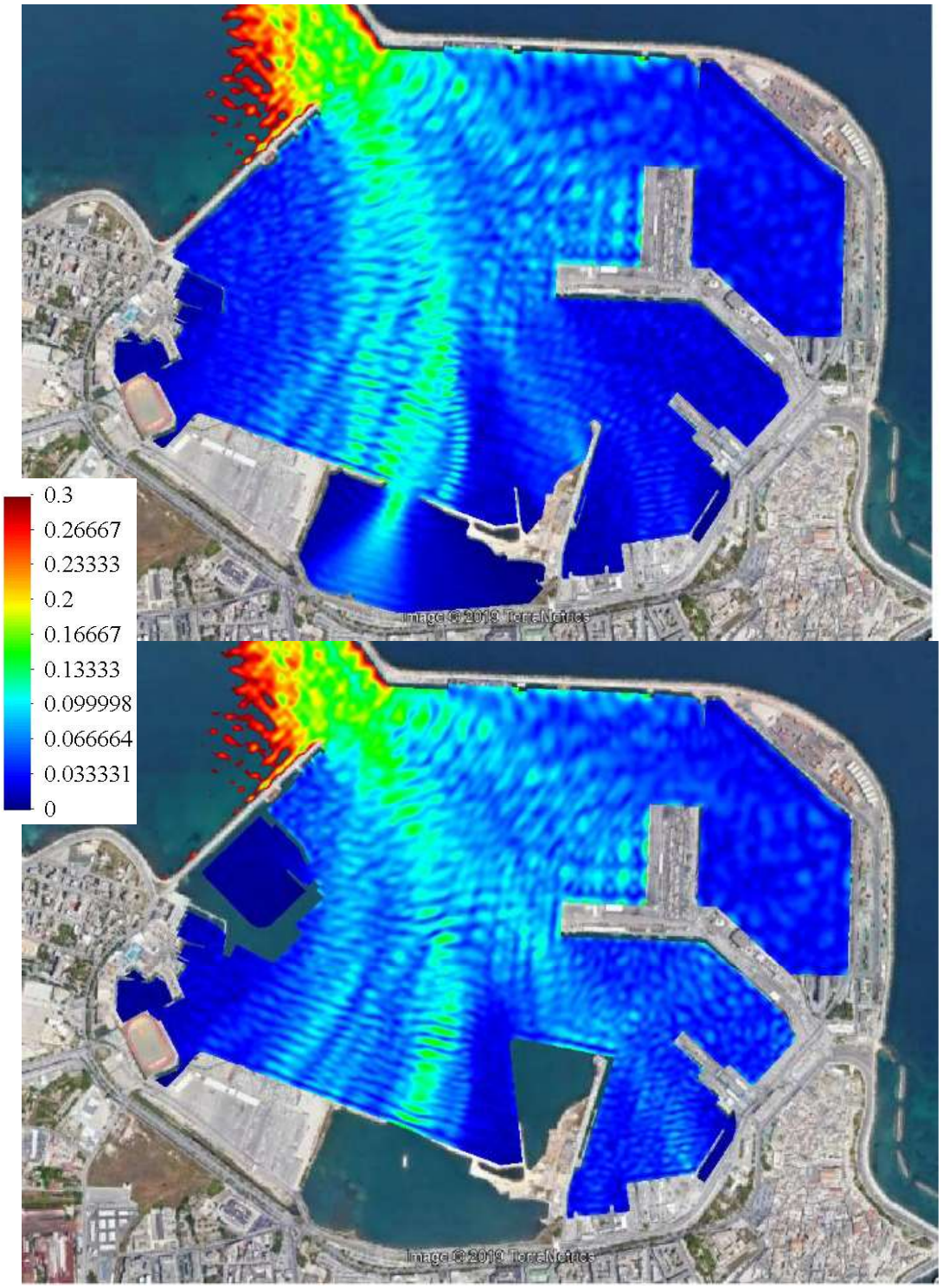


Figura 48. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

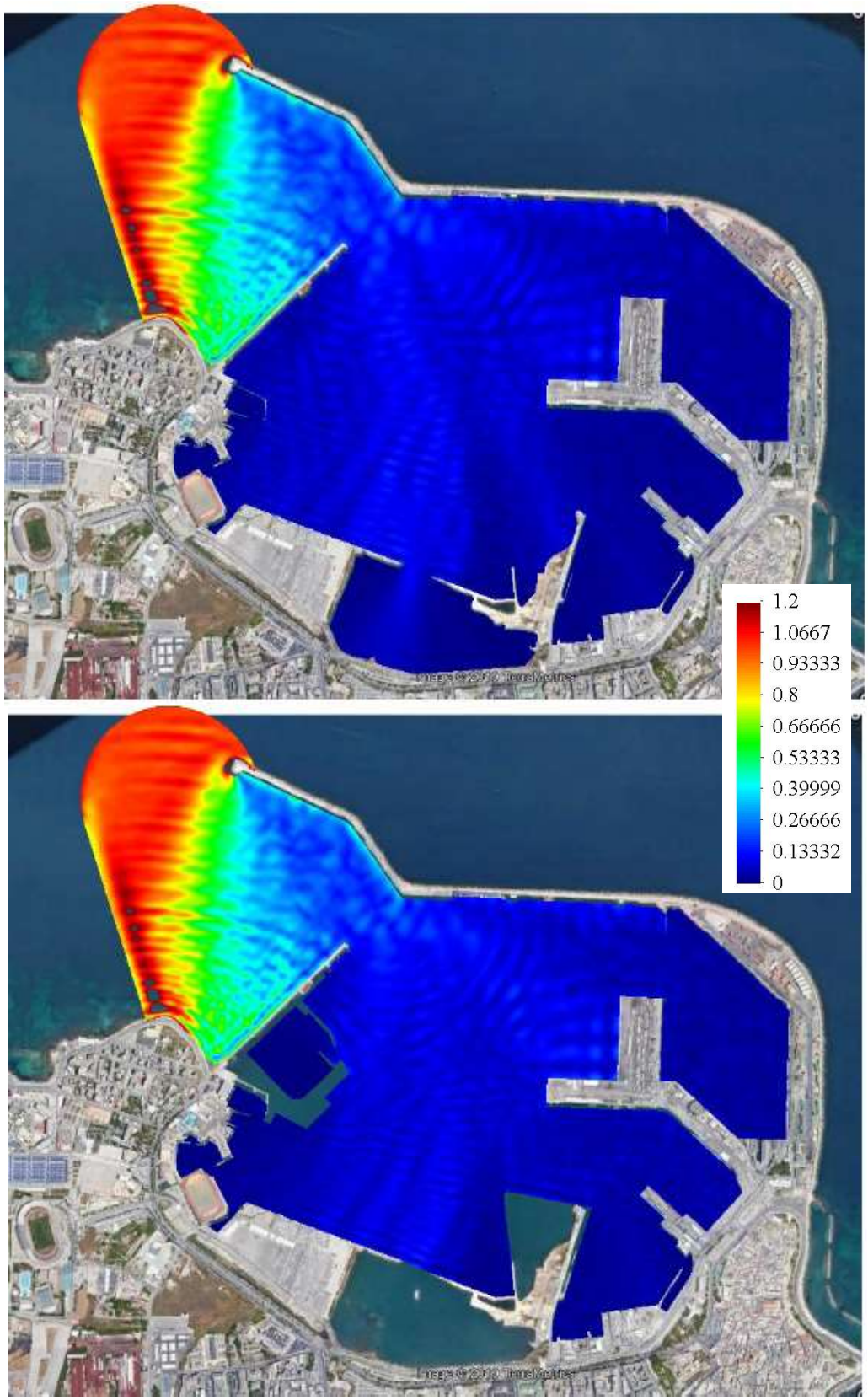


Figura 49. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

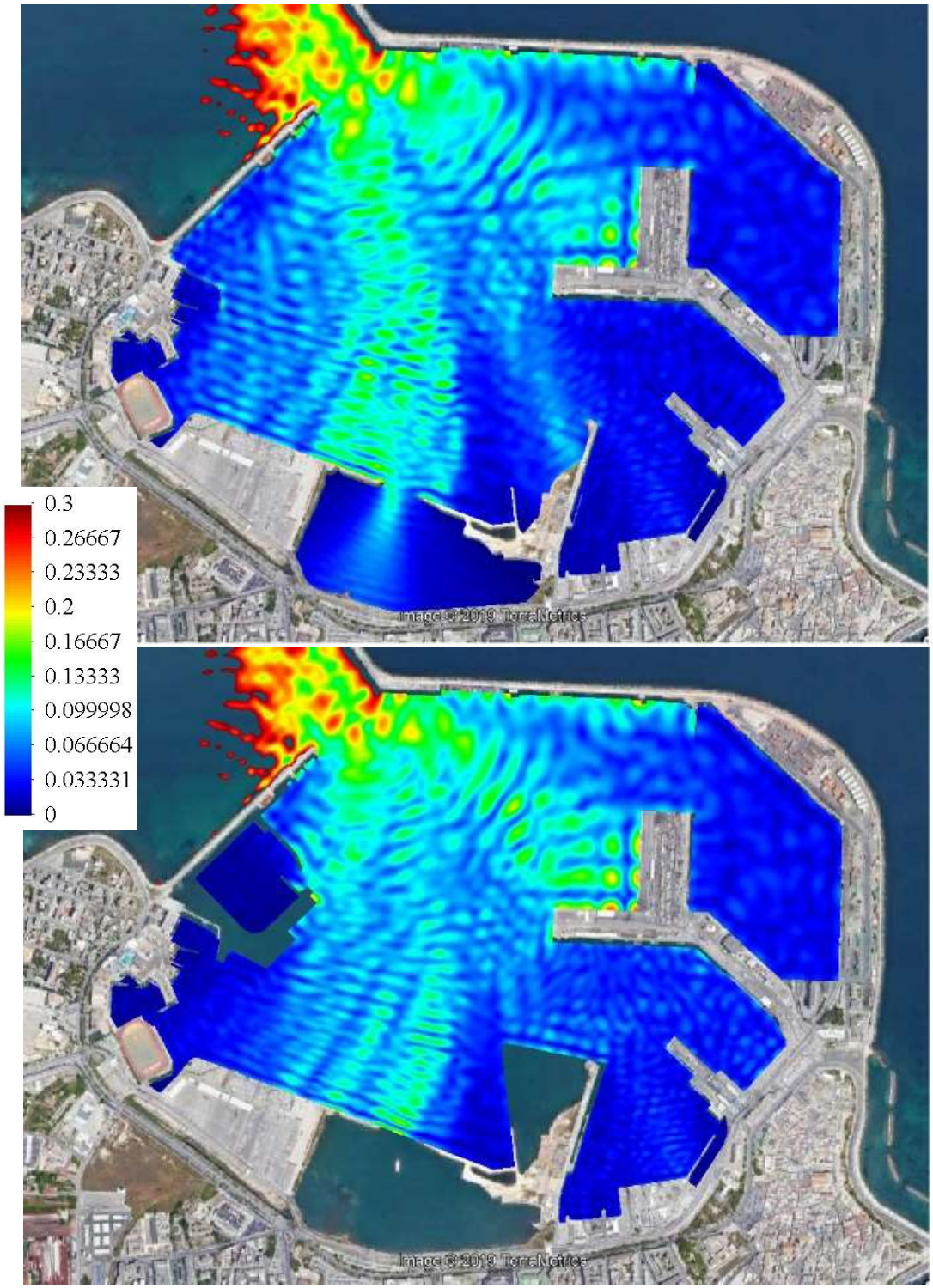


Figura 50. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =10°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

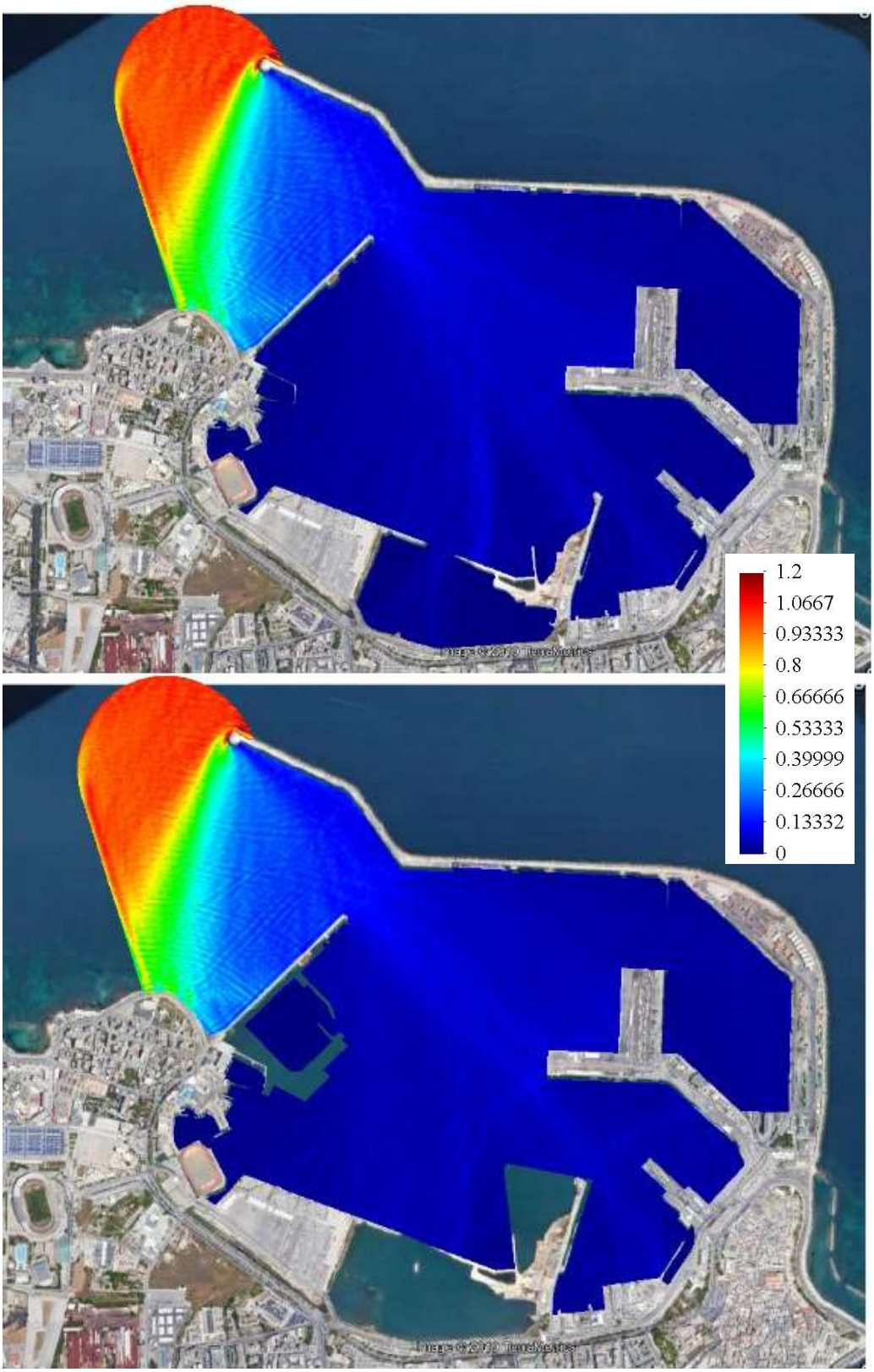


Figura 51. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

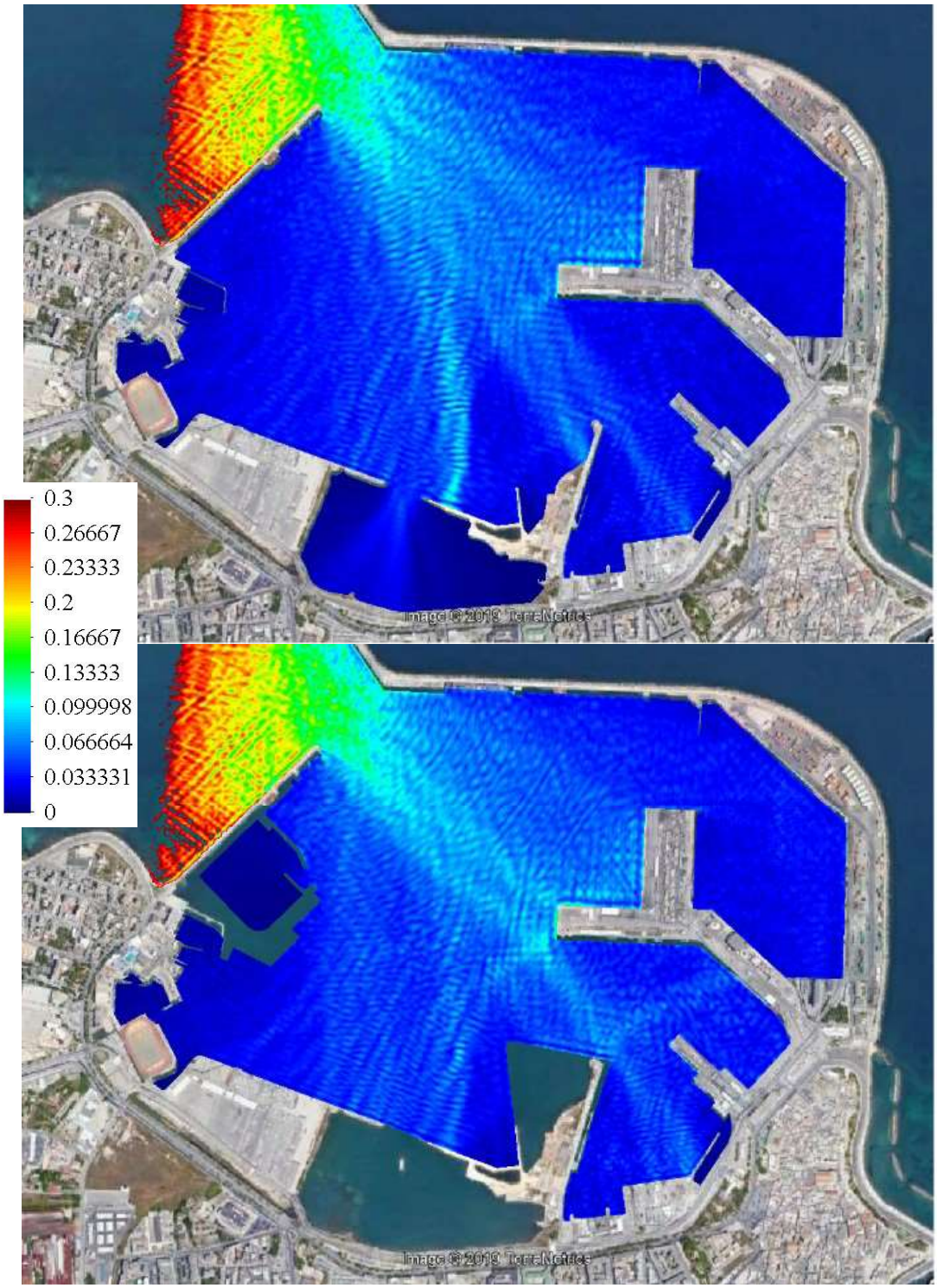


Figura 52. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

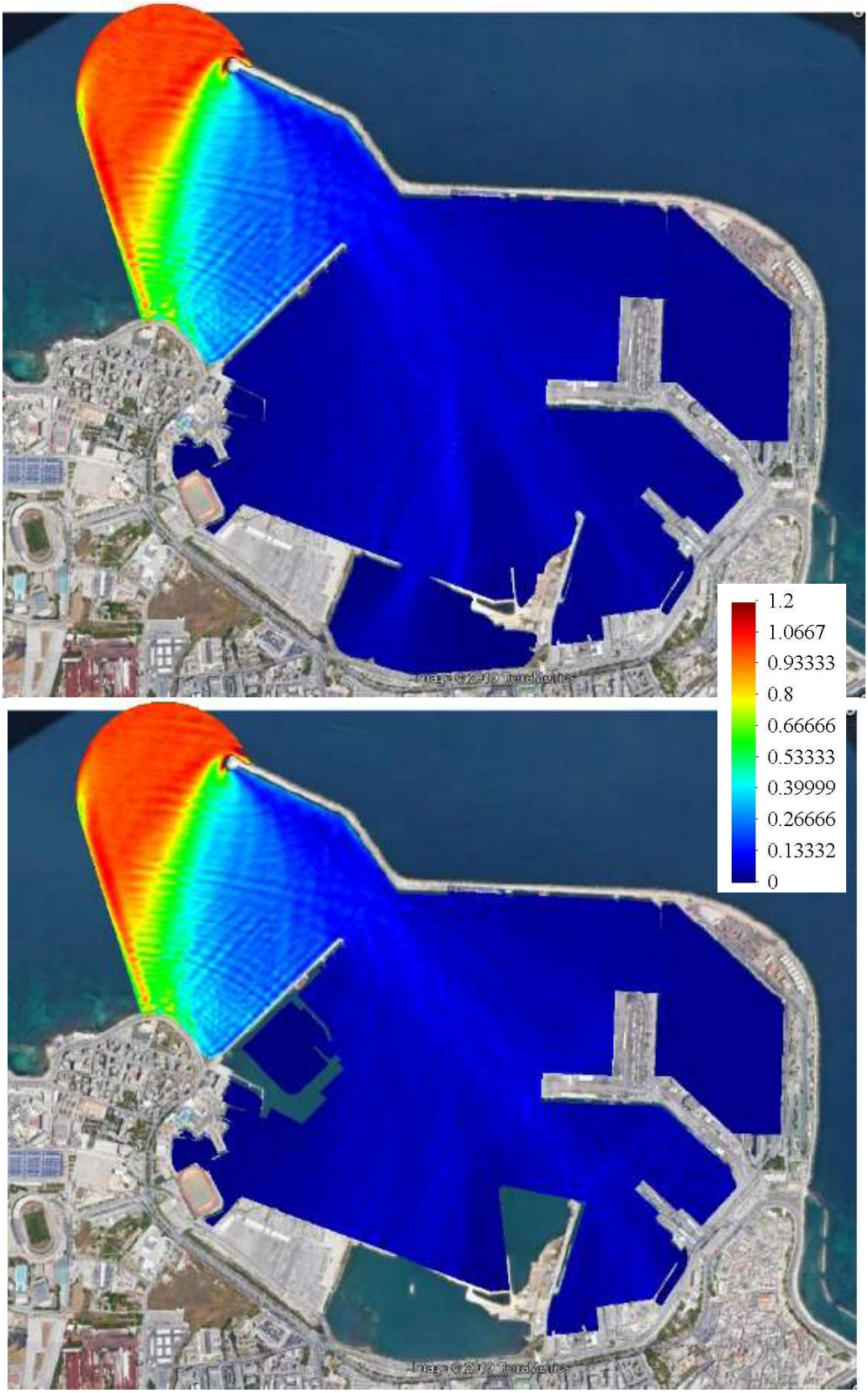


Figura 53. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

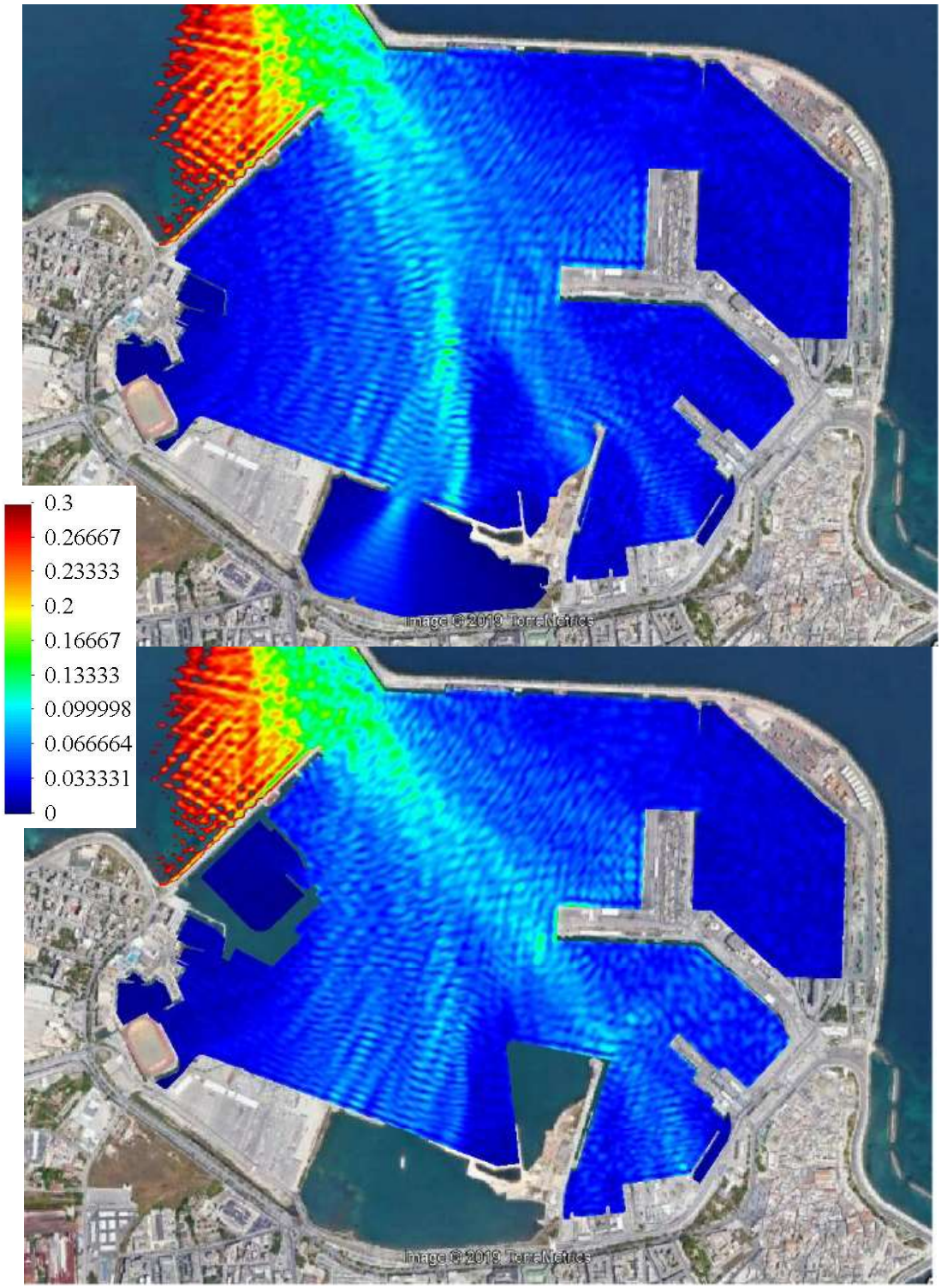


Figura 54. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

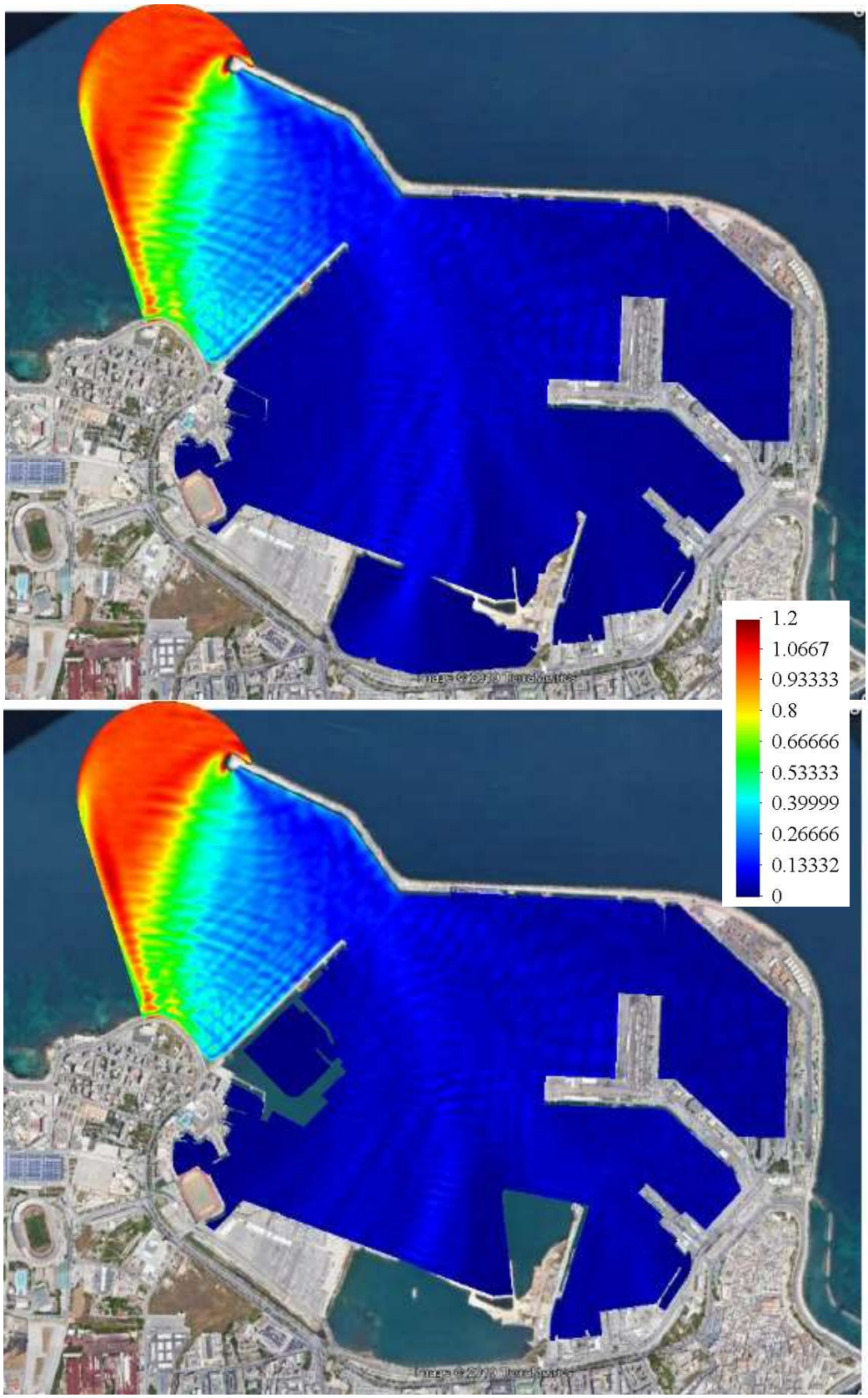


Figura 55. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

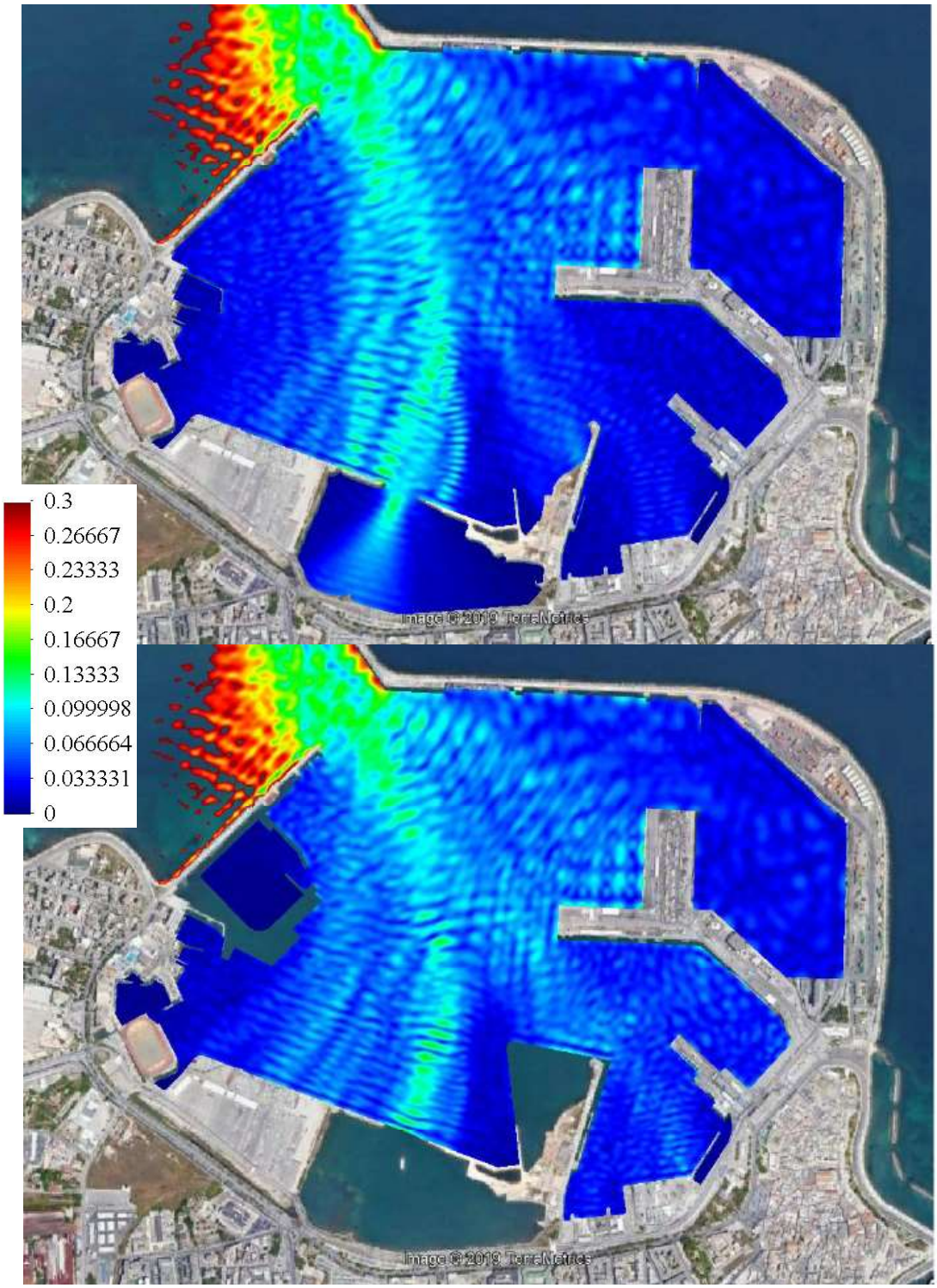


Figura 56. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

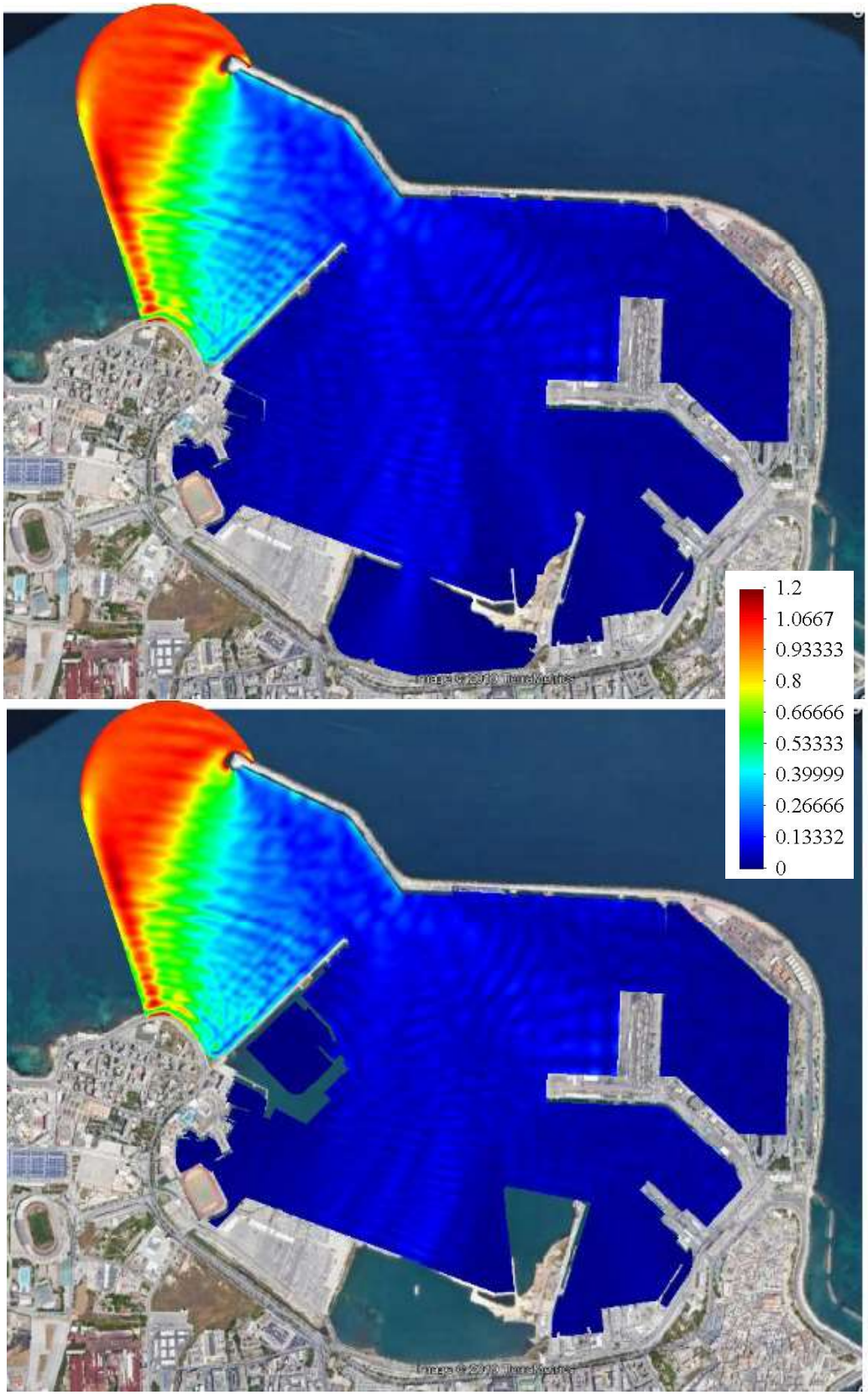


Figura 57. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

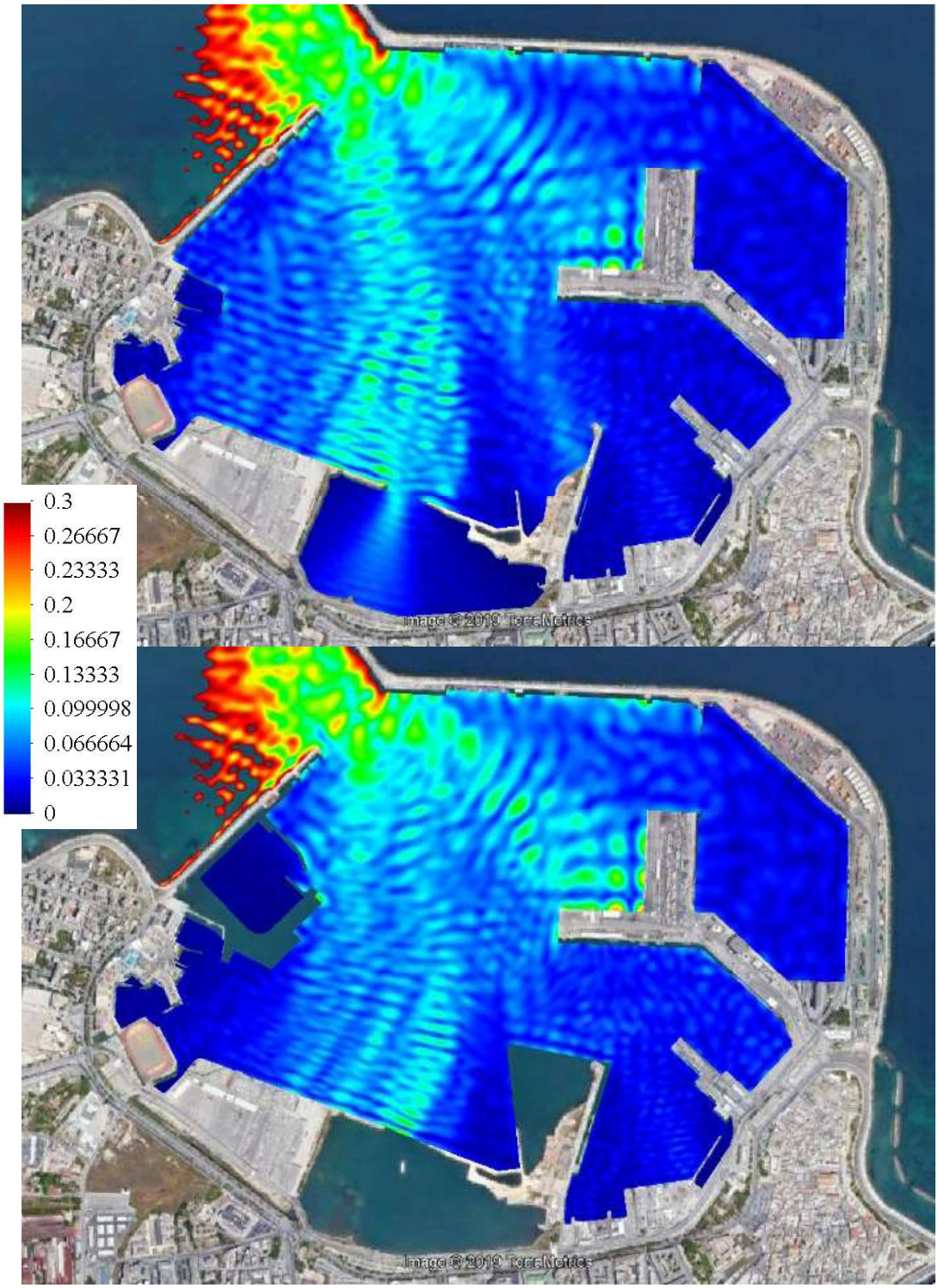


Figura 58. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =20°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

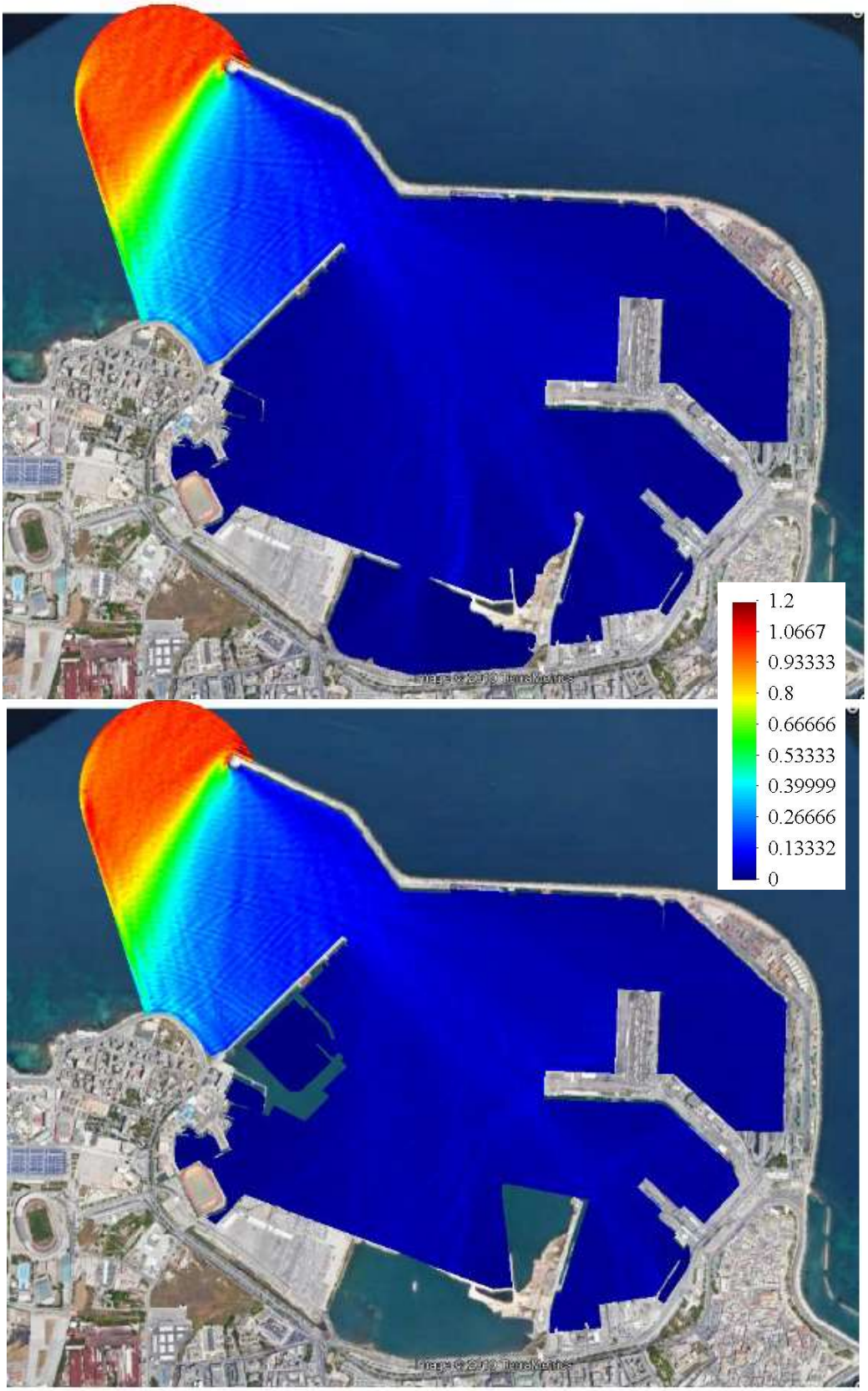


Figura 59. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

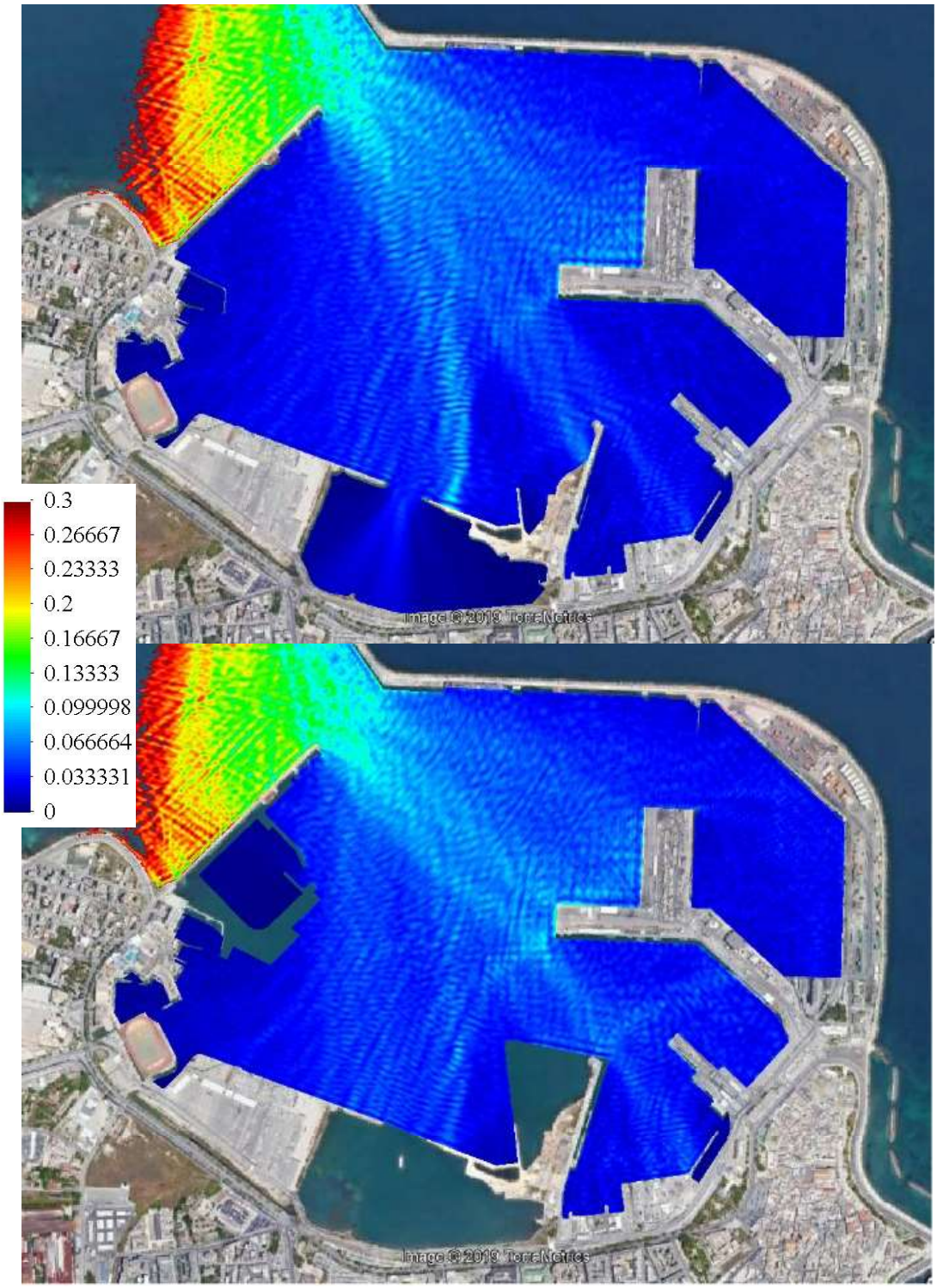


Figura 60. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

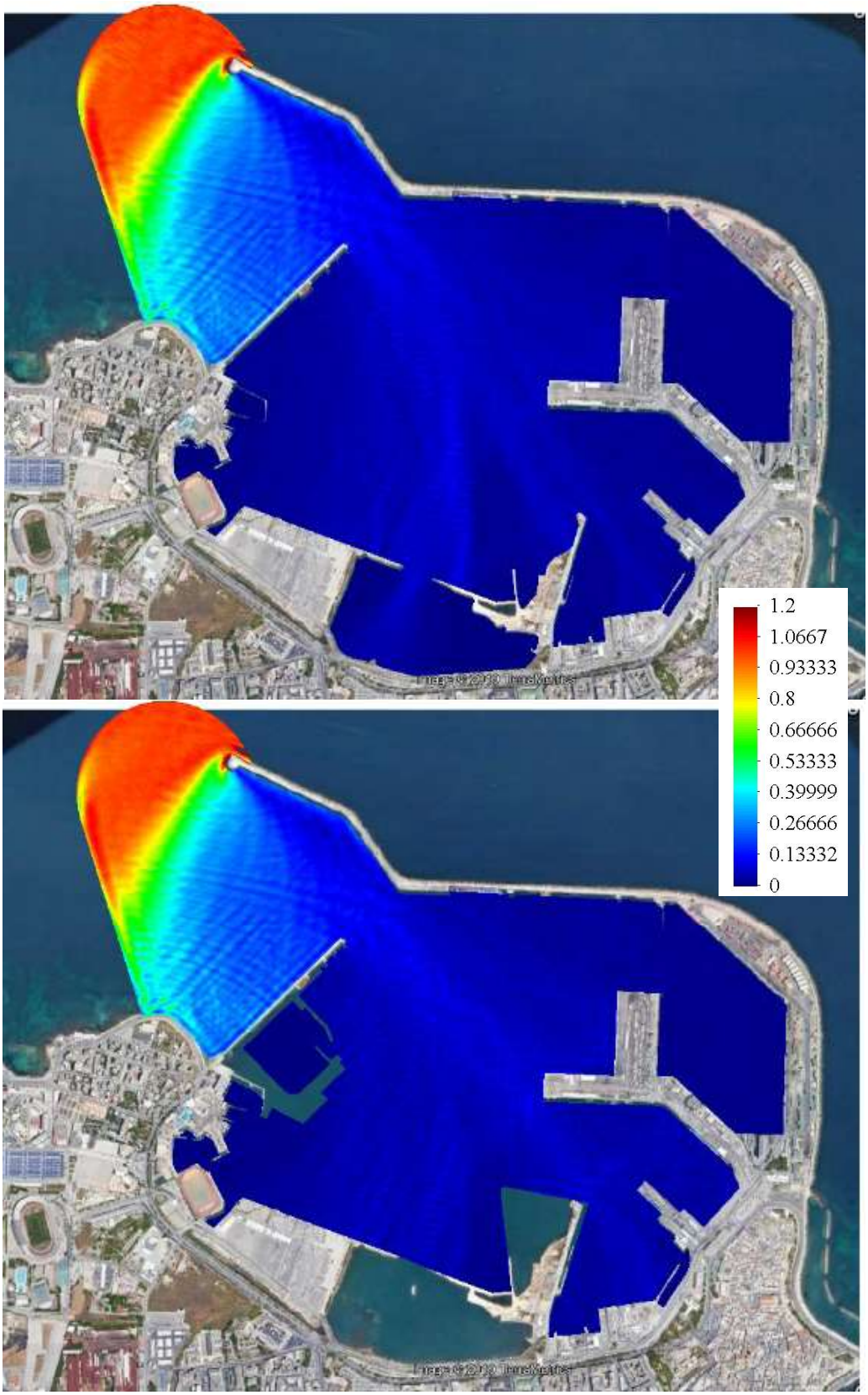


Figura 61. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

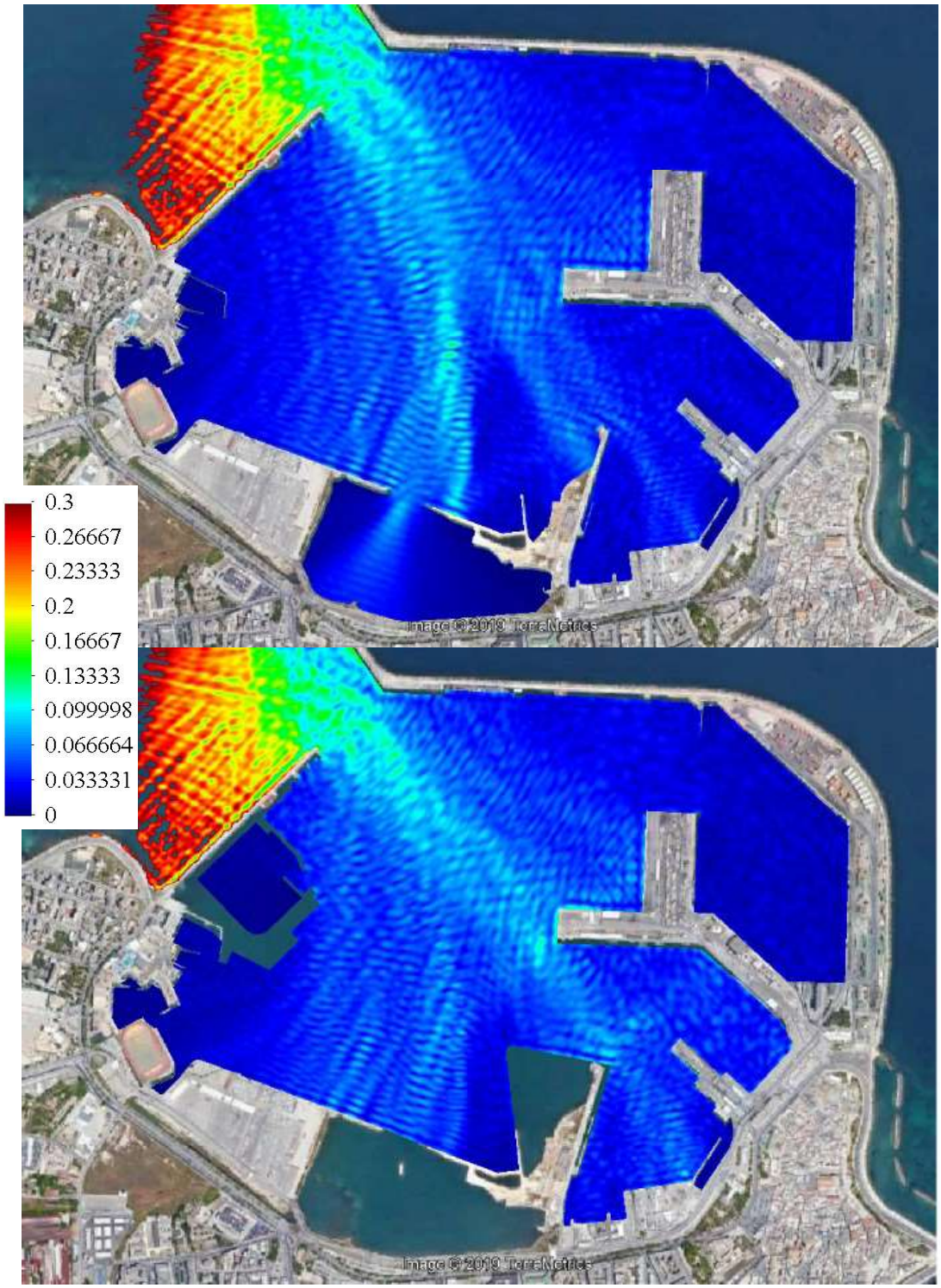


Figura 62. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

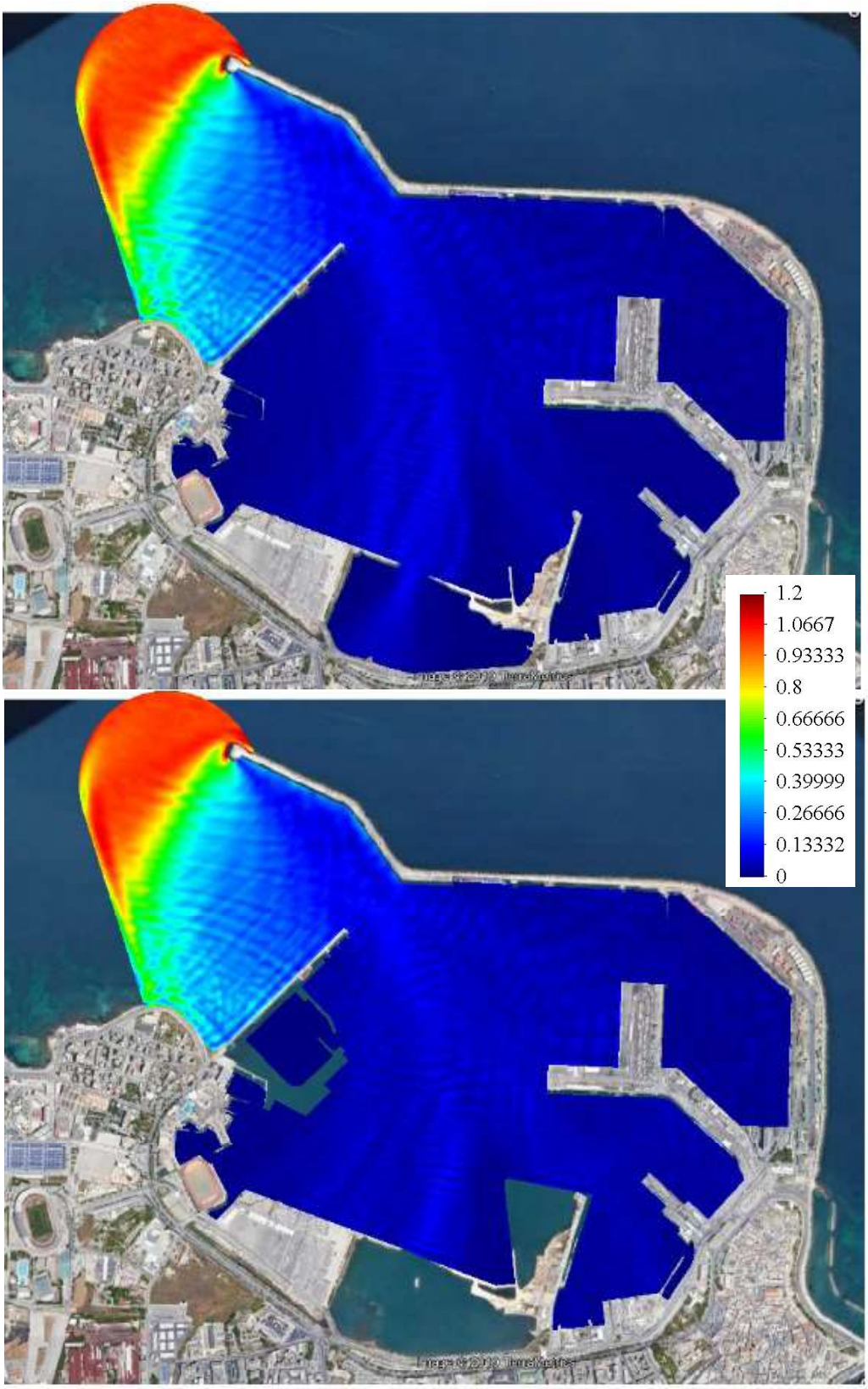


Figura 63. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.

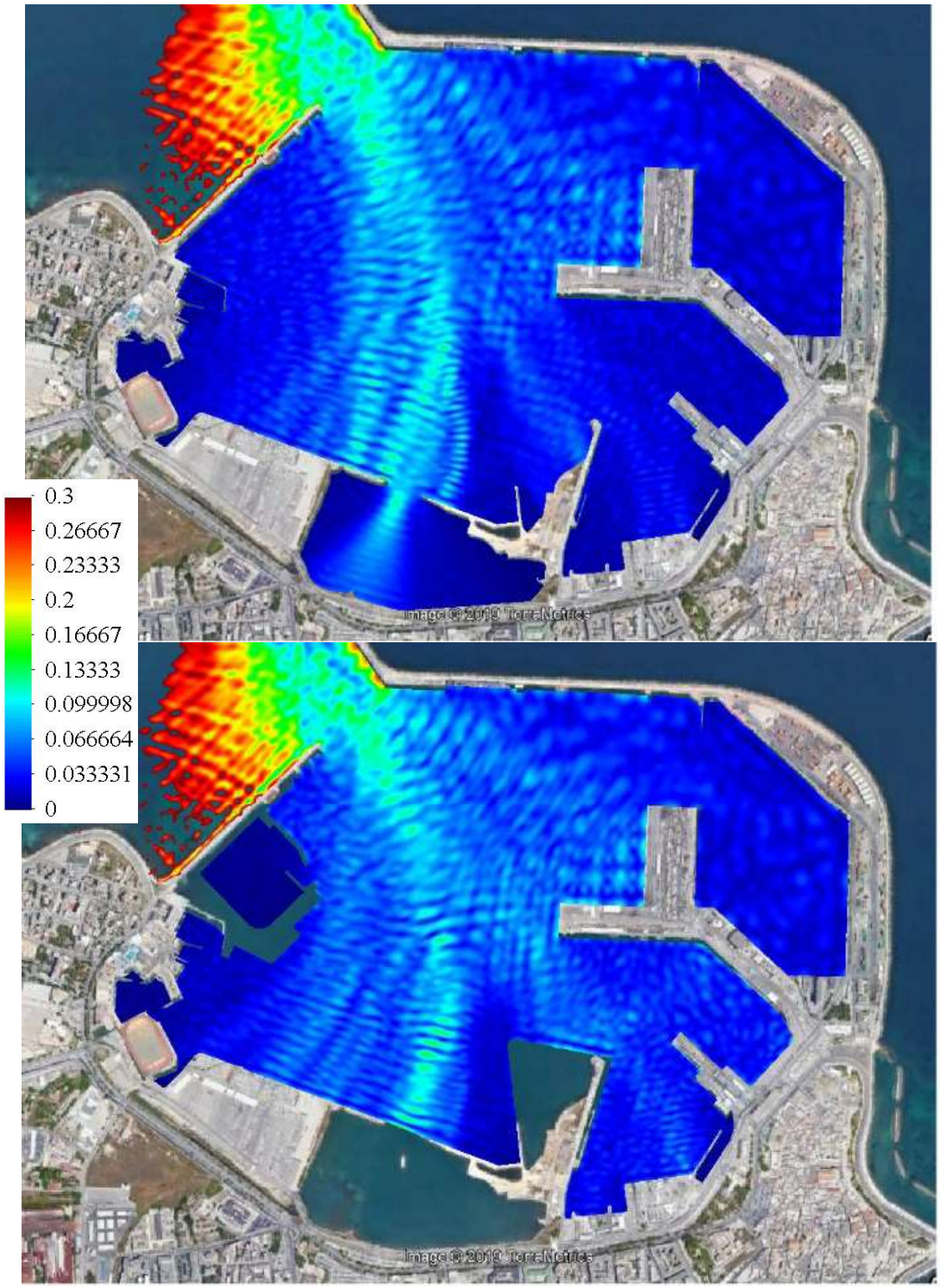


Figura 64. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

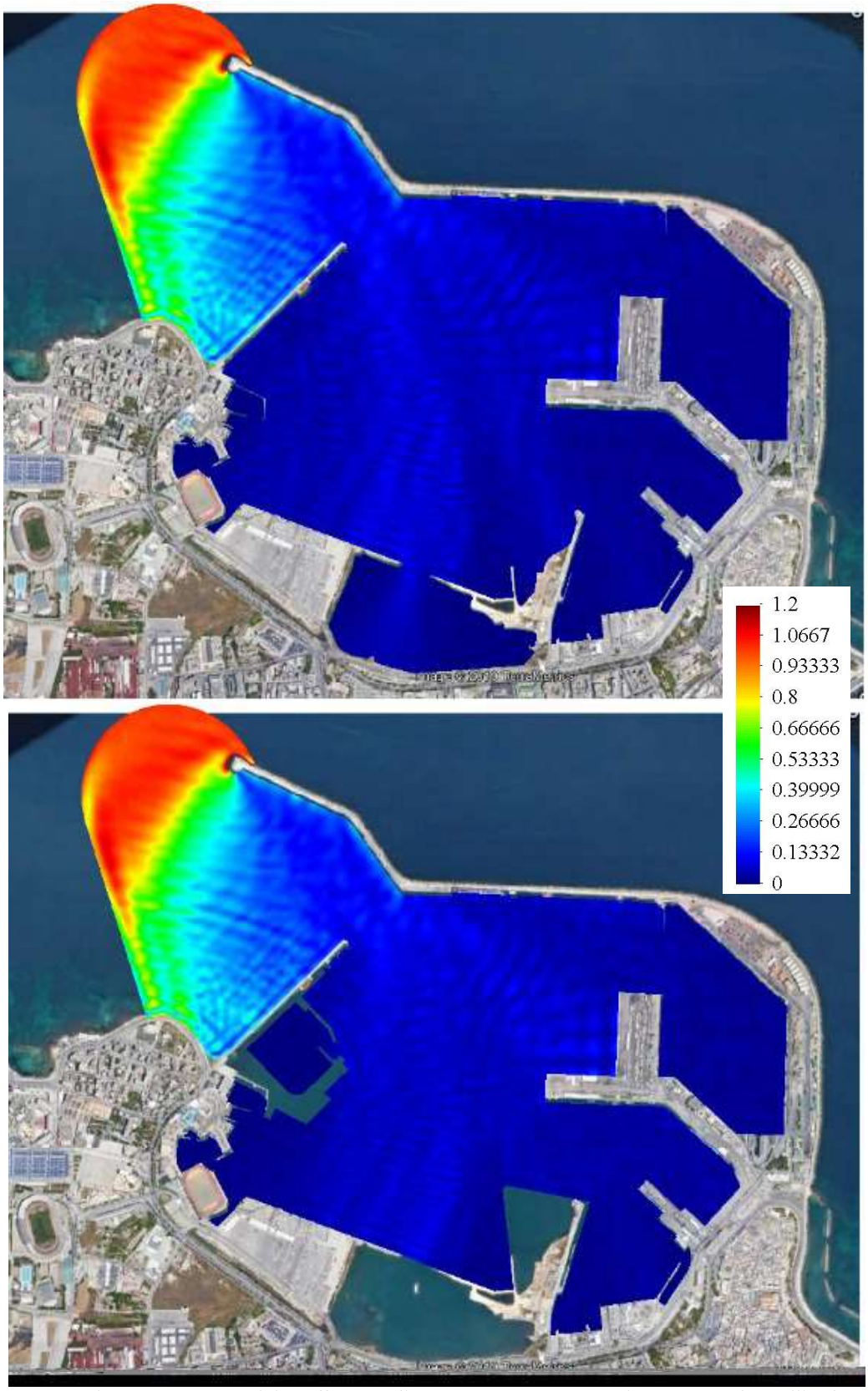
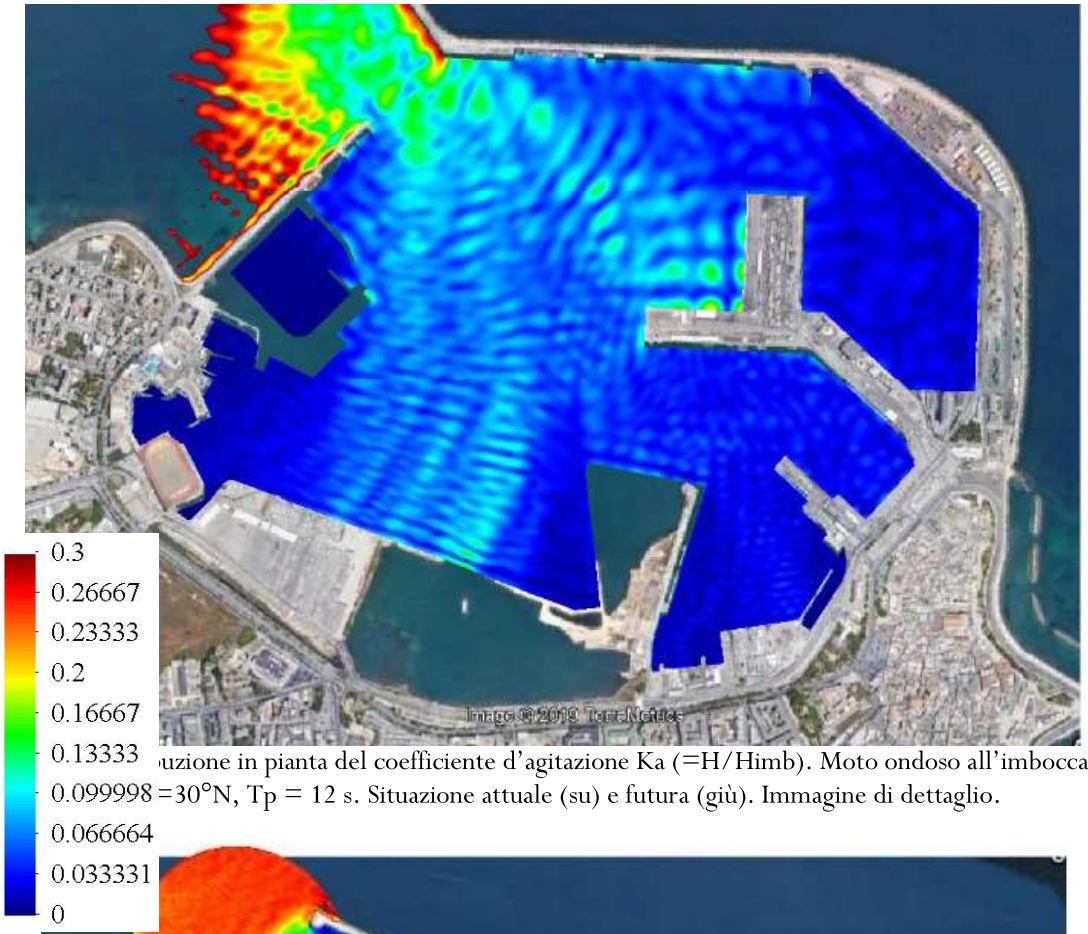
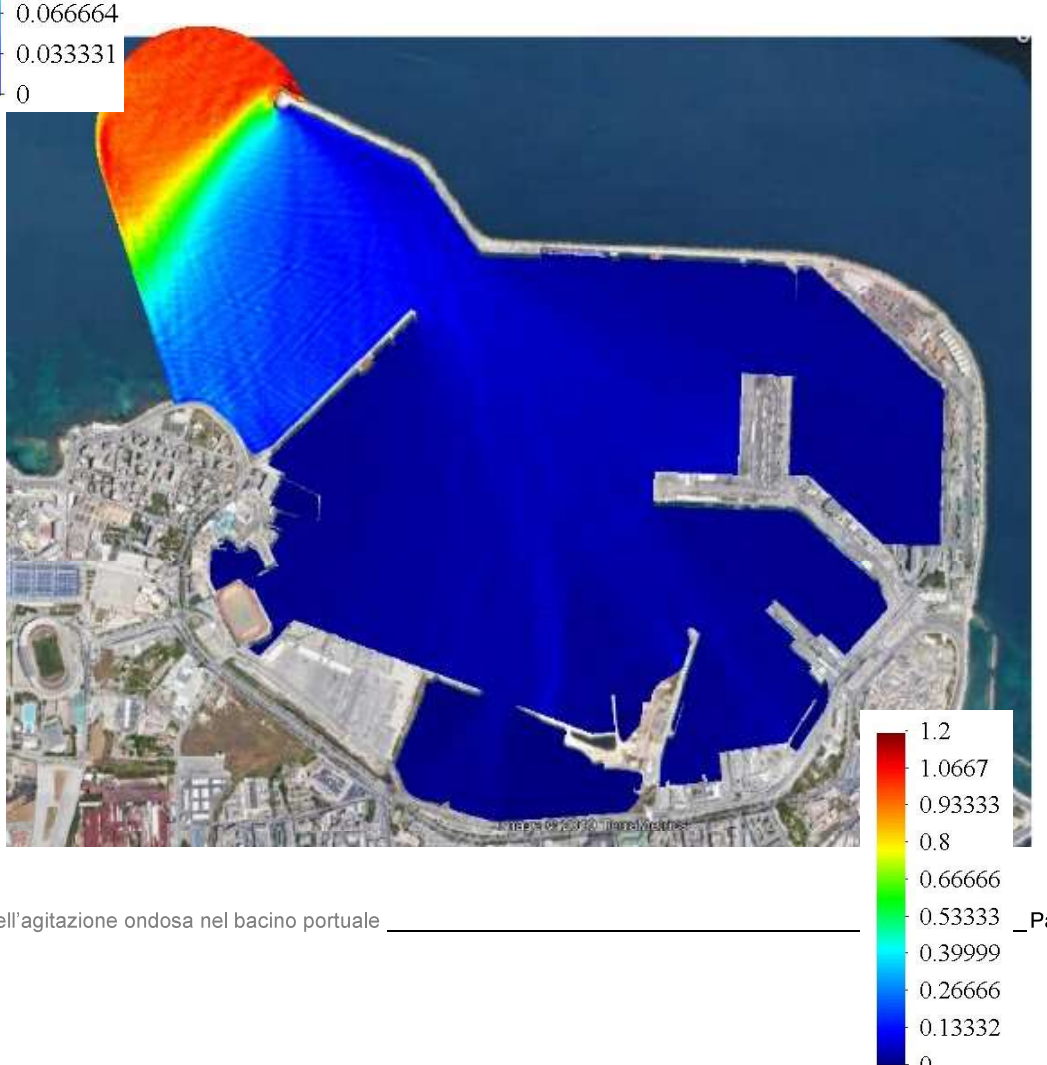


Figura 65. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =30°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.



F uzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: =30°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.



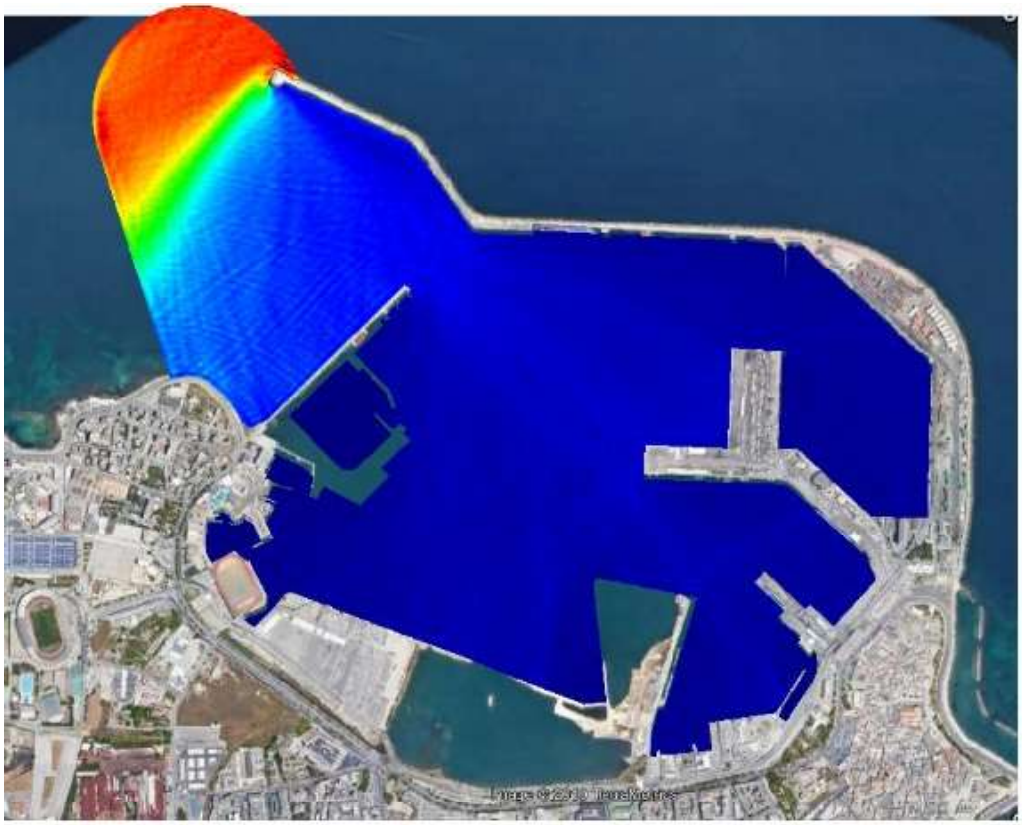
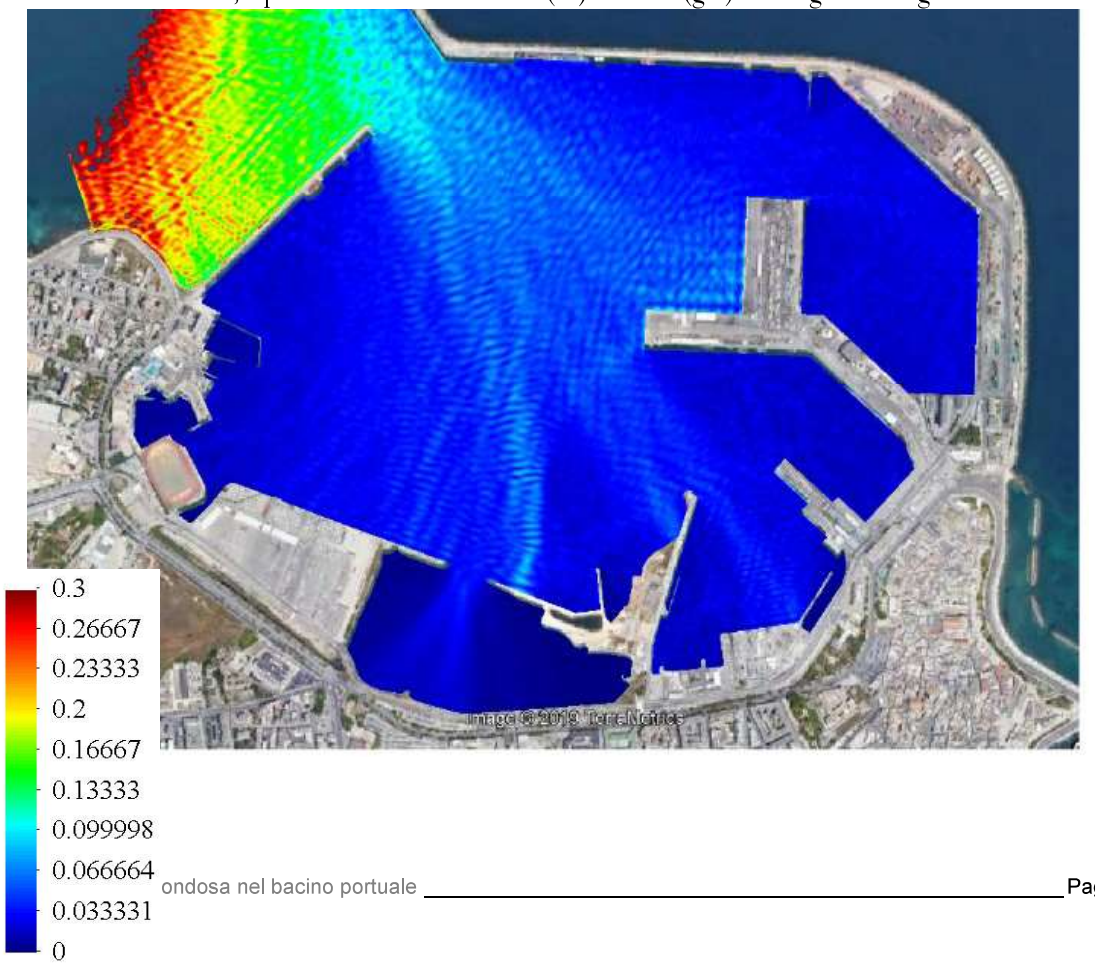


Figura 67. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.



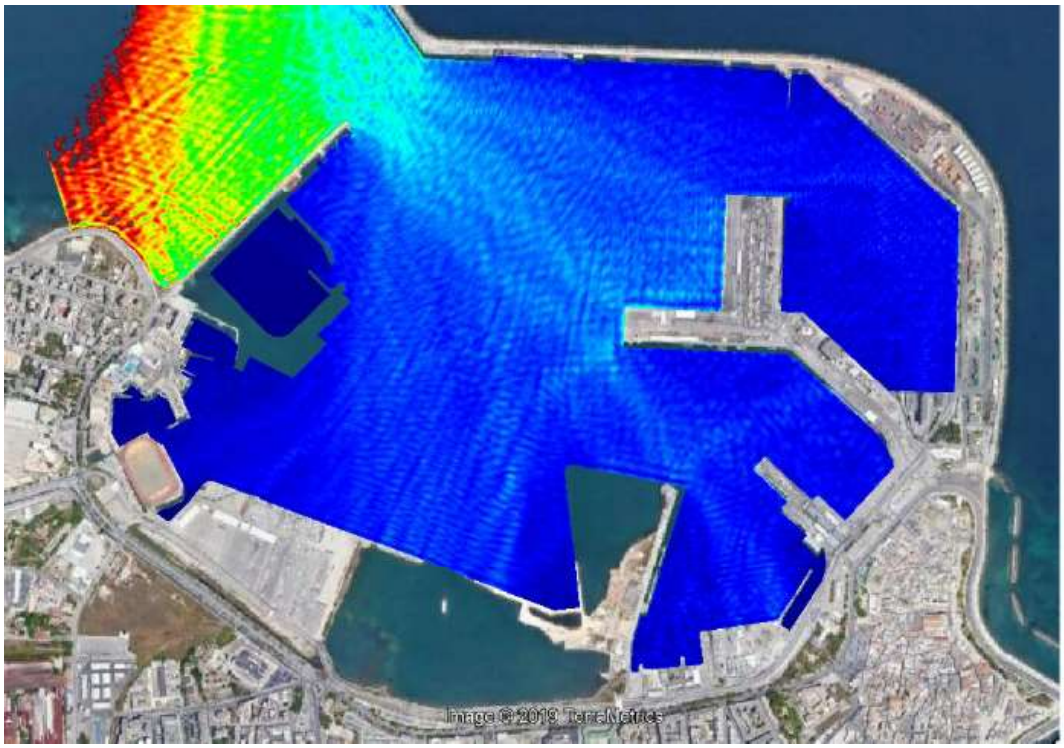


Figura 68. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 6 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

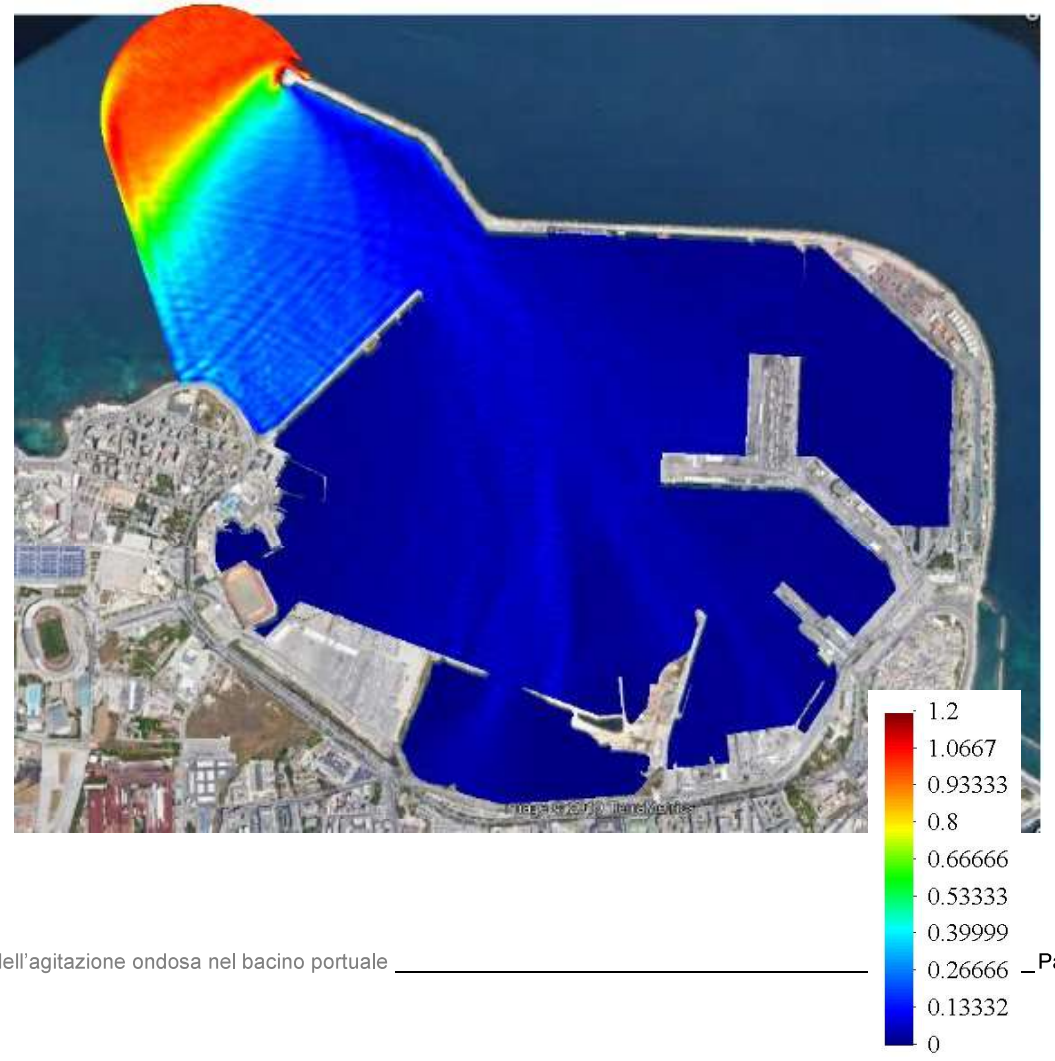
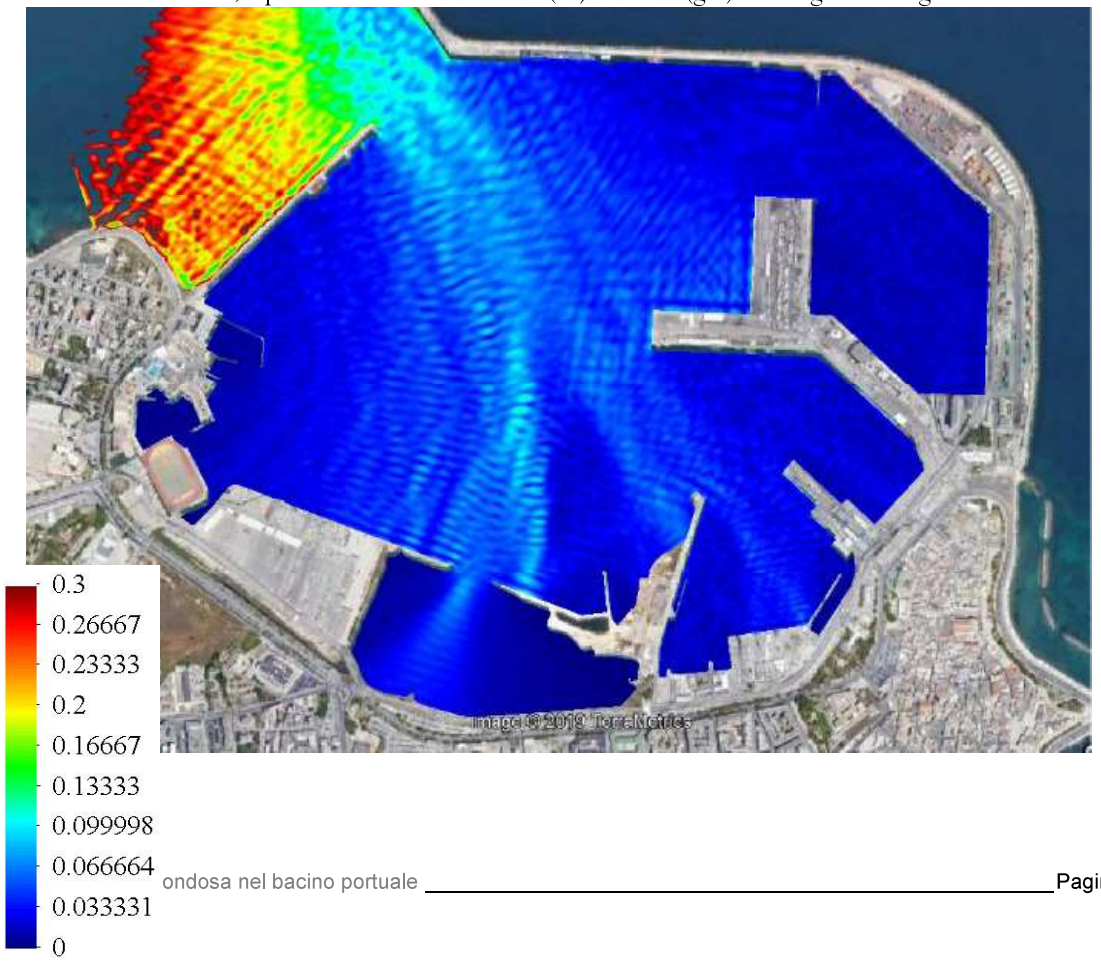




Figura 69. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.



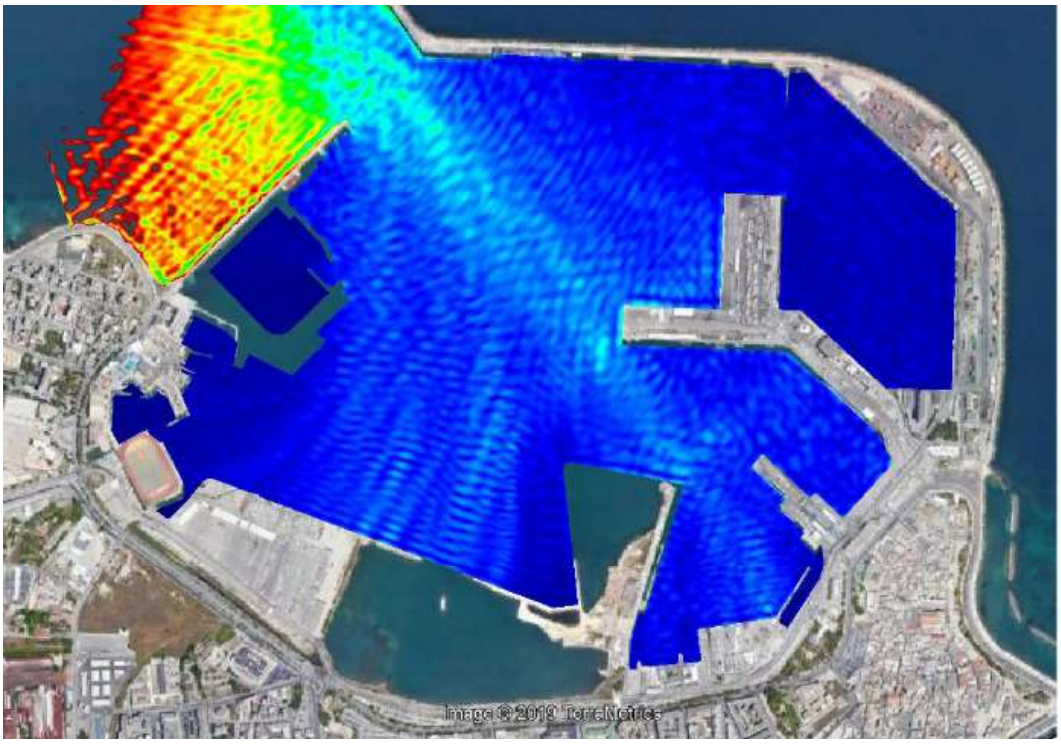
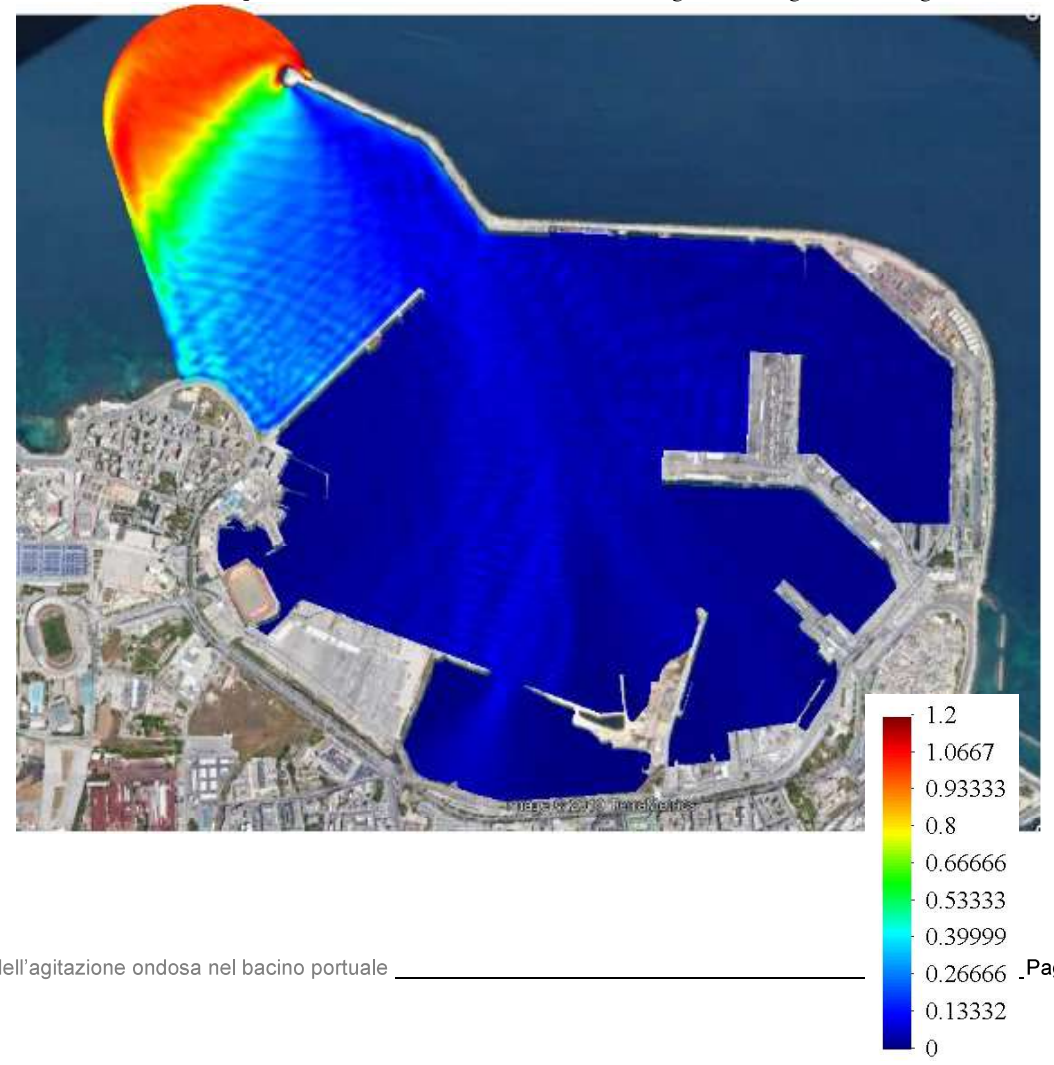


Figura 70. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 8 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.



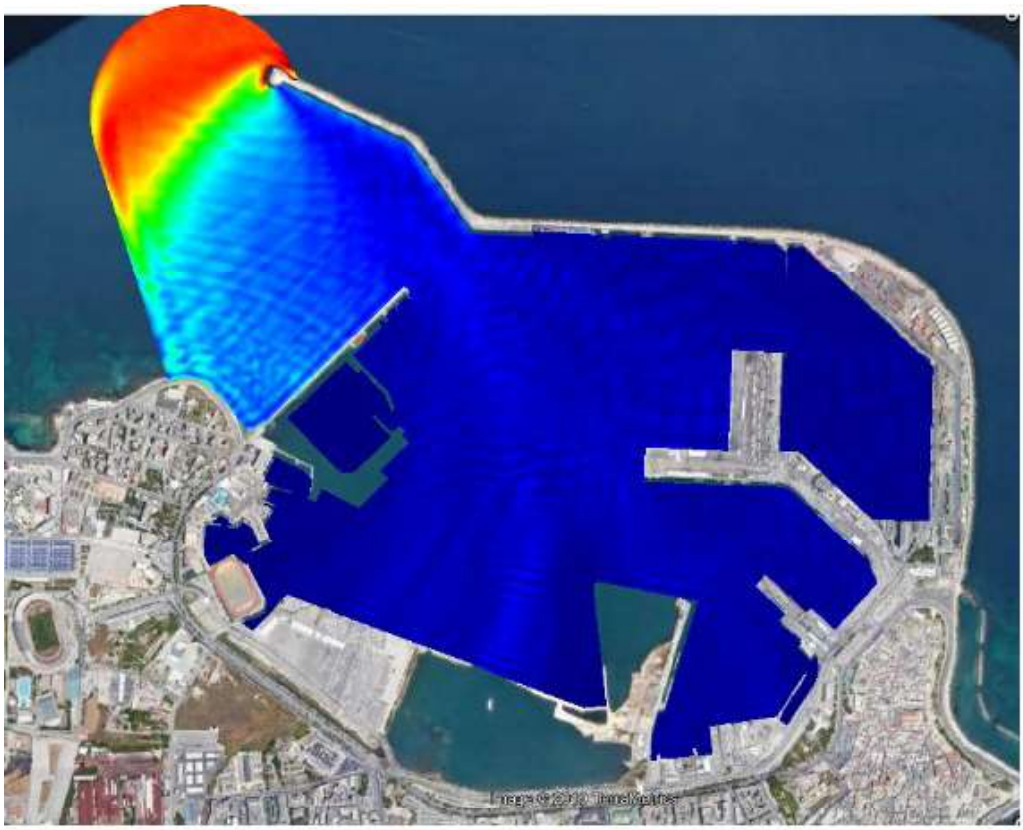
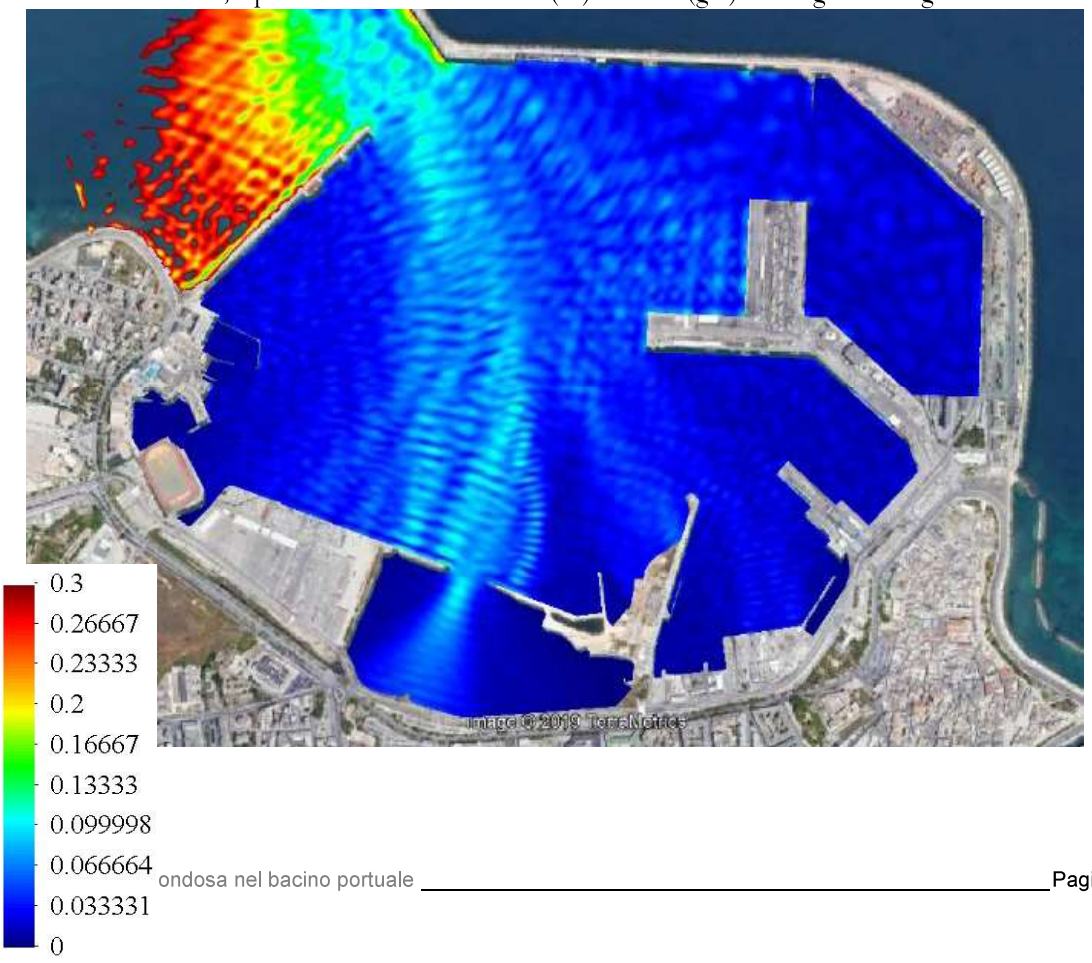


Figura 71. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.



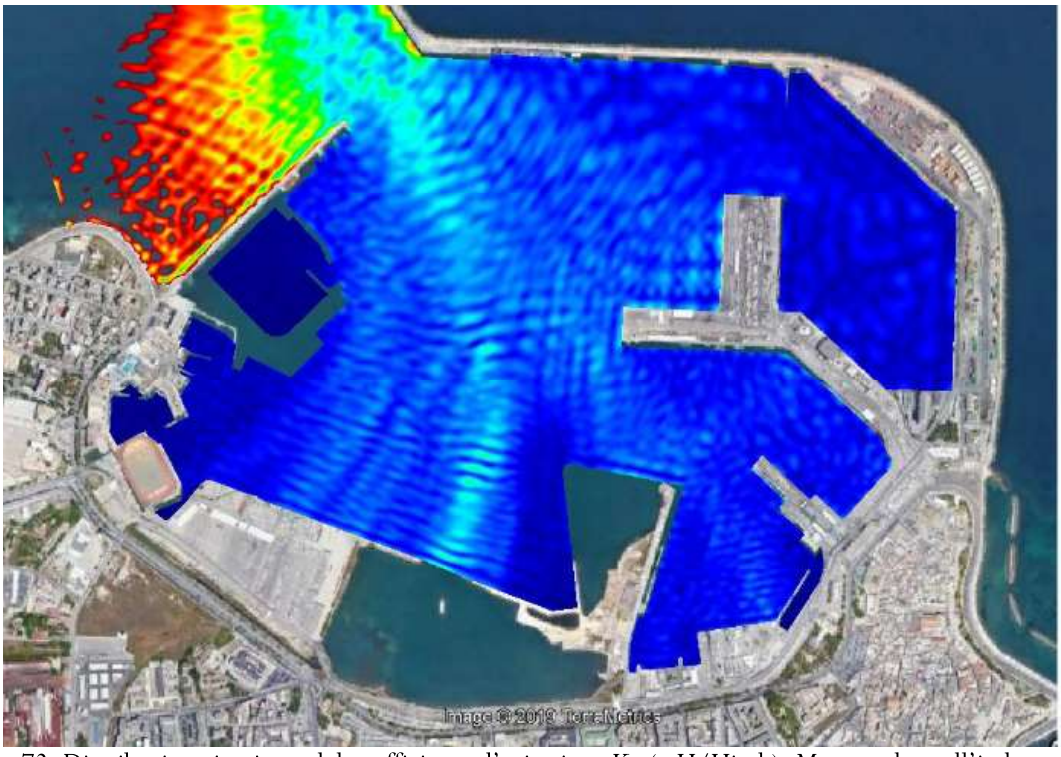
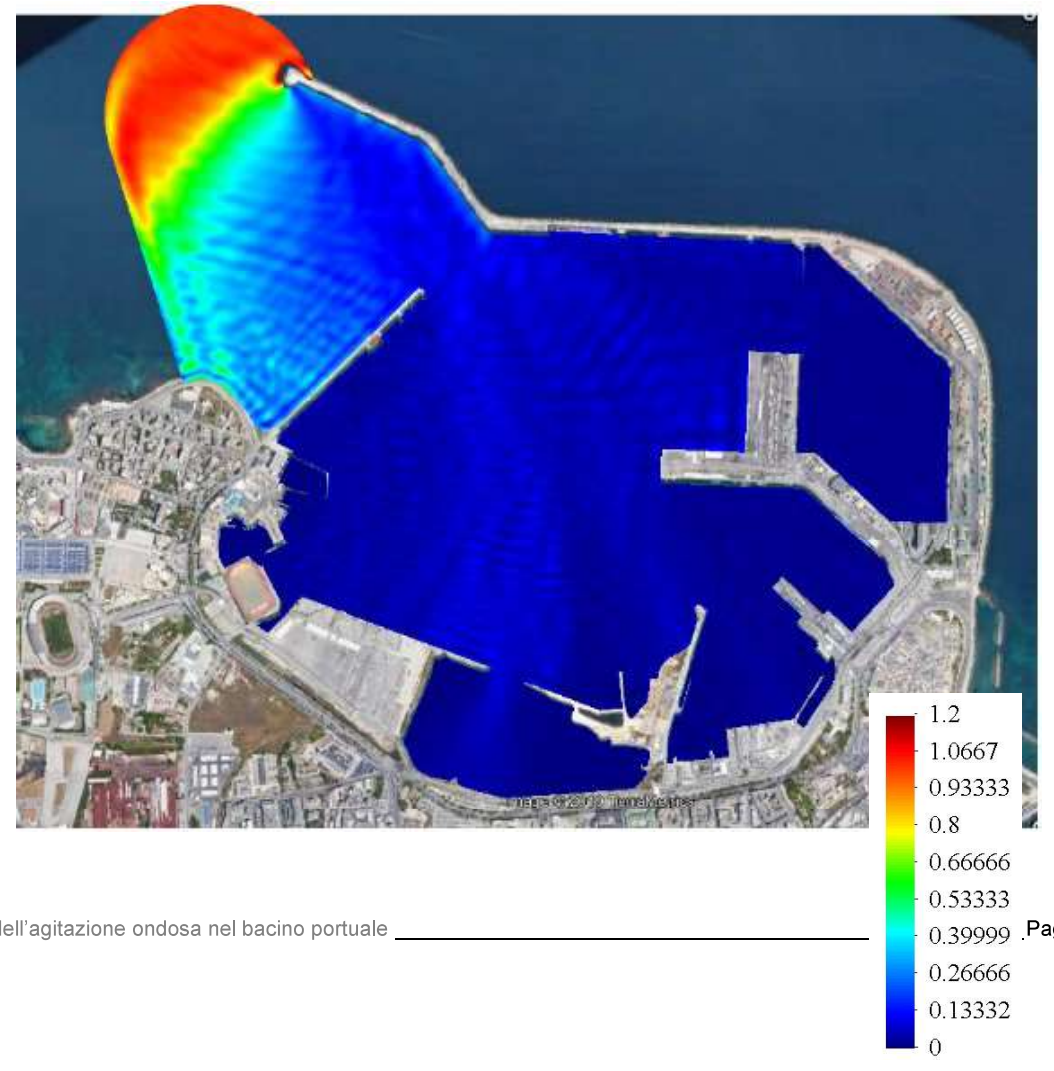


Figura 72. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 10 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.



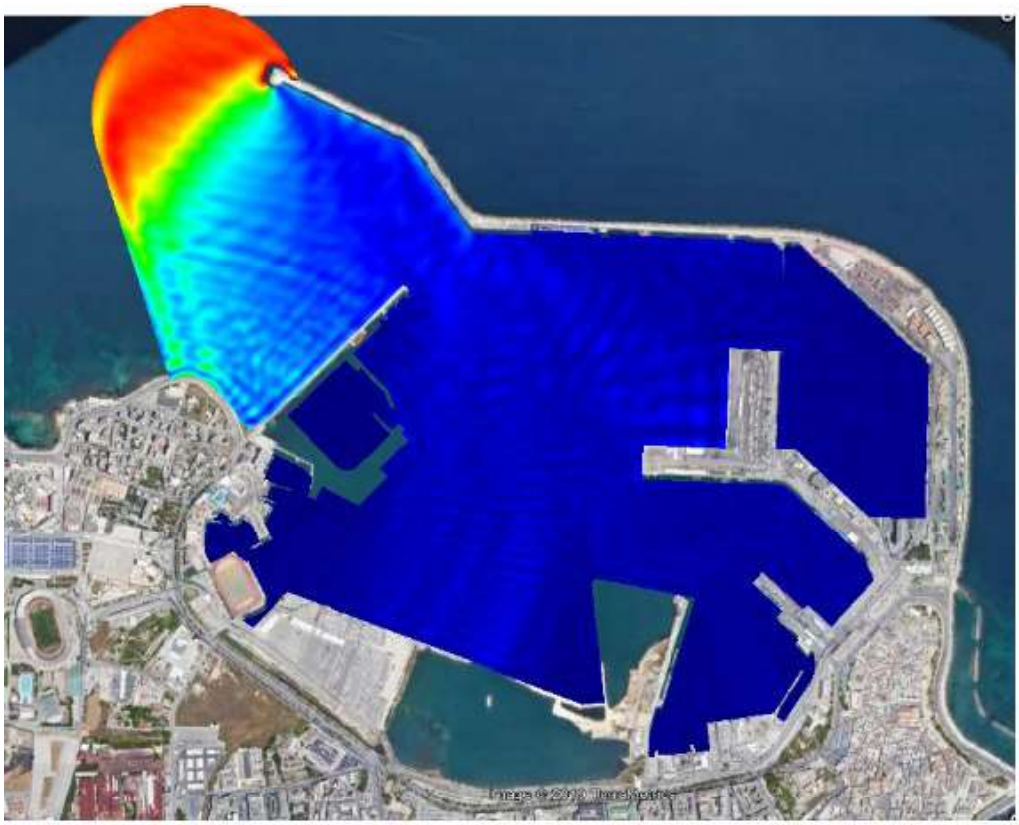
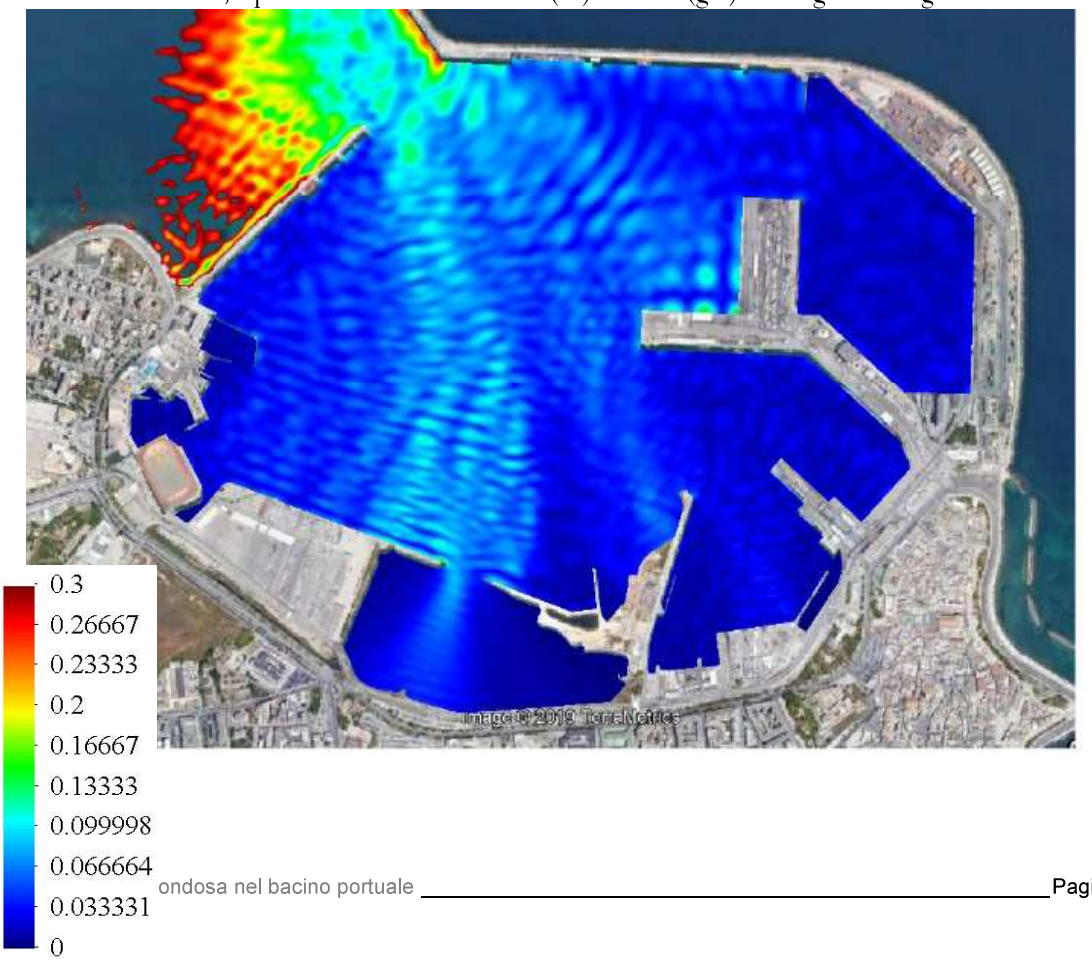


Figura 73. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine su larga scala.



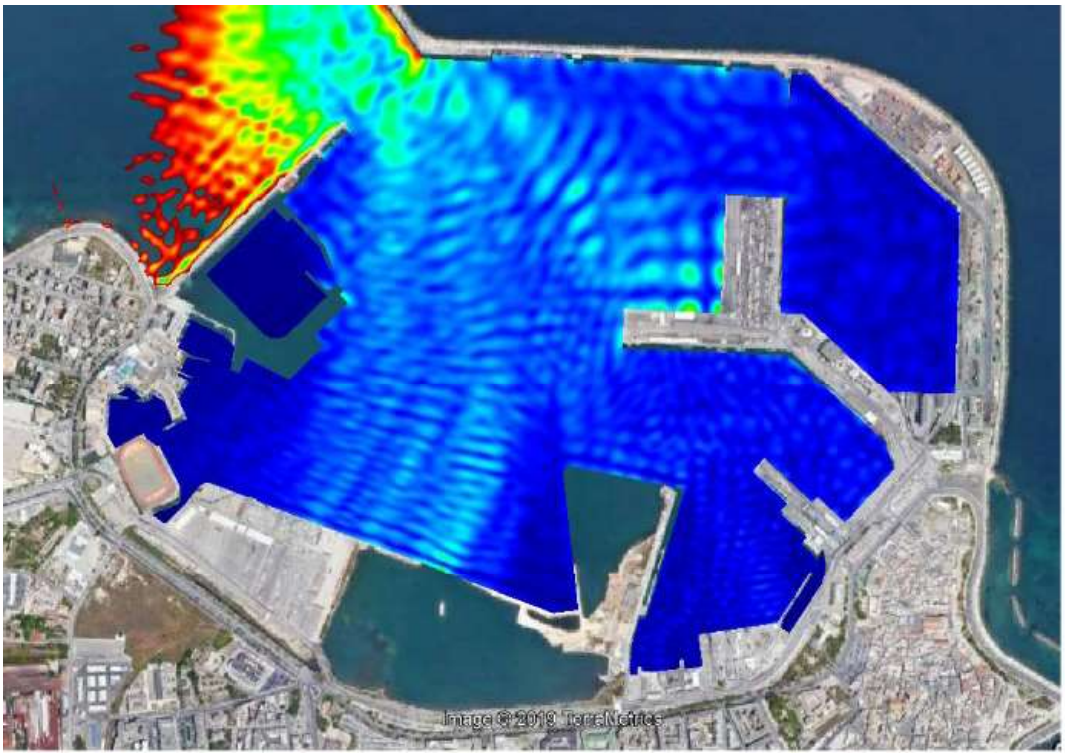


Figura 74. Distribuzione in pianta del coefficiente d'agitazione Ka (=H/Himb). Moto ondoso all'imboccatura: Dir =40°N, Tp = 12 s. Situazione attuale (su) e futura (giù). Immagine di dettaglio.

Bari, dicembre 2019

(prof. ing. Giuseppe R. T

APPENDICE B

Descrizione del modello di agitazione ondosa portuale MAP

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Características básicas del modelo

El código *MAP* es un modelo matemático de propagación de oleaje sobre un dominio físico arbitrario con batimetría irregular. Este modelo reproduce de forma combinada los fenómenos más relevantes asociados a la propagación del oleaje, como son el "shoaling", la refracción, la difracción y la reflexión, junto con otros de carácter no lineal, como son la fricción por fondo, la rotura del oleaje o la dispersión por amplitud.

El modelo está basado en la ecuación "mild-slope", obtenida por Berkhoff (1972), que rige la propagación de ondas lineales de gravedad en áreas de pendiente suave, aunque como demostró Booij en 1983 su validez se extiende hasta pendientes del fondo 1:3, no obstante la ecuación "mild-slope" ha sido extendida por Chandrasekera and Cheung (1997) para reducir la limitación de pendientes suaves (*mild-slope*), mediante la inclusión de términos en los que se tiene en cuenta tanto la curvatura del fondo como los gradientes de las batimétricas, para su aplicación sobre cualquier tipo de dominio batimétrico.

1.2. Aplicaciones del modelo

Las características del problema de contorno en el que se basa el modelo, así como el método numérico de resolución, hacen que éste se comporte de manera óptima sobre áreas reducidas y contornos cerrados, debido, por un lado, a las limitaciones, de tipo numérico existentes en la actualidad, sobre las necesidades de un número mínimo de elementos por longitud de onda (Resuelve la superficie libre), y por otro, al tipo de condiciones de contorno, de carácter natural para el funcional, para contornos cerrados. No presenta ningún tipo de limitación relativa al ángulo de incidencia del oleaje, por lo que un mismo dominio computacional puede ser utilizado para un amplio rango de direcciones posibles del oleaje sin tener que disponer de otra malla computacional, con la consiguiente redefinición de los datos batimétricos y pérdida de tiempo que ello supone.

De entre las aplicaciones del modelo *MAP* cabe destacar:

⇒ Propagación del oleaje en mar abierto, siempre en áreas no muy extensas (debido a las limitaciones de tipo numérico anteriormente citadas).

⇒ Propagación del oleaje en el interior de puertos y bahías, al reproducir las reflexiones del oleaje así como la interferencia de trenes de ondas.

⇒ Estudio del fenómeno de la resonancia en puertos, aprovechando la condición de contorno de radiación.

⇒ Acoplamiento a un modelo de propagación del oleaje (e.g. PROPS), reduciendo de esta manera las dimensiones del dominio computacional necesario para el estudio de la propagación del oleaje.

1.3. Limitaciones del modelo

Las más importantes limitaciones del modelo se pueden resumir en:

- Todas las asociadas a teoría lineal del oleaje.

- Limitaciones asociadas al tamaño del dominio computacional, no pudiéndose abordar grandes extensiones (limitación siempre relativa a la capacidad computacional de la que se disponga.). Esta limitación está relacionada con la necesidad de un número mínimo de nodos por longitud de onda, que oscila entre 10 y 12.

MAP no es un modelo de oleaje irregular. En tal caso, el modelo considera un tren de olas monocromático con una altura de ola igual a H_s, un periodo, asociado al pico del espectro frecuencial T_p, y una dirección correspondiente al pico del espectro direccional α_p . Sí considera, sin embargo, las características propias de rotura de oleaje irregular, trabajando con probabilidades de rotura Q_p. En este punto cabe comentar la existencia de una versión del modelo *MAP,* basado en la ecuación "mild-slope", para oleaje irregular, que se describe más adelante.

2. DESCRIPCIÓN TÉCNICA

2.1. Modelo matemático

2.1.1. La ecuación "mild-slope"

Tomando como origen las ecuaciones básicas de la hidrodinámica, las ecuaciones de conservación de la masa y de la cantidad de movimiento, y asumiendo una serie de hipótesis simplificativas, que hagan abordable el problema con el que nos enfrentamos: entre las que cabe destacar las de suponer ondas lineales, oleaje regular y monocromático así como un fondo de pendiente suave, se obtiene la ecuación "mild-slope", derivada por Berkhoff (1972):

$$\vec{\nabla} \cdot (CC_g \vec{\nabla}\phi) + k^2 CC_g \, \phi = 0$$

Donde:

-ϕ (x,y) es el potencial complejo de velocidades en el plano horizontal

-C(x,y) es la celeridad de fase (C=L/T)

-C_g(x,y) es la celeridad de grupo, o velocidad de propagación de la energía, que se relaciona con la anterior mediante la expresión:

$$C_g = \frac{C}{2}(1 + \frac{2Kh}{\text{senh}(2kh)})$$

- k(x,y) es el factor de separación, relacionado con la frecuencia angular ω por medio de la relación de dispersión:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh)$$

- g es la aceleración de la gravedad

- h(x,y) es el calado

- x e y son las coordenadas de un punto genérico en el plano horizontal

- $\vec{\nabla}$ es el gradiente en el plano (x,y)

2.1.2. Las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno disponibles en la actualidad se agrupan en tres grandes familias:

- Contornos de oleaje incidente:
  - Contorno incidente-radiante.
  - Condición entrante-saliente.
  - Simulador de pala generadora de oleaje no absorbente.
  - Contorno incidente sobre domino reflejante.

- Contornos abiertos:
  - Absorción total:
    - Con desconocimiento del ángulo de salida (Método iterativo).
    - Con conocimiento del ángulo de salida.
  - Absorción parcial:
    - Con desconocimiento del ángulo de salida (Método iterativo).
    - Con conocimiento del ángulo de salida.

- Contornos cerrados:
  - Reflexión total.
  - Reflexión parcial:
    - Con desconocimiento del ángulo de salida (Método iterativo).
    - Con conocimiento del ángulo de salida.

La solución a la ecuación diferencial de tipo elíptico se debe obtener en un dominio Ω, de profundidad variable, limitado por un contorno Γ, a lo largo de todo el cual se han de definir unas condiciones de contorno, debido a la naturaleza elíptica de la ecuación.

Sobre los contornos Γ_2, totalmente reflejantes, se exige velocidad normal al contorno nula, o lo que es lo mismo, que la derivada del potencial de velocidades en la dirección de la perpendicular exterior al contorno $\vec{n}$ sea igual a 0:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{en} \quad \Gamma_2$$

En los contornos parcialmente reflejantes o absorbentes Γ_3, la reflexión no es total, por los que se impone un cierto flujo de potencial de velocidades en dirección normal al contorno:

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} - \left(\left(\frac{\vec{\nabla} H \cdot \vec{n}}{H} \right) - ik \frac{R-1}{R+1} \cos\alpha \right) \phi = 0 \quad \text{en} \quad \Gamma_3$$

donde H, es la altura de ola, α es el ángulo de la dirección de propagación del oleaje con la normal exterior $\vec{n}$, para la determinación del cual habrá de realizarse un proceso iterativo de convergencia, en el que se considera el coeficiente de reflexión parcial y R es el coeficiente de reflexión parcial.

Un último tipo de contorno Γ_1, son los contornos por donde penetra el oleaje, que limitan con un dominio exterior $\overline{\Omega}$, de profundidad constante. La condición exigida en éstos contornos es la de continuidad entre ambos dominios $(\Omega, \overline{\Omega})$ de la altura de ola y de la velocidad, o expresadas en términos del potencial de velocidades, de éste y de su derivada en la dirección normal al contorno, respectivamente.

El potencial de velocidades en el dominio exterior $\overline{\Omega}$, se expresa como suma de otros dos, uno incidente, solución de la ecuación de Helmotz (caso particular de la ecuación "mild-slope" para profundidad constante), y otro dispersado por el dominio interior, procedente de las posibles reflexiones internas. El potencial incidente se puede expresar como:

$$\Phi_i = \frac{igH}{2\omega} e^{ik_0(x\cos\beta + y\,\mathrm{sen}\,\beta)}$$

donde i es la unidad compleja, k_0 es el factor de separación para la profundidad constante en el dominio exterior, y β es el ángulo que forma con el eje de las x la onda incidente.

El potencial ϕ_s dispersado hacia el exterior por el dominio interior ha de cumplir tanto la ecuación de Helmotz, como la condición de radicación de Somerfeld, por la cual debe anularse en el infinito. La expresión escogida para el potencial es la propuesta por Berkhoff (1972), por la que éste se escribe como una suma finita de m fuentes, ponderadas por el mismo número de intensidades μ_j, desconocidas a priori, e incógnitas de nuestro problema.

$$\phi_s = \sum_{j=1}^{m} \mu_j \frac{1}{2i} H_o(k_0 r_j)\ \Delta S_j$$

Las H_o son las funciones de Haenkel de orden cero, ΔS_j es la longitud de contorno Γ_1 asociado a la fuente *j* y r_j es la distancia de un punto genérico a la fuente *j*.

Al estar trabajando con una distribución finita y discreta de fuentes a lo largo del contorno, se exigen las condiciones de continuidad, anteriormente expuestas, en los puntos *j* donde éstas se encuentren.

$$\phi(j) = \phi_i(j) + \sum_{h=1}^{j-1} \mu_h \frac{1}{2i} H_o(k_0 r_h)_j \Delta S_h + \sum_{h=j+1}^{m} \mu_h \frac{1}{2i} H_o(k_0 r_h)_j \Delta S_h \quad \text{en} \quad \Gamma_1$$

$$\left.\frac{\partial \phi}{\partial n}\right|_j = \left.\frac{\partial \phi_i}{\partial n}\right|_j + \mu_j + \sum_{h=1}^{j-1} \mu_h \frac{1}{2i} \left.\frac{\partial H_o(k_0 r_h)}{\partial n}\right|_j \Delta S_h + \sum_{h=j+1}^{m} \mu_h \frac{1}{2i} \left.\frac{\partial H_o(k_0 r_h)}{\partial n}\right|_j \Delta S_h \quad \text{en} \quad \Gamma_1$$

2.1.3. Disipación de energía por fricción con el fondo

A partir de la ecuación de conservación energética:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{C}_g\ \mathrm{E}) + D = 0$$

se pueden simular las pérdidas de energía por la fricción con el fondo a partir del término adicional D, propuesto por Booij (1981), quedando la ecuación “mild-slope” de la forma:

$$\vec{\nabla} \cdot (CC_g \vec{\nabla} \phi) + k^2 CC_g\ \phi + i\omega W \phi = 0$$

evaluándose el término *W*, después de Kostense et al. (1986), como:

$$W = \frac{4 f_w u_{orb}}{3\pi h \cosh^2(kh)}$$

$$u_{orb} = \frac{\omega H}{2\,\mathrm{senh}(kh)}$$

$$f_w = e^{-6.3+5.5\left(\frac{k_n}{u_{orb}}\right)^{0.2}} < 0.3$$

donde $k_n = 2.5 D_{50}$ es el parámetro de rugosidad de Nikuradse y D_{50} es el diámetro medio del grano.

2.1.4. Disipación de energía por rotura del oleaje

Al igual que en el caso de la disipación por la fricción con el fondo, las pérdidas de energía debidas a la rotura se evalúan por medio de un término adicional *W* en la ecuación "mild-slope". Este término fue propuesto por Battjes & Janssen (1978) para oleaje irregular:

$$W = \frac{\alpha}{\pi}\omega Q_b \frac{1}{b^2}$$

$$Q_b = e^{\left(-\frac{[1-Q_b]}{b^2}\right)}$$

$$b = \frac{H}{\sqrt{2}}\frac{1}{H_m}$$

$$H_m = \frac{0.88}{k}tanh\left(\frac{\gamma_o}{0.88}kh\right)$$

El término α es variable con un valor standard de 1. H es la altura de ola significante sin considerar la rotura, y H_m es la máxima altura de ola permitida según el criterio de rotura de Miche, donde γ_o es el parámetro de rotura, con un valor standard de 0.8.

2.1.5. Dispersión no-lineal por amplitud

Como su nombre indica este fenómeno hace referencia la dependencia de la amplitud de las olas en la dispersión espacial del oleaje. Para tenerlo en cuenta se utiliza la relación de dispersión no lineal propuesta por Kirby and Dalrymple (1984):

$$\omega^2 = gk(1 + f_1(kh)\varepsilon^2 D)\tanh(kh + \varepsilon f_2(kh))$$

$$f_1 = \tanh^5(kh)$$

$$f_2 = \left(\frac{kh}{\text{senh}(kh)}\right)^4$$

2.1.6. Extensión a batimetrías irregulares

La ecuación "mild-slope" puede ser extendida para la aumentar su rango de aplicación a áreas geográficas con batimetrías irregulares y no limitándose a dominios de pendiente suave (Chandrasekera and Cheung, 1997). La extensión de la ecuación está basada en la consideración de los gradientes (∇h) y la curvatura (∇^2h) de las batimétricas en la

derivación de la ecuación, apareciendo de este modo, unos términos adicionales en la misma $g_1(kh)$, y $g_2(kh)$:

$$\vec{\nabla}\cdot(CC_g\vec{\nabla}\phi)+k^2CC_g\ \phi+(g_1(kh)\nabla^2h+g_2(kh)(\vec{\nabla}h)^2k)g\phi=0$$

siendo

$$g_1(kh)=\frac{1}{2}\left(\frac{\vec{\nabla}CCg\cdot\vec{\nabla}h}{g|\vec{\nabla}h|^2}-\frac{1}{\cosh^2(kh)}\right)$$

$$g_2(kh)=\frac{1}{6\cosh^2(kh)\left[2kh+\sinh(2kh)\right]^3}\cdot(8(kh)^4+16(kh)^3\sinh(2kh)-$$
$$-9\sinh^2(2kh)\cosh(2\text{kh})+12(\text{kh})\left[1-2\sinh^4(kh)\right]\left[kh+\sinh(kh)\right])$$

2.2. Esquema numérico de resolución

2.2.1. Formulación variacional

El problema de encontrar un potencial de velocidades ϕ que cumpla la ecuación "mild-slope" en el dominio de interés Ω, con sus correspondientes condiciones de contorno en la frontera Γ, se puede demostrar, mediante el teorema de Euler del cálculo variacional, que es equivalente a encontrar un ϕ que estabilize el siguiente funcional:

$$\tau=\iint_{\Omega}\frac{1}{2}\left(CC_g(\vec{\nabla}\phi)^2-\frac{\omega^2C_g}{C}\phi^2\right)d\Omega-\int_{\Gamma_1}CC_g\left(\frac{\partial\phi}{\partial n}\right)\phi\,d\Gamma+\int_{\Gamma_3}\frac{1}{2}CC_gf_i\phi^2\,d\Gamma$$

El resultado de la minimización de este funcional es el mismo que el de la resolución del anterior problema de contorno, donde la condición de reflexión total se cumple como condición natural y f_i es el término procedente de los contornos parcialmente reflejantes, faltando únicamente por imponer la condición de continuidad en los dominios interior Ω y exterior $\overline{\Omega}$.

2.2.2. El método de los elementos finitos (MEF)

El método de resolución utilizado es un híbrido entre el Método de los Elementos Finitos (MEF), utilizado para el dominio interior Ω, y la solución analítica del dominio exterior $\overline{\Omega}$.

Se discretiza el interior del dominio Ω en elementos triangulares, sobre cada uno de los cuales se aproxima el potencial ϕ mediante funciones de interpolación de tipo lineal:

$$\phi^e=N_i^e(x,y)\phi_i^e+N_j^e(x,y)\phi_j^e+N_k^e(x,y)\phi_k^e$$

donde los coeficientes $\phi^e_{i,j,k}$ son los valores del potencial en los nodos del elemento *e*, y las funciones $N^e_{i,j,k}$ son las funciones de forma del elemento triangular de tres nodos.

$$N^e_{i,j,k} = A^e_{i,j,k} + B^e_{i,j,k}x + C^e_{i,j,k}y$$

$$A^e_{i,j,k} = \frac{-(y^e_{j.k.i}x^e_{k,i,j} - x^e_{j,k,i}y^e_{k,i,j})}{2\Delta^e}$$

$$B^e_{i,j,k} = \frac{(y^e_{j.k.i} - y^e_{k,i,j})}{2\Delta^e}$$

$$C^e_{i,j,k} = \frac{-(x^e_{j,k,i} - x^e_{k,i,j})}{2\Delta^e}$$

Discretizado el dominio se procede con la minimización del funcional elemento a elemento. Esta minimización se lleva a cabo anulando las derivadas del funcional respecto a los valores nodales del potencial $\phi^e_{i,j,k}$, resultando, de este modo, tres ecuaciones de tipo lineal para cada elemento, que ensamblamos al final del proceso en un sistema globalizado en el que únicamente resta por añadir las condiciones de continuidad en los contornos Γ_1.

3. EXTENSIÓN DEL MODELO PARA OLEAJE IRREGULAR

3.1. Descripción del oleaje irregular

En este apartado se describe brevemente le extensión del modelo MAP para la propagación de oleaje irregular, tanto en frecuencias como en direcciones.

En los apartados anteriores, se ha tratado con oleaje regular, en el que se define un único periodo, altura y dirección. (i.e. monocromático y unidireccional). Sin embargo, a partir de una simple observación de la superficie libre del mar, se puede apreciar una situación bastante irregular en la que se hace complicado definir una serie de parámetros del oleaje como son la altura de ola, longitud, dirección o periodo.

El modo más sencillo para describir un estado de mar irregular es asumir la hipótesis de que la superficie libre del mar (u otra propiedad del oleaje) puede ser descompuesta en un número finito de trenes de oleaje con diferentes frecuencias y direcciones: (Figura 1)

$$\zeta = \sum_i \sum_j a_{ij} \cos\left[\left(k_i \cos\alpha_j x + k_i sin\alpha_j y - \omega_i t + \theta_{ij}\right)\right]$$

donde a_{ij} y θ_{ij} son, respectivamente, las amplitudes y las fases de las componentes de oleaje con frecuencia ω_i (o número de onda k_i) y dirección α_j. Los valores de a_{ij} y θ_{ij} son en este caso, variables aleatorias.

El estado de mar puede ser descrito mediante el espectro direcciónal $S(\omega,\alpha)$, definido como la densidad de energía en términos de frecuencia y direcciones (Figura 2). La energía comprendida (divida por ρg), en el intervalo comprendido desde ω_i a $\omega_i+\Delta\omega$ y desde α_j a $\alpha_j+\Delta\alpha$, $a_{ij}^2/2$, puede ser calculada mediante $S(\omega,\alpha)\Delta\omega\Delta\alpha$.

El espectro, unidimensional, de frecuencias, $S(\omega)$, se define como la densidad de energía en términos únicamente de frecuencia: $S(\omega)\Delta\omega = a_{ij}^2/2$. Las formas espectrales más comúnmente usadas en aplicaciones de ingeniería son los espectros Pierson-Moskowitz (Pierson and Moskowitz, 1964), el espectro JONSWAP (Hasselman *et al*, 1973) y el espectroTMA (Bouws *et al*, 1985).

Por simplicidad, el espectro direccional $S(\omega,\alpha)$ se suele expresar como el producto del espectro de frecuencias, $S(\omega)$, y una función de dispersión direccional, $D(\alpha)$,el cual satisface la siguiente relación:

$$\int_{-\pi}^{\pi} D(\alpha)\, d\alpha = 1$$

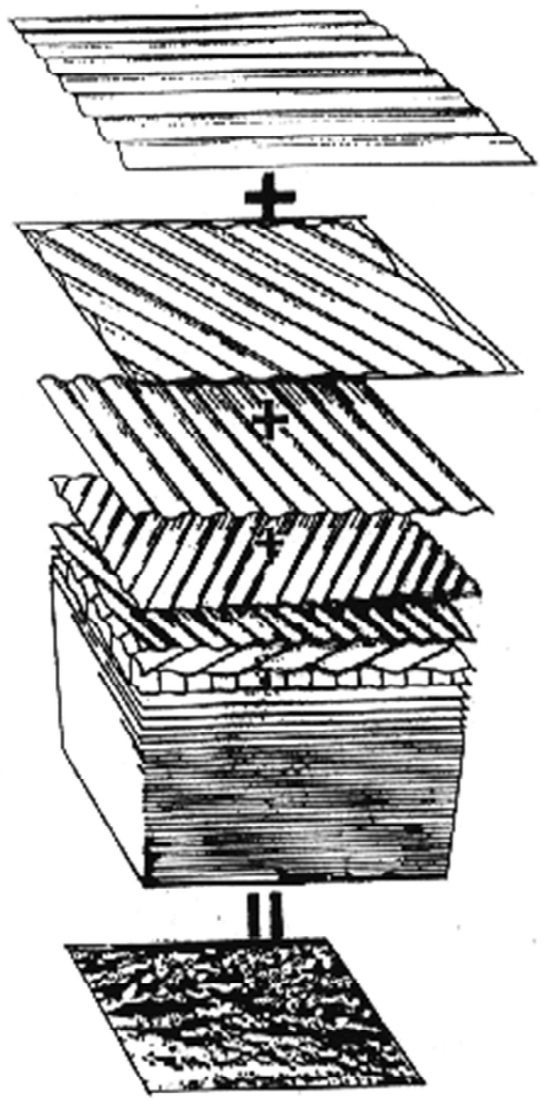


Figura 1. Descripción de un estado de mar irregular como la suma de diferentes componentes con diferentes periodo y dirección.

Típicas formas espectrales para la función de dispersión direccional son la de Mitsuyasu-(Mitsuyasu *et al*, 1975) y la función normal (Borgman, 1985).

Aunque técnicas estándar, como el método de la Transformada de Fourier (FFT) (Cooley and Tukey, 1965), pueden ser utilizadas para calcular el espectro frecuencial a partir de series temporales de la elevación de la superficie libre registradas en una boya, el espectro direccional, $S(\omega,\alpha)$, o la función de dispersión direccional, $D(\alpha)$, necesitan mucha más información (e.g. un conjunto de boyas de oleaje), asimismo las teorías desarrolladas para el tratamiento y procesado de los datos, en el caso de información direccional, no son sencillas (e.g. Haug and Krogstad (1993) and Krogstad *et al* (1997)).

3.2. Extensión del modelo para oleaje irregular

Tomando como referencia la ecuación lineal de propagación del oleaje y asumiendo que el oleaje puede ser expresado como composición de un número finito de componentes regulares (Ver Apartado anterior) la propagación de un oleaje irregular se puede estudiar, despreciando los efectos propios de interacción entre ondas, como la superposición de los resultados obtenidos, en términos del potencial de velocidades o de la amplitud de la superficie libre, para las diferentes propagaciones de las componentes regulares que formaban el estado de mar inicial.

Expresando la superficie libre del mar para un oleaje irregular $\eta(x,y,t)$ como suma de las distintas componentes $\eta_i(x,y,t)$:

$$\eta(x,y,t) = \eta_1(x,y,t) + \eta_2(x,y,t) + \eta_3 x,y,t) + ... + \eta_n(x,y,t)$$

y substituyendo en la ecuación "mild-slope", se obtiene,

$$\vec{\nabla} \cdot (\mathrm{CC_g} \vec{\nabla} \eta) + \mathrm{k}^2 \mathrm{CC_g}\ \eta = 0$$

y a partir de la linealidad de la misma:

$$\sum_i (\vec{\nabla} \cdot (\mathrm{CC_g} \vec{\nabla} \eta_i) + \mathrm{k}^2 \mathrm{CC_g}\ \eta_i = 0)$$

siendo esta igualdad valida para toda descomposición que podamos realizar de la superficie libre, por lo que cada componente por separado habrá de ser solución de la ecuación "mild-slope" correspondiente.

La suma o composición final se realiza en términos energéticos, es decir de altura de ola:

$$H_{rms} = \sqrt{\left(\sum_i H_{rma_i}^2 \right)}$$

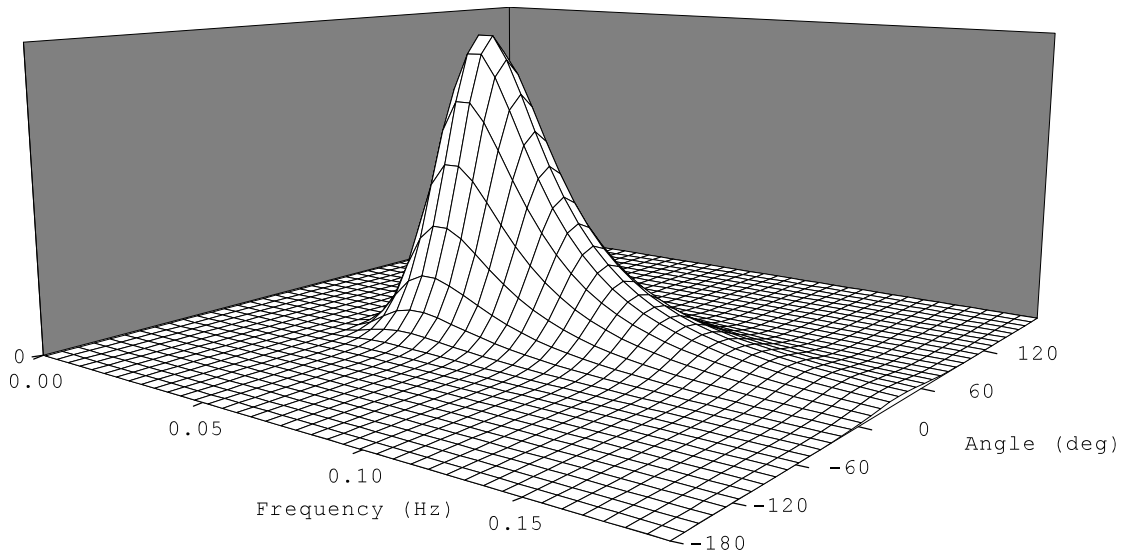


Figura 2. Forma típica de un espectro direccional S(ω,α).

4. VALIDACIÓN DEL MODELO PARA EL ESTUDIO DE RESONANCIA POR ONDAS LARGAS

En este apartado se realiza la validación del modelo en el marco de las ondas largas. Cabe reseñar que este apartado de validación hace referencia exclusivamente al fenómeno de resonancia y propagación de ondas largas. No obstante, se puede disponer de una extensa validación del modelo, en todos sus ámbitos de aplicabilidad (Moreno 1996).

El caso que nos disponemos a estudiar es el caracterizado por un dominio rectangular para el que Lee (1969) obtuvo solución analítica. El dominio se compone de una zona de generación de oleaje, representando mar abierto, y una pequeña dársena interior en la que se amplifica el oleje al existir una cierta acumulación de energía y una costa totalmente reflejante que produce una onda estacionaria o "clapotis" en la zona de mar abierto, dando lugar a la existencia de nodos (puntos con amplitud nula de la oscilación y desplazamiento máximo) y antinodos (puntos con amplitud máxima y desplazamiento nulo).

El problema de encontrar el factor de amplificación en una dársena rectangular con paredes totalmente reflejantes tiene solución analítica (Lee, 1971). Si se comparan los datos obtenidos en los experimentos realizados con modelo físico con los obtenidos por teoría lineal podemos advertir diferencias importantes. Mientras se mantienen los modos propios de oscilación los factores de amplificación medidos en laboratorio, sobre todo para el primer modo de oscilación son inferiores a los proporcionados por teoría lineal. Existen métodos para reproducir lo que sucede en la realidad basados en la consideración tanto de las pérdidas energéticas debidas a la fricción con el fondo, como de contornos parcialmente reflejantes (Chen 1986). La figura 3 representa los valores medidos en laboratorio y los obtenidos mediante modelo numérico con coeficientes de reflexión del 98%, e incorporando la fricción con el fondo.

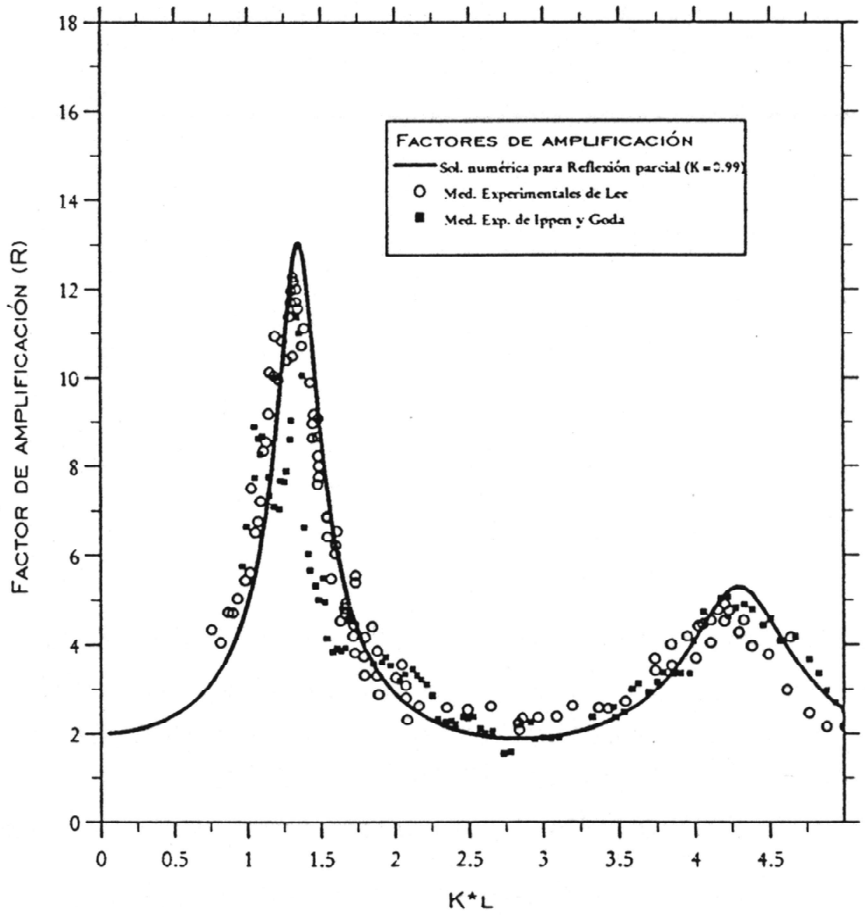
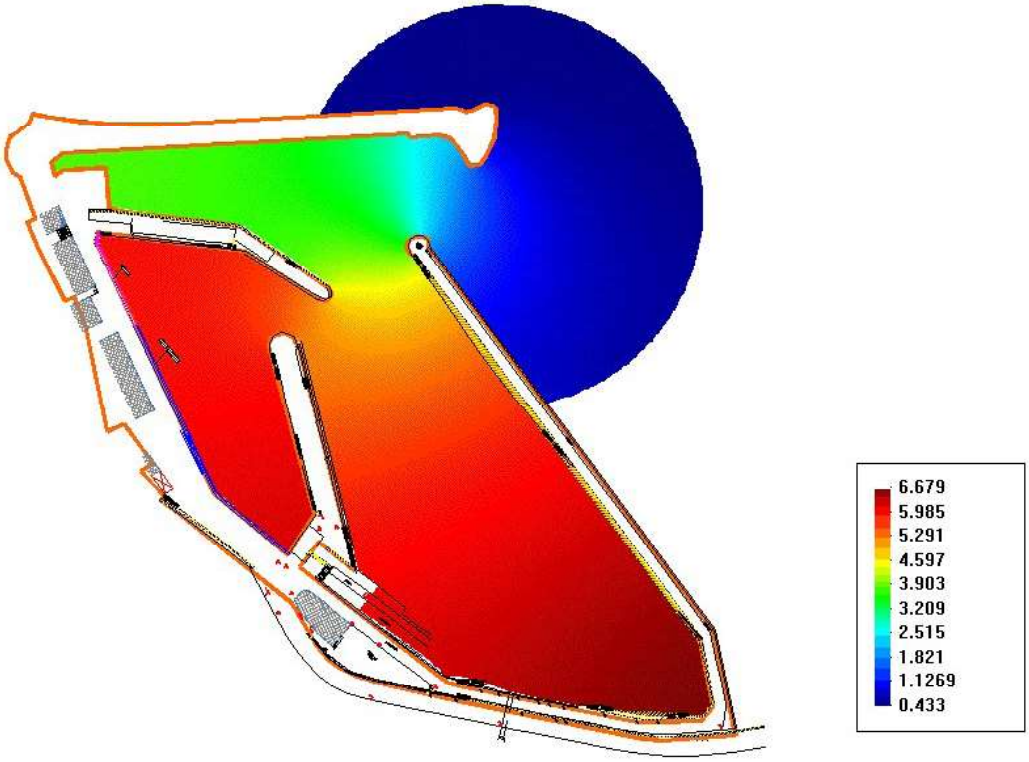
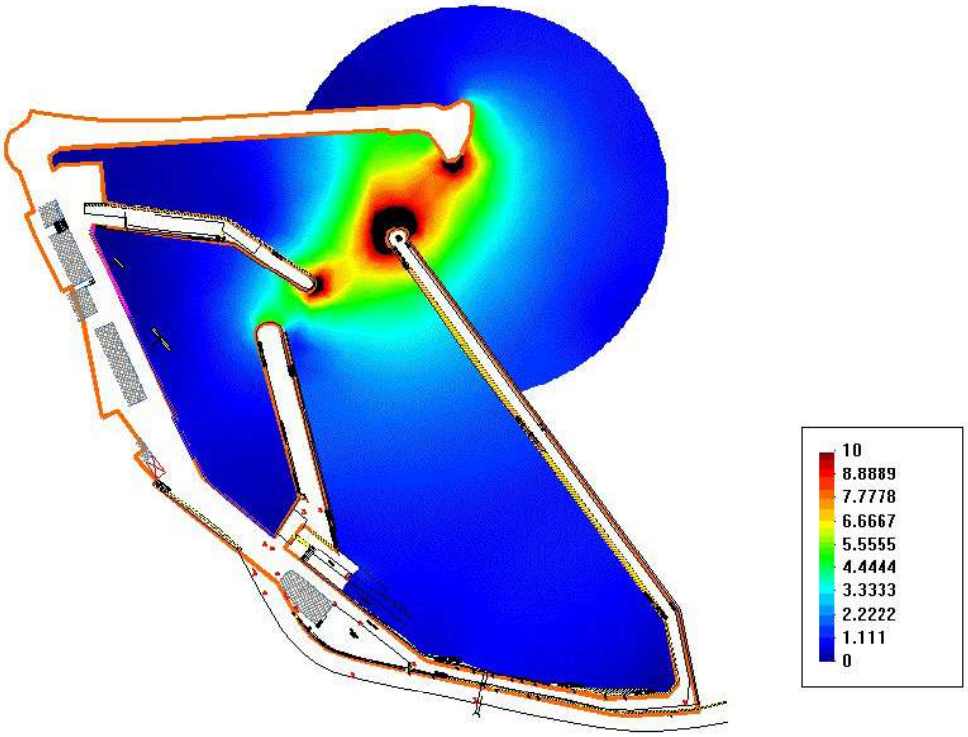


Figura 3. Factores de amplificación por resonancia de ondas largas en una dársena rectangular. Comparación del modelo MAP con datos experimentales (Ippen and Goda, 1963; Lee, 1971).

A título ilustrativo de la aplicación del modelo MAP a casos reales, en la Figura 4 se muestra la distribución de los coeficientes de amplificación de las oscilaciones verticales y horizontales en el puerto de Elantxobe (Pais Vasco, España) asociados al modo principal de resonancia del puerto.



Amplificación de la superficie libre (oscilaciones verticales)



Amplificación de la velocidad orbital (oscilaciones horizontales)

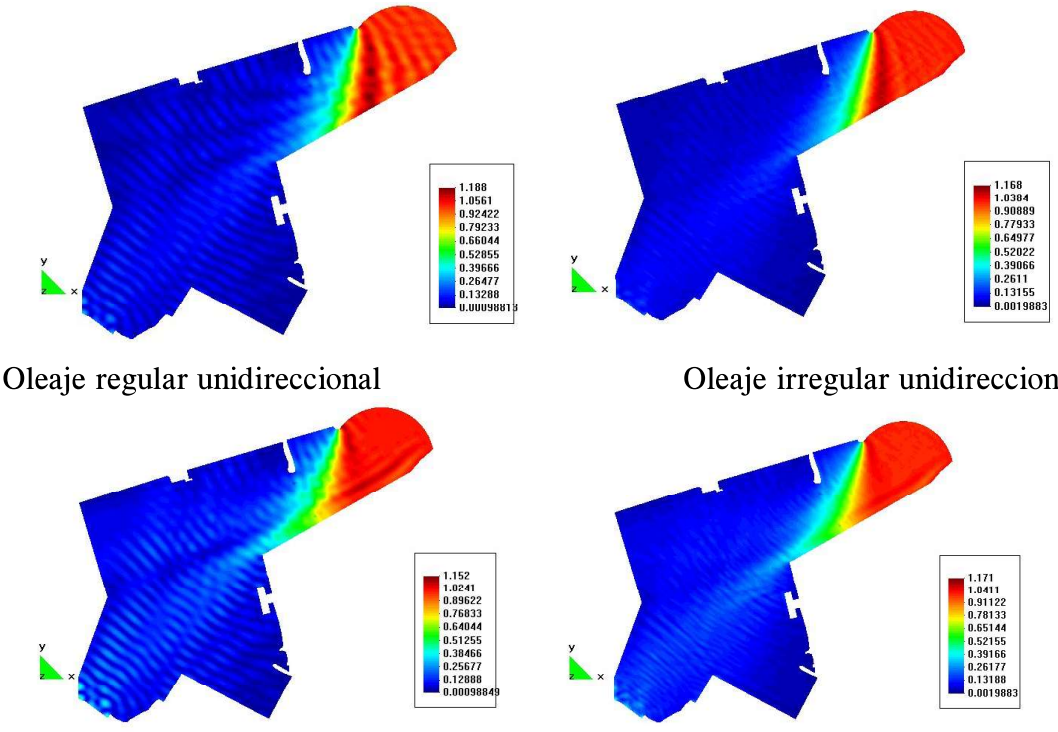
Figura 4. Modo principal de resonancia del Puerto de Elantxobe (Euskadi).

5. APLICACIÓN DEL MODELO IRREGULAR A UN CASO PRÁCTICO

Dado el carácter lineal de la ecuación en la que se basa el modelo, es posible simular la propagación de un oleaje irregular (en frecuencias y direcciones) mediante la superposición lineal de las soluciones obtenidas para un conjunto finito de componentes (*bins*) en que se divide el espectro de energía del oleaje.

La importancia de tener en cuenta los fenómenos de dispersión frecuencial y direccional se refleja en la Figura 5. En esta figura se muestra, para el Puerto de Barcelona, la distribución del coeficiente de agitación, definido como el cociente entre la altura de ola en un punto y la altura de ola incidente en la bocana, $Ka = H/H_{bocana}$, para 4 condiciones de oleaje distintas con iguales valores del periodo de pico y ángulo medio: oleaje regular (monocromático y unidireccional), oleaje regular direccional, oleaje irregular unidireccional y oleaje irregular direccional.

Los resultados obtenidos son un claro ejemplo de la influencia de la irregularidad del oleaje en la (inferior) modulación de la altura de ola frente a contornos reflejantes y la mayor penetración del oleaje debido a la dispersión direccional.



Oleaje regular unidireccional — Oleaje irregular unidireccional

Oleaje regular direccional — Oleaje irregular direccional

Figura 5. Distribución del coeficiente de agitación K_a para cuatro condiciones de oleaje con iguales valores del periodo de pico T_p y ángulo medio α: Oleaje regular, oleaje regular direccional, oleaje irregular unidireccional, y oleaje irregular direccional. Sector E30S, periodo de pico $T_p = 10$ s.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- **Battjes, J.A. and J.P.F.M. Janssen (1978).** "Energy loss and set-up due to breaking of random waves". *Proceedings of the 16 International Conference on Coastal Engineering*. Hamburg, Vol I: ASCE, New York.
- **Berkhoff, J.C.W. (1972).** Computation of combined refraction-diffraction. *Proc. 13th ICCE*, ASCE, Vancouver, Canada, pp. 471-490.
- **Booij, N. (1981).** "Gravity waves on water with non-uniform depth and current.", *Report Nº 13 th. Coastal Eng. Conference*. Chapter 24, ASCE.
- **Borgman, L.E. (1985).** Directional spectrum estimation for the S_{xy} gauges. *Tech. Report*, CERC, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA, 104 p.
- **Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W., and C. Vincent (1985).** Similarity of the wind wave spectrum in finite water depth. *J. Geophys. Res.*, 90 (C1), pp. 975-986.
- **Chandrasekera C.N. and Cheung, K.F. (1997)**. "Extended linear refraction-diffraction model". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. Vol 123. Nº 5. September/Octber 1997. ASCE.
- **Chen, H.S. (1986).** "Effects of bottom friction and boundary absorption on water wave scattering", *Applied Ocean Research, 8(2),* pp. 99-104.
- **Cooley, J.W. and J.W. Tukey (1965).** An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series, *Math. Comput.,* Vol. 19, pp. 297-301.
- **Hasselman,K. *et al*. (1973).** Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsche Hydr. Zeit.*, Reihe A (8), No. 12, 95 p.
- **Haug, O. and H.E. Krogstad (1993).** Estimation of directional spectra by ML/ME-methods. *Proc. Waves'93 Symposium*, New Orleans, USA, pp. 394-405.
- **Ippen, A.T. and Y. Goda (1963).** Wave-induced oscillations in harbours: The solution for a rectangular harbour connected to the open-sea. *Hydrodyn. Lab, MIT*, TR nº 59.
- **Kirby, J.T. (1984).** A note on the linear surface wave-current interaction over slowly varying topography. *J. Geophys. Res.*, 89, pp. 745-747.
- **Kostense, J.K., Meijer, K.L., Dingemans, M.W., Mynett, A.E. aandVan den Bosch, P. (1986).** "Wace energy dissipation in arbitrary shaped harbours of variable depth.*", Proc. 21 th Conference on Coastal Engineering*. Taipei, Vol 3. Pp 2002-2016.
- **Lee, J.-J. (1971).** Wave-induced oscillations in harbours of arbitrary geometry. *J. Fluid Mech.,* 45, pp. 375-394.
- **Mitsuyasu, H. *et al* (1975).** Observation of the directional spectrum of ocean waves using a cloverleaf buoy. *J. Phys. Oceanography*, Vol. 5, pp. 750-760.
- **Moreno, J. (1996).** Modelo de propagación de oleaje direccional basado en la ecuación "mild-slope". *Tesina de especialidad*, ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC.
- **Moreno, J. y F.J. Rivero (1998)**. Modelo de Agitación Portuaria MAP: Manuales de usuario y de referencia.

• **Pierson, W.J. and L. Moskowitz (1964).** A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of Kitaigodorskii. *J. Geophys. Res.*, Vol.69, No. 24, 5181-5189.