

MAGNITUDO DEGLI EVENTI CHE MOBILITANO IL FONDALE NELLA REGIONE AUTONOMA FRIULI VENEZIA GIULIA

Anna Lutman (a), Enrico Bressan (a), Francesca Delli Quadri (a), Katia Crovatto (b)

(a) Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia, Palmanova (Ud)

(b) Direzione centrale difesa dell'ambiente, energia e sviluppo sostenibile,
Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, Trieste

Il materiale trasportato dalle foci fluviali viene movimentato nelle aree costiere a opera del moto ondoso e delle correnti litoranee: l'azione delle onde generate dal vento e le escursioni della marea sono, assieme alle correnti, le forzanti principali che regolano i processi morfodinamici che interessano i litorali. Per quanto concerne le dinamiche dovute alla marea, il livello del mare, l'altezza e il periodo delle onde, le correnti, la pressione atmosferica, il vento, la temperatura sono i parametri di base per la caratterizzazione dei regimi mareali e ondosi dei mari italiani e della dinamica marina lungo le coste. Nel mar Mediterraneo l'ampiezza massima delle maree è mediamente 45 cm, a differenza dei paesi nel nord Europa dove può superare i 10 metri, e le oscillazioni di marea sono di tipo semidiurno misto, con due massimi e due minimi durante la giornata, che si susseguono con valori diversi nel corso del mese con maree minori e maggiori.

Relativamente ai bacini che bagnano le coste italiane, le maree hanno una periodicità media di 6 ore fra una bassa e un'alta marea e le escursioni sono abbastanza limitate, comprese mediamente tra i 30-70 cm. Nell'alto Adriatico invece le ampiezze di marea possono superare anche il metro e, in particolari condizioni astronomiche e meteorologiche, quali forte vento di scirocco, si possono avere innalzamenti eccezionali del livello del mare che in taluni casi, possono andare ben oltre le ordinarie condizioni di alta marea dando luogo ad allagamenti dei centri abitati lagunari e costieri e aggravando il rischio di erosione dei litorali in concomitanza con le mareggiate più intense (ISPRA, 2012). Il valore di tali temporanei rialzi del livello del mare dipende dall'entità delle forzanti meteorologiche, quali la rapidità con cui si abbassa la pressione atmosferica nell'Alto Adriatico, l'evoluzione del gradiente barico tra il nord e il sud dello stesso Adriatico, l'intensità e la durata del vento di Scirocco. L'analisi di tali fenomeni viene di norma condotta scomponendo la marea reale in due contributi, quello di natura astronomica (tide) e quello di natura meteorologica (sovralzo o residuale). Al cessare dell'effetto delle forzanti, la marea meteorologica lascia il posto a una componente periodica smorzata, associabile al fenomeno della sessa che oscilla tra lo stretto di Otranto e il Golfo di Venezia con periodicità di circa 22 ore e con una ampiezza che nel giro di pochi giorni si riduce progressivamente fino ad annullarsi per l'effetto di azioni dissipative (ISPRA, 2022). La circolazione litoranea, che avviene in direzione ortogonale e parallela alla costa, riveste un ruolo di fondamentale importanza nei fenomeni di trasporto solido costiero, il quale può essere scomposto in due componenti di moto: il trasporto solido trasversale, che avviene in direzione perpendicolare alla linea di battigia (*cross-shore*) dovuto principalmente alle correnti di ritorno e alle asimmetrie del campo di moto ondoso; il trasporto solido longitudinale, in direzione parallela alla linea di battigia (*long-shore*), prodotto dalla corrente litoranea. Il trasporto solido *long-shore* influisce sull'evoluzione a lungo termine della morfologia costiera mentre quello *cross-shore* è la principale causa dei fenomeni evolutivi a breve termine dovuti a condizioni di mareggiata. Il trasporto solido trasversale è dunque promotore del rimodellamento del profilo della sezione; il trasporto solido longitudinale invece determina la sottrazione di sabbia allontanandola dalla sezione secondo la direzione definita dalle onde.

Nell'area compresa tra la linea di frangimento dell'onda più alta e la linea del litorale avviene la maggior parte del trasporto solido: la parte più fine del materiale posto in movimento viene trasportata per sospensione, la frazione più grossa viene spostata per rotolamento sul fondo secondo la direzione dell'onda verso riva. I principali input sedimentari nell'area costiera del FVG sono dati dal fiume Isonzo e dal fiume Tagliamento; per quanto concerne il delta tilaventino, la dispersione dei contributi terrigeni fluviali è disposta simmetricamente alla foce, con una maggiore tendenza verso Ovest; il sedimento trasportato alla foce del fiume Isonzo viene disperso in senso longitudinale verso occidente, a seguito del prevalente sistema di circolazione antioraria delle correnti.

Dati di torbidità misurati nel Golfo di Trieste

Considerando i dati di monitoraggio del Golfo di Trieste, le concentrazioni di solidi sospesi e i livelli di torbidità delle acque costiere sono estremamente variabili, soprattutto in ragione di eventi meteorologici specifici. Di norma, e in condizioni non perturbate, i livelli sono piuttosto bassi, con valori nella media inferiori a 10 NTU (*Nephelometric Turbidity Unit*). Tuttavia le perturbazioni ondose producono risospensioni rilevanti nei bassi fondali e le onde lunghe sono in grado di rimaneggiare fondali anche con profondità elevate. In secondo luogo, i periodi di elevata piovosità sono responsabili di onde di piena che si riversano a mare da parte dei maggiori tributari, nella fattispecie il fiume Isonzo, causando valori di torbidità che superano anche più di 10 volte i valori medi. Si riportano, in Figura 1, dati di torbidità aggregati derivanti dalle campagne di misura effettuate dall'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente (ARPA) FVG, con sensore ottico associato a una sonda multiparametrica, durante i monitoraggi istituzionali a frequenza mensile dal 2014 al 2018 su un numero di stazioni di campionamento, compreso tra 37 e 48, distribuite tra l'area costiera a il centro del bacino di Trieste.

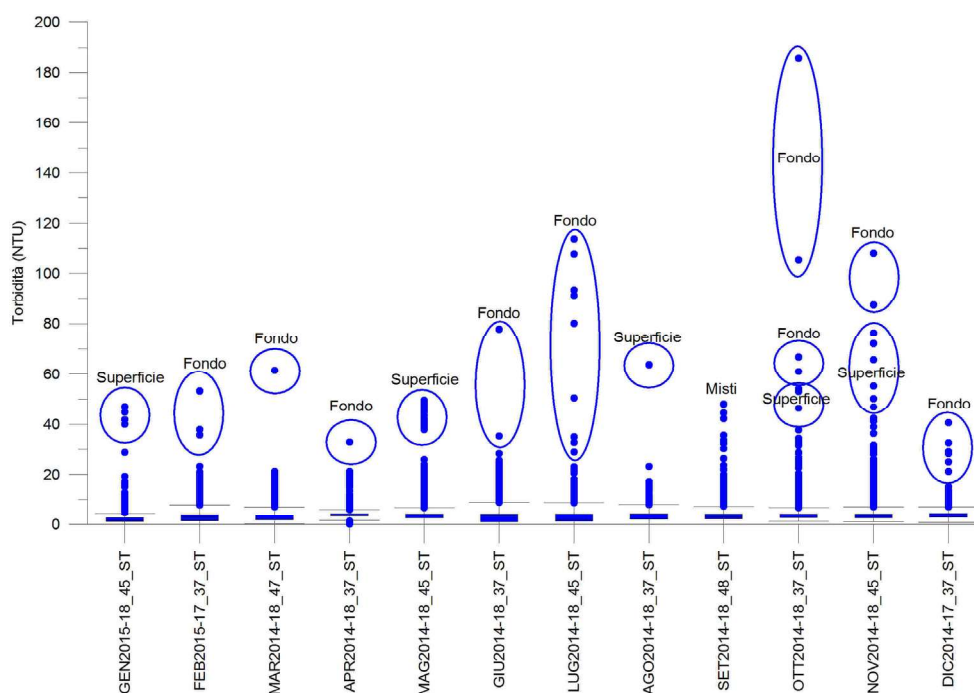


Figura 1. Valori statistici medi, mediani, minimi e massimi della torbidità (NTU) nello stato superficiale del Golfo di Trieste rilevati da ARPA-FVG tra marzo 2014 e febbraio 2018.
(Fonte: per gentile concessione di ARPA-FVG, 2018)

In generale, nell'arco di un anno, si rileva un aumento naturale del parametro torbidità tra maggio-giugno e ottobre-novembre in cui sono più marcati gli apporti fluviali e le fioriture planctoniche (Tabella 1). Inoltre, anche i fenomeni di sedimentazione della sostanza organica giocano un ruolo significativo nella variazione stagionale della torbidità.

Tabella 1. Dati di torbidità

Periodo	Media (NTU)	Mediana (NTU)	Minimo (NTU)	Massimo (NTU)
Gen 2015-18 45 ST	2,57	1,84	0,10	47,19
Feb 2015-17 37-ST	3,33	3,71	0,31	17,17
Mar 2014-18 47 ST	3,43	2,41	0,21	19,23
Apr 2014-18 37 ST	4,02	3,97	0,22	21,18
Mag 2014-18 45 ST	3,72	3,63	0,02	25,86
Giu 2014-18 37 ST	3,43	3,36	0,06	25,62
Lug 2014-18 45 ST	2,97	1,94	0,19	18,09
Ago 2014-18 37 ST	3,82	3,87	0,11	17,14
Set 2014-18 48 ST	3,67	3,23	0,92	22,06
Ott 2014-18 37 ST	4,39	3,63	1,36	54,29
Nov 2014-18 45 ST	4,59	3,79	1,55	72,02
Dic 2014-17_37_ST	4,02	4,04	0,86	13,20

Nelle Figure 2, 3, 4 e 5 vengono illustrate alcune elaborazioni eseguite sui dati di torbidità, misurati dal 2015 al 2020, espressi in FTU (*Formazin Turbidity Unit*) (APAT, 2003). Nell'elaborazione spaziale i dati rappresentati sono compresi tra 0 e >10 FTU, al fine di agevolarne la rappresentazione.

Per quanto riguarda lo strato più superficiale (0,25-1,5 m) nel periodo invernale si evidenzia una distribuzione dei valori di torbidità più elevati nell'area costiera e in prossimità della foce del fiume Isonzo; nel periodo autunnale la distribuzione è molto caotica, forse per la presenza di lenti d'acqua a bassa salinità e relativa più elevata torbidità di provenienza fluviale trasportate nello strato superficiale dai venti e correnti marine.

Per quanto concerne lo strato di fondo (spessore 1 m), nel periodo invernale le massime torbidità si osservano lungo la costa occidentale e in centro bacino, dove sono presenti i processi di sedimentazione delle sostanza organica e l'advezione di acque meridionali che potrebbero risospendere il sedimento; nel periodo primaverile le massime torbidità si osservano lungo la costa occidentale e l'area costiera centrale del bacino e sono probabilmente da associare e risospensione del sedimento marino per correnti di *upwelling*.

Nel periodo estivo le massime torbidità si osservano in centro bacino dove sono preponderanti i processi di sedimentazione della sostanza organica.

Si riportano a seguire anche i dati di torbidità registrati in associazione con i dati di salinità, per lo strato superficiale e di fondo nelle diverse stagioni nel periodo 2015-2020.

Per lo strato superficiale, nel periodo invernale valori superiori a 40 FTU si riscontrano delle stazioni site nella Baia di Panzano, foce Isonzo e Bocca lagunare di Porto Buso in corrispondenza a basse salinità. In periodo autunnale i valori superiori a 30 FTU si riscontrano in prossimità della foce isontina, al largo di Grado e in prossimità delle bocche lagunari soprattutto quella di Porto Buso. Per lo strato di fondo, nel periodo invernale valori superiori a 20 FTU si riscontrano in due aree: quella costiera tra Grado e Lignano e quella di centro golfo a maggiore batimetria e prossima alla condotta sottomarina delle acque reflue di Trieste.

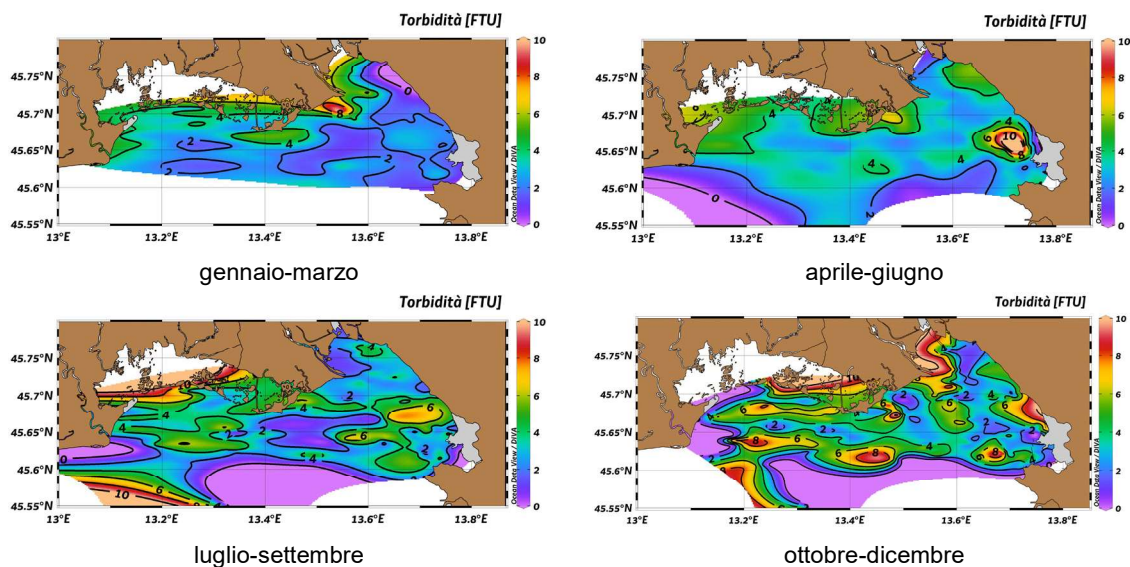


Figura 2. Torbidità media 2015-2020 nello strato superficiale tra 0 e >10 FTU.
(Fonte: elaborazioni ARPA FVG, 2021)

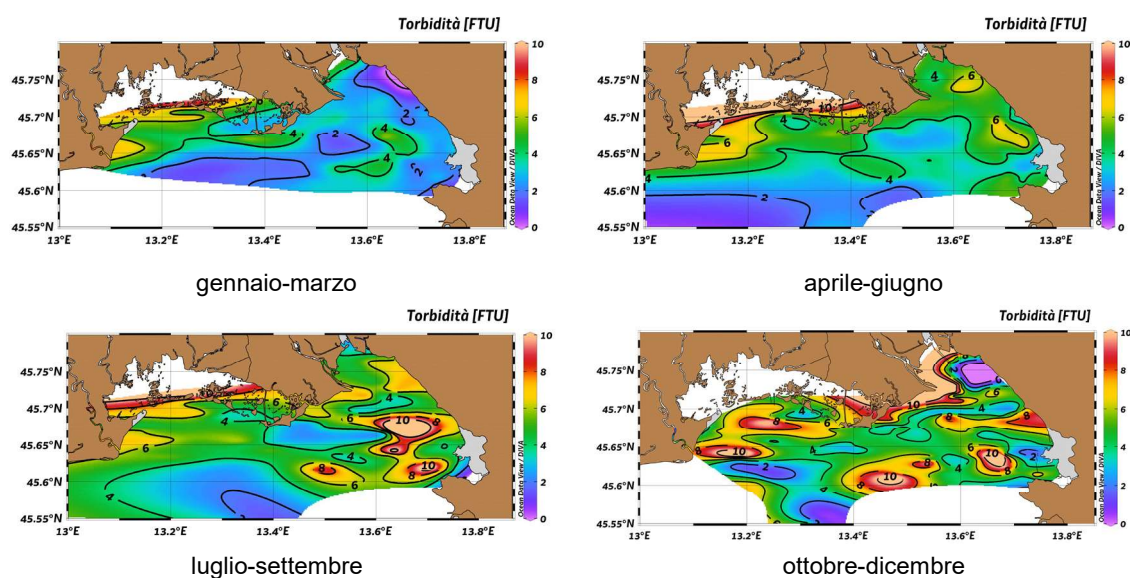


Figura 3. Torbidità media 2015-2020 nello strato di fondo tra 0 e >10 FTU.
(Fonte: elaborazioni ARPA-FVG, 2021)

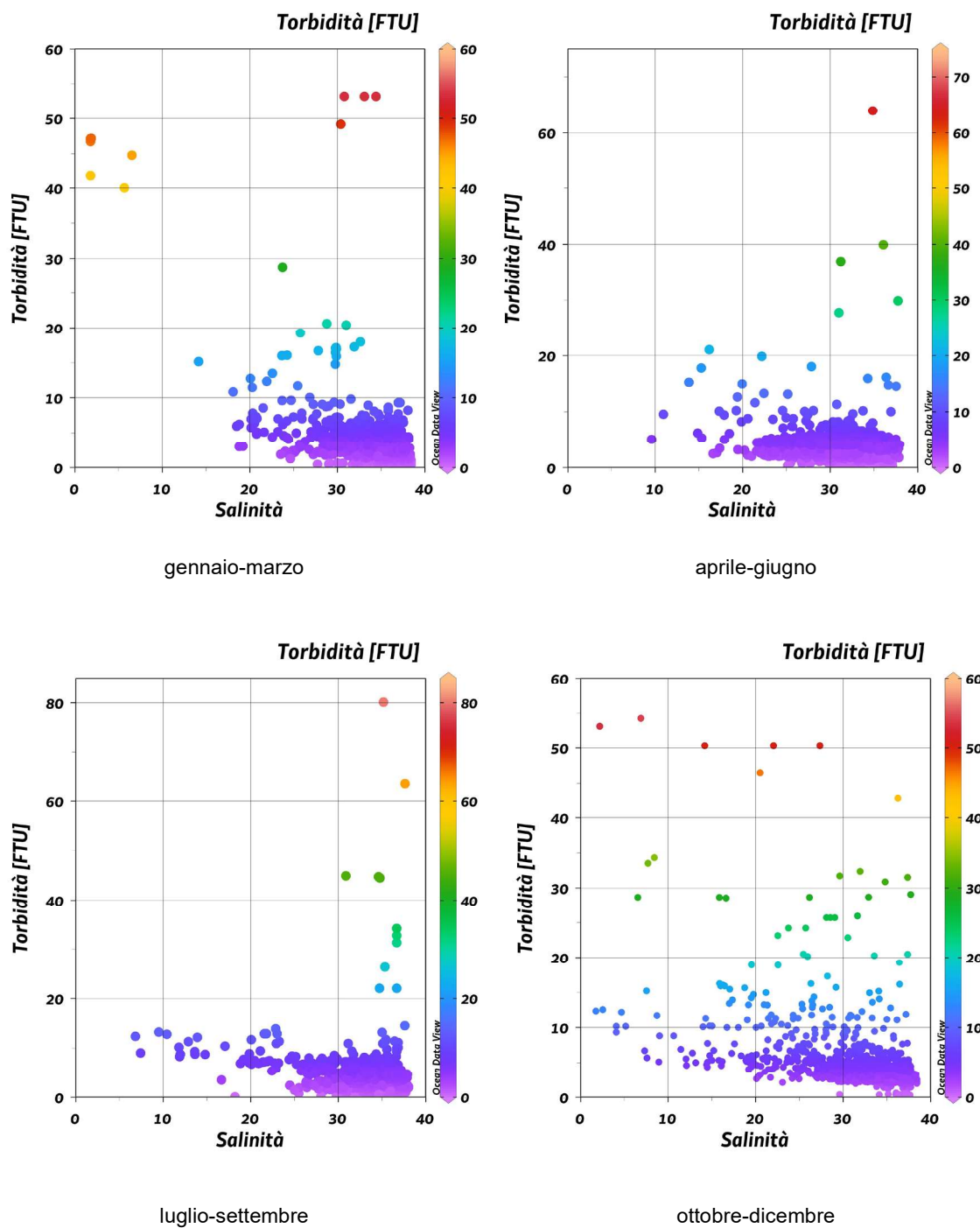


Figura 4. Salinità-turbidità media 2015-2020 nello strato superficiale.
(Fonte: elaborazioni ARPA-FVG, 2021)

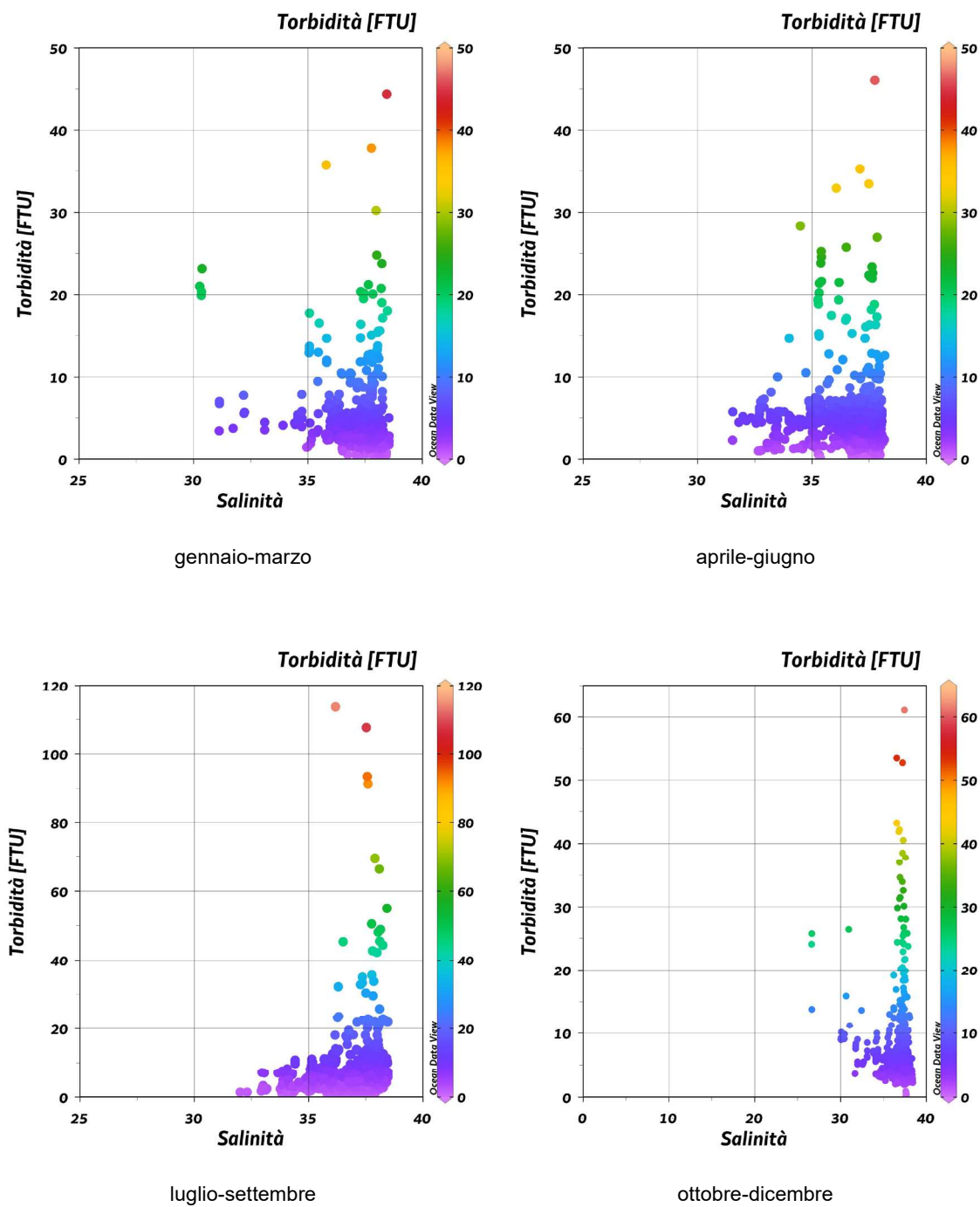


Figura 5. Salinità-turbidità media 2015-2020 nello strato di fondo.
(Fonte: elaborazioni ARPA-FVG, 2021)

Nel periodo estivo valori elevati superiori a 80 FTU si riscontrano nelle stazioni site in prossimità della foce del fiume Isonzo e in centro bacino dove sono preponderanti i processi di sedimentazione della sostanza organica.

È interessante affiancare a questo dato naturale un dato antropico ovvero la variazione di torbidità misurata in uno dei cantieri più importanti a livello nazionale, localizzato in un'area di estremo pregio come la Laguna di Venezia: il monitoraggio ambientale dei cantieri del Modulo Sperimentale elettromeccanico, MOSE ("Monitoraggio ambientale dei cantieri del MOSE – Acqua: sedimenti, torbidità, morfodinamica") (<http://www.monitoraggio.corila.it/>).

In questo lavoro è stato seguito l'andamento dei valori di torbidità annuali in 8 stazioni fisse e per 9 anni di misura per un totale di 1.508.300 dati rilevati. L'obiettivo era quello di individuare dei livelli di allarme per l'ambiente acquatico.

È stato concluso che "nel corso del primo anno di monitoraggio le elaborazioni statistiche effettuate su dati di torbidità, misurati sia in stazioni fisse alle bocche di porto sia durante numerose campagne da imbarcazione, hanno consentito di studiare l'andamento delle concentrazioni del particolato in sospensione in condizioni naturali e in presenza di perturbazioni".

Sulla base di considerazioni legate all'andamento dei valori naturali, agli effetti sull'ecosistema del carico in sospensione e alle modalità di dispersione del plume di materiale risospeso dalle lavorazioni si è quindi stabilito un valore limite di sicurezza (valore di soglia) della concentrazione del materiale sospeso pari a 30 mg/L ovvero a 30 NTU.

Questo valore può essere superato solo all'interno di una zona il più possibile ristretta intorno alla draga, definita Area di Impatto Totale (AIT) non superiore a 50.000 m². Rispettando il limite di 30 mg/L all'esterno dell'AIT si ha ragionevole certezza che l'impatto della risospensione dei sedimenti sull'ambiente circostante sia minimo: tale valore è infatti confrontabile, per durata e intensità, con quello dovuto alla concentrazione che può essere raggiunta con accettabile frequenza nel corso di eventi naturali (temporali, mareggiate e correnti di marea) e lo si può considerare di intensità moderata.

Si tratta in pratica di ammettere valori di torbidità che determinano una modificazione tollerabile rispetto alla situazione indisturbata dell'ecosistema.

Concludendo, i numerosi dati (raccolti durante questo monitoraggio) hanno dimostrato che gli eventi di superamenti di torbidità (soglia 30 mg/L o 30 NTU) riconducibili alle fasi di dragaggio sono percentualmente irrisori rispetto a eventi generici non attribuibili ai dragaggi, come riportato nella Tabella 2 pubblicata nel medesimo lavoro.

Tabella 2. Numero di eventi nel corso dei quali, nel periodo giugno-dicembre 2006, si è superato il valore soglia in concomitanza con i lavori della draga Astra presso la bocca di Lido, in un numero totale di 5136 ore

Numero eventi e stazioni	LMR-2	LMR	LSA
Numero di dati validati	16070	16470	14484
Numero di eventi con C>30 mg/L	23	17	119
Numero di eventi in cui non si hanno informazioni sulla draga	2	0	23
Numero di eventi certamente non attribuibili alla draga	21	15	85
Numero di eventi possibilmente attribuibili alla draga	0	2	11

Fonte: http://www.monitoraggio.corila.it/Docs/Monitoraggio_acqua.pdf

Eventi di risospensione del fondale da parte di onde lunghe (mareggiata di Scirocco)

Si riportano, a titolo di esempio di eventi meteorologici particolari, i dati raccolti dall'Università di Trieste – Dipartimento di Matematica e Geoscienze – effettuate nel corso di alcuni monitoraggi sulla Baia di Panzano (punti P1 e P2 in Figura 6) eseguiti nel 2016 e nel 2018.

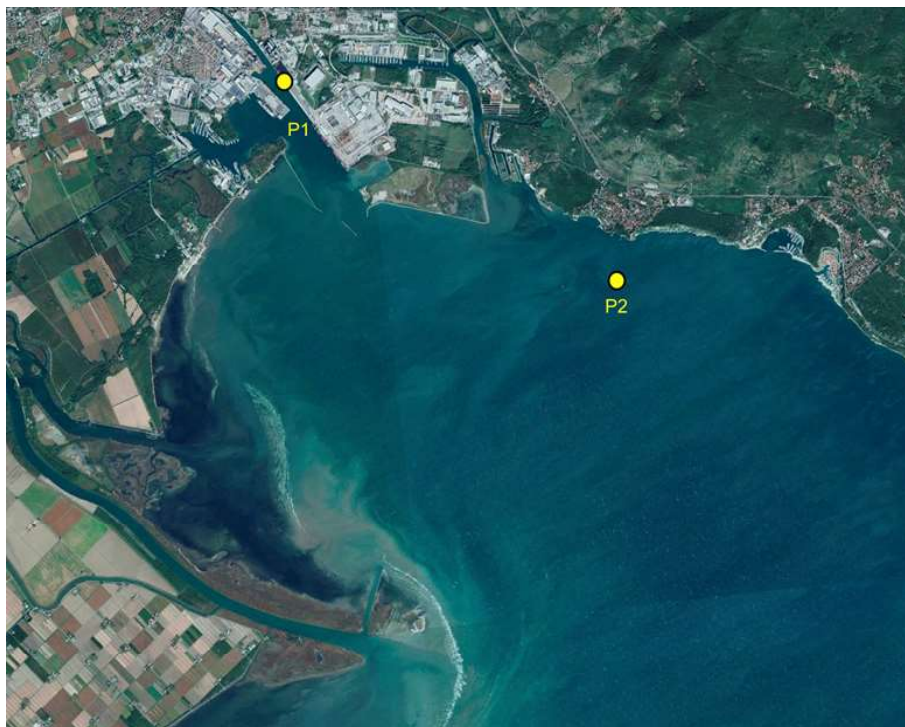


Figura 6. Ubicazione dei punti di misura di torbidità (P1 e P2 in giallo) riportati come esempi di eventi meteorologici. (Fonte: Copyright 2018, Google Earth)

Nelle giornate del 5 e 6 marzo 2016 è avvenuta una mareggiata di Scirocco che ha investito il Golfo di Trieste con onde di H massima di 3 m, misurata presso la boa fissa Paloma in carico all'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS) e monitorata da ARPA.

Nello stesso periodo, presso il punto P2, posizionato per un monitoraggio interno all'area marina in concessione di mitilicoltura, sono stati registrati i valori di torbidità dell'acqua mediante sensore *Optical Backscatter Signal* (OBS) montato su un correntometro Aanderaa RCM9 posto a 60 cm dal fondo, a una profondità di circa 8 m. Come si può notare in Figura 7, i valori di torbidità hanno superato il limite strumentale di 100 NTU (≈ 100 mg/L) e si sono mantenuti superiori ai 40 NTU per poco più di 9 ore.

Significativo il fatto che la perturbativa sopra descritta sia associata alla risospensione del fondale, a profondità notevolmente superiori a quelle tipiche di rimaneggiamento da parte del moto ondoso sottocostiero.

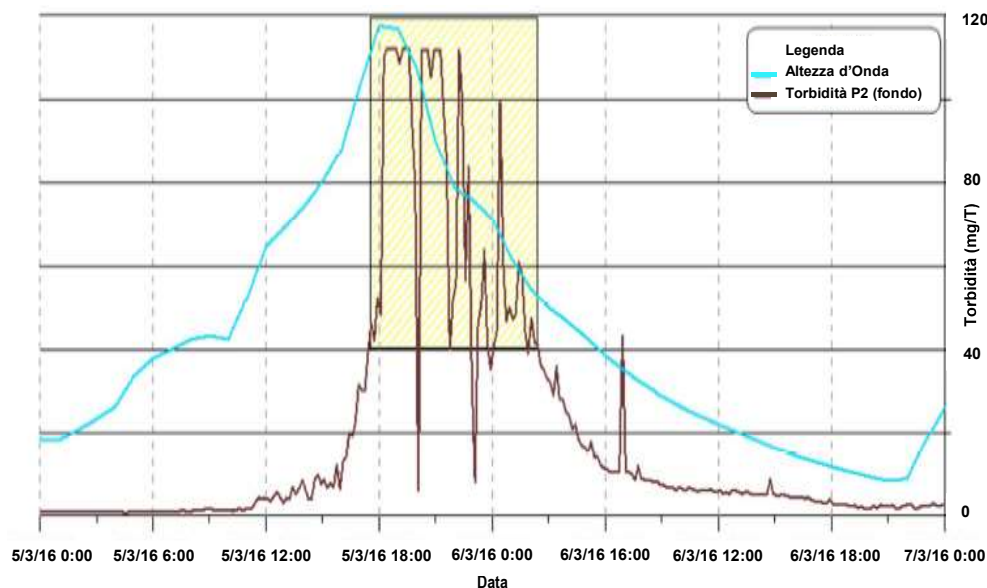


Figura 7. Record dei valori di torbidità al fondo (profondità 8 m) misurati nel punto P2 di Figura 6, in coincidenza con un evento di mareggiata di Scirocco (H picco onda=3 m registrato dalla boa Paloma). (Fonte: per gentile concessione dell'Università di Trieste, Dip. Matematica e Geoscienze)

Eventi di piena dell'Isonzo

Nelle giornate dal 27 al 30 ottobre, poi seguite dal 1-2 novembre 2018, si sono registrate piogge intense nell'area friulano-veneta, in occasione delle quali molte località montane sono state coinvolte da eventi di tracimazione fluviale e l'area costiera interessata da forte acqua alta.

L'evento di piena è rappresentato dall'immagine satellitare di Figura 8.

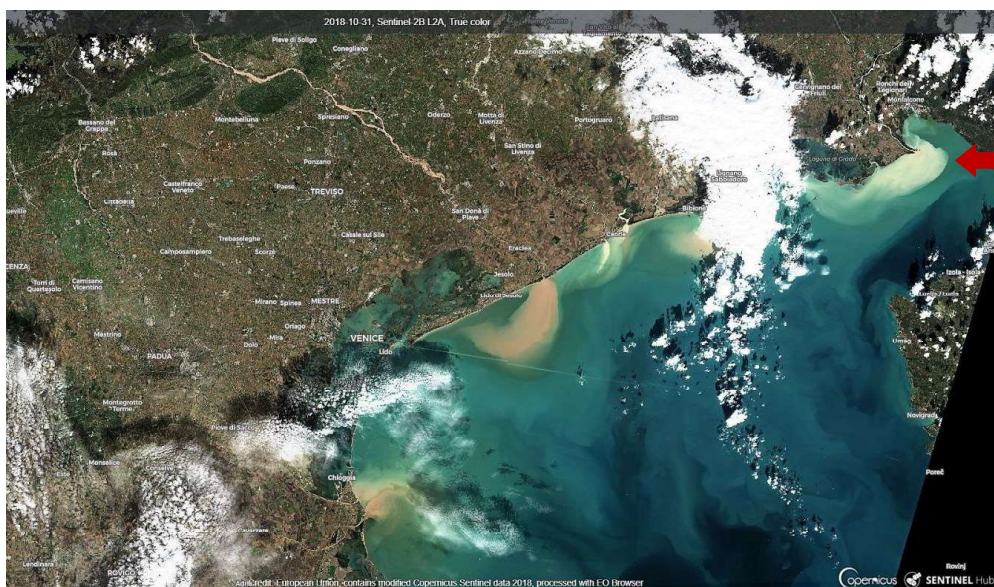


Figura 8. Notevole torbida fluviale dell'Isonzo a seguito delle prime giornate di intensa pioggia (27-30 ottobre 2018) evidenziata dal satellite "Sentinel 2" (Fonte: Copyright European Union, Copernicus Sentinel-2 imagery, 2018)

A titolo d'esempio, in relazione all'area di influenza del bacino idrografico del fiume Isonzo, sono riportate (Figura 9) le piogge registrate, in alcune località friulane, nel periodo in esame.

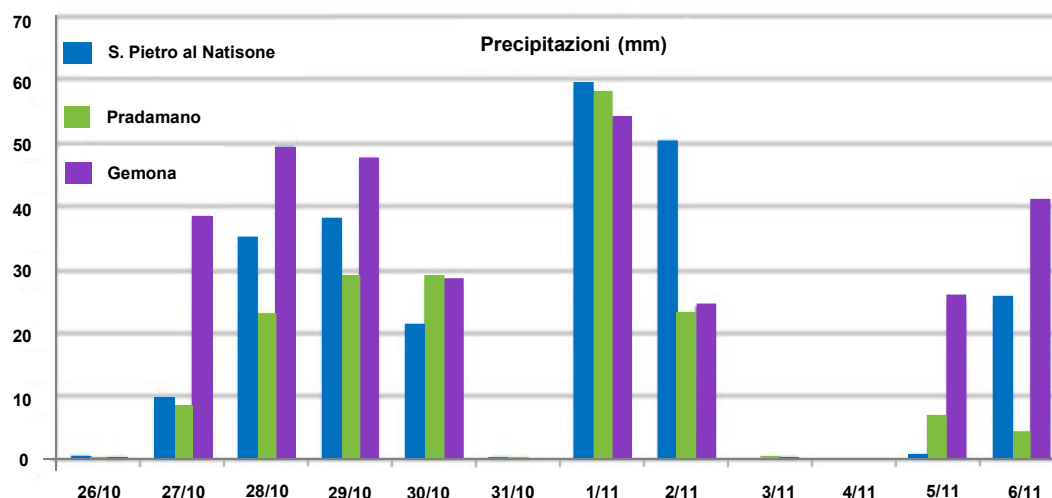


Figura 9. Andamento delle precipitazioni dal 27 ottobre al 2 novembre 2018 nell'area orientale friulana. (Fonte: per gentile concessione di ARPA-FVG e dell'Università di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze)

Nelle giornate successive al 31 ottobre 2018 è stato posizionato un sensore di torbidità immediatamente a valle del Canale dei Dottori, all'interno del bacino portuale di Monfalcone.

Il sensore B&C-TU8325 ha registrato l'onda di piena limitatamente alla porzione dello scolmatore che lamina il fiume Isonzo, ma che è modulato dall'onda di marea che penetra nel porto.

In Figura 10 sono riportate le registrazioni della torbidità e del livello di marea nel punto P1 (*vedi* Figura 6) alla profondità di 2 m dalla superficie marina. Per confronto è riportata anche la registrazione della portata del fiume Isonzo registrata alla foce (stazione N048 Quarantia). I dati evidenziano che durante il riflusso, cioè quando cala la marea con direzione della corrente coincidente con quella fluviale proveniente dallo scolmatore, si accentua notevolmente l'effetto del carico sospeso di origine isontina, che si traduce in una proporzionalità inversa della torbidità rispetto al livello di marea. La serie qui rappresentata, mostra l'inizio di registrazione a valle delle giornate più piovose di ottobre, con valori di picco di quasi 50 NTU.

I valori di picco della torbidità si riducono progressivamente, man mano che le portate si attenuano, una volta esaurita l'onda di piena. Solo dal 4 novembre in poi, con un regime medio di portata (tra 100 e 200 mc/s), i valori appaiono modulati dal cuneo salino, legato all'oscillazione di marea.

Riassumendo, dopo due giorni di pioggia intensa (*vedi* Figura 9 alle date dell'1-2 novembre del 2018) la piena si manifesta con un ritardo di circa 24 ore, e raggiunge picchi di torbidità intorno ai 50 NTU. Al cessare delle precipitazioni la torbidità fluviale naturalmente si attenua in modo progressivo, mantenendosi tuttavia con valori superiori a 10 NTU per oltre 3 giorni dalla fine dell'evento (valore misurato il 6 novembre, *vedi* Figura 10).

La variazione di torbidità durante un evento di risospensione naturale, come descritto sopra, ritorna a valori naturali dopo oltre 3 giorni di tempo.

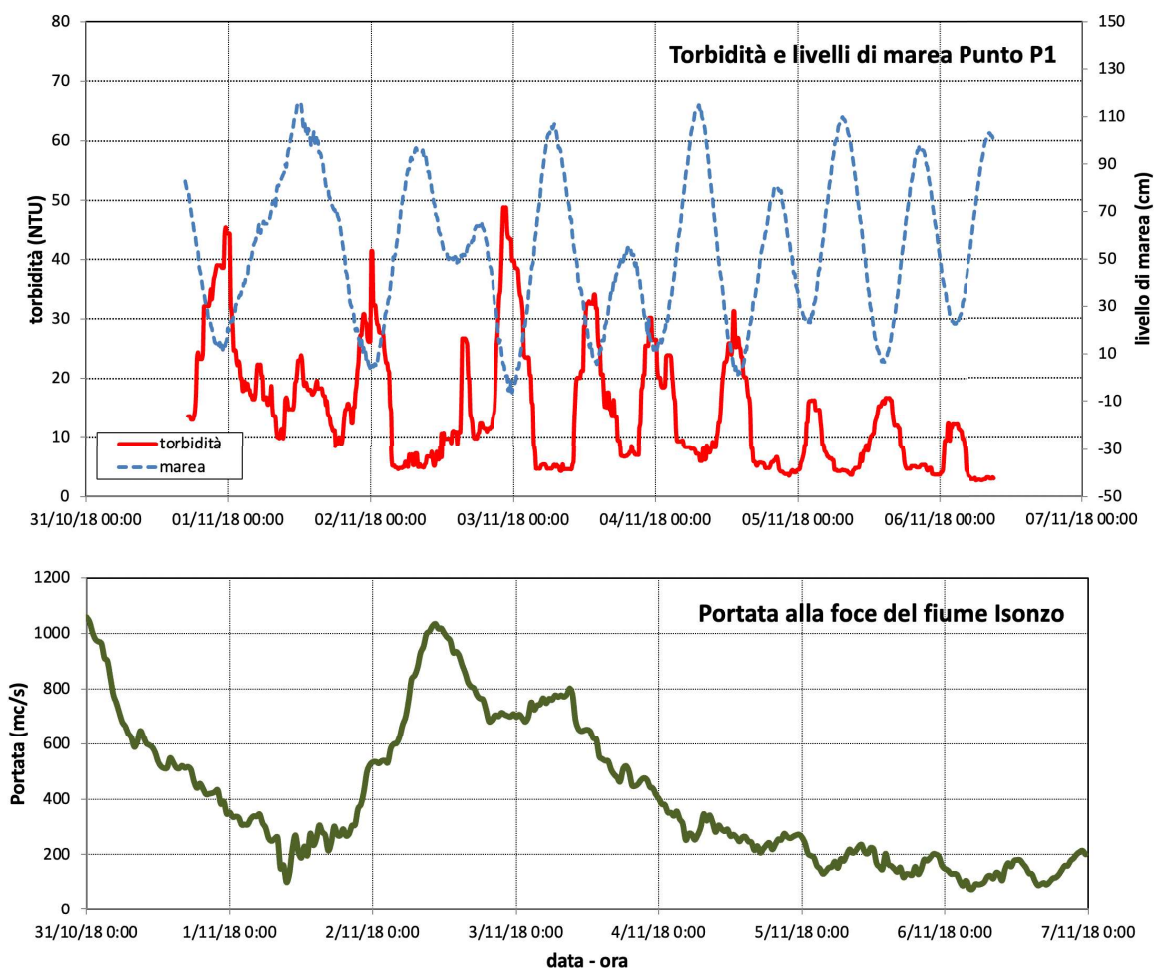


Figura 10. Variazione della torbidità e della marea (in alto) misurate nel punto P1 di Figura 6 alla profondità di 2 m dalla superficie marina. Dati di portata del fiume Isonzo (fonte: Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia) misurati alla foce. (Elaborazione dei dati dell'Università di Trieste, Dipartimento di Matematica e Geoscienze)

Pur considerando la rarità con la quale si verificano, gli eventi di piena fluviale dell'Isonzo danno un grande contributo nel trasporto di Hg sotto forma di particellato nel Golfo di Trieste (Covelli *et al.*, 2007).

Inoltre, il dilavamento dei sedimenti nel distretto minerario e la loro periodica risospensione introduce da 200 a 800 kg di Hg in un anno idrologico (Kocman *et al.*, 2004).

Alcuni ricercatori sloveni (Rajar *et al.*, 2000) hanno per primi sottolineato l'importanza degli eventi di piena del fiume Isonzo nell'apporto di elevate quantità di sedimento fluviale contaminato da mercurio.

Nell'evento di piena verificatosi fra il 6 e il 14 novembre 1997, per esempio, con picchi di portata liquida fra 1600 e 2300 m³/s, e un apporto stimato di 470 milioni di m³ d'acqua con una concentrazione di materiale in sospensione di 360 g/m³, la quantità di materiale che è arrivato nel Golfo è stata stimata pari a 180.000 tonnellate.

Gli stessi autori riportano una concentrazione di Hg pari a 49 µg g⁻¹ per il sedimento in sospensione trasportato durante l'evento di piena del 14/11/1997 che porterebbe a una stima grossolana di 8.000 kg di Hg riversati nel Golfo di Trieste alla foce del F. Isonzo.

Tale evento, tuttavia, viene considerato dagli stessi autori caratteristico di un periodo di ritorno di 5 anni e sarebbe nettamente superiore alla media annuale stimata di 1,780 kg (Rajar *et al.*, 2000).

Bibliografia

- APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici). Sezione 2000. Metodi ecotossicologici. Parametri fisici, chimici e chimico-fisici/Torbidità. In: APAT, CNR-IRSA (Ed.). *Metodi analitici per le acque*. Roma: APAT; 2003. (APAT Manuali e linee guida 29/2003).
- Covelli S, Faganeli J, Horvat M, Brambati A. 2001. Mercury contamination of coastal sediments as the result of a long-term cinnabar mining activity (Gulf of Trieste, Northern Adriatic sea). *Applied Geochemistry* 2001;16:541-58.
- Covelli S, Fontolan G, Faganeli J, Ogrinc N. Anthropogenic markers in the Holocene stratigraphic sequence of the Gulf of Trieste (northern Adriatic Sea). *Marine Geology* 2006;230:29-51.
- Covelli S, Piani R, Acquavita A, Predonzani S, Faganeli J. Transport and dispersion of particulate Hg associated with a river plume in coastal Northern Adriatic environments. *Marine Pollution Bulletin* 2007;55:436-50.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). *I fenomeni di storm surge nel Nord Adriatico e la loro previsione*. Venezia: ISPRA, sezione: Modellistica; 2022. Disponibile all'indirizzo: <https://www.venezia.isprambiente.it/modellistica#Storm%20Surge>; ultima consultazione 20 giugno 2022.
- ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale). *Mare e ambiente costiero*. Tematiche in primo piano - Annuale dei dati ambientali 2011. Roma: ISPRA; 2012. (Stato dell'Ambiente 26/2012). Disponibile all'indirizzo: https://www.isprambiente.gov.it/files/pubblicazioni/statoambiente/tematiche2011/05_%20Mare_e_ambiente_costiero_2011.pdf; ultima consultazione 20 giugno 2022.
- Kocman D, Horvat M, Kotnik J. Mercury fractionation in contaminated soils from the Idrija mercury mine region. *Journal of Environmental Monitoring* 2004;6:696-703.
- Rajar R, Žagar D, Širca A, Horvat M. 2000. Three-dimensional modelling of mercury cycling in the Gulf of Trieste. *Science of the Total Environment* 2000;260:109-23.