

ALMA MATER STUDIORUM

UNIVERSITA' DI BOLOGNA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

Corso di laurea in SCIENZE AMBIENTALI

**Eventi estremi meteo-oceanografici nella zona
costiera del Ravennate**

Tesi di laurea in METEOROLOGIA E OCEANOGRAFIA

Relatore
Prof.ssa Nadia Pinardi

Presentata da
Luca Ciavatta

Correlatore
Claudia Fratianni

III sessione

Anno Accademico 2011/2012

Indice

1	Introduzione
1.1	Il Mare e la zona costiera
1.1.1	Il Mar Mediterraneo
1.1.2	Il Mare Adriatico
1.1.3	Area di studio - La zona costiera del Ravennate
1.2	Meteo-oceanografia e climatologia
1.2.1	Eventi medi e descrizione climatologica
1.2.2	Eventi estremi (Panoramica)
1.3	Obiettivi della tesi
2	Dati e Metodi
2.1	Sistemi di monitoraggio e previsione
2.1.1	Modelli globali e modelli ad area limitata
2.1.2	Il modello COSMO-ME
2.1.3	Il modello AFS
2.2	Analisi meteorologica e climatologica
2.2.1	Dataset
2.2.2	Metodi e strumenti di analisi
3	Risultati
3.1	Analisi dei dataset
4	Conclusioni
5	Bibliografia

1 Introduzione

1.1 Il mare e la zona costiera

Con una superficie più che doppia rispetto a quella delle terre emerse, indicativamente oltre 300 milioni di chilometri quadrati, il mare è una rilevante parte del nostro mondo. Quattro quinti della flora e della fauna del mondo intero vivono nei mari costieri che delimitano i continenti ed è quasi incalcolabile la varietà e la ricchezza di vita che contengono le acque marine. L'impatto antropico sul mare è stato sempre rilevante nel corso della storia: turismo, balneazione, pesca, mitilicoltura, sfruttamento di giacimenti, trasporti, non sono soltanto che alcuni degli utilizzi che l'uomo è stato in grado di mettere in essere. Le criticità, le problematiche e le compatibilità necessarie in un quadro di sostenibilità, hanno costretto l'uomo ad attuare pianificazioni sul piano della gestione e del controllo ambientale del mare. Le molteplicità degli usi impongono una attenta valutazione sia dal punto di vista ambientale che dalla parte della sicurezza per l'uomo. Nonostante le nuove tecnologie abbiano consentito una gestione quasi mirata dell'ambiente marino, resta una persistente incertezza delle condizioni ambientali nei casi di eventi estremi. Eventi significativi e traumatici, quali tsunami, maremoti e onde anomale, possono mostrare un'impressionante violenza. Il mare occupa il 70% della superficie terrestre, costituisce circa il 97% delle acque presenti sul pianeta e ha una crescente importanza nella vita dell'uomo: dall'antico sfruttamento come riserva alimentare e come via di trasporto, ora consente lo sfruttamento di giacimenti di materie prime, di fonti energetiche rinnovabili e, attraverso la desalinizzazione, permette anche un uso potabile delle sue acque. La salinità media è pari a 35 grammi di sale in un litro d'acqua e il grado di salinità generalmente varia da un mare all'altro, solitamente è maggiore nei mari caldi e poco piovosi. L'ossigeno libero in soluzione si trova soprattutto nello strato superficiale dell'acqua marina ed è favorito dall'interazione con l'atmosfera (interfaccia aria-acqua) e dalla vita vegetale. La temperatura varia con la profondità, la latitudine e le stagioni, ma le variazioni vengono attutite dalla cosiddetta azione mitigatrice del mare. Temperature estreme si raggiungono da un lato nei mari 'chiusi' come il Mar Rosso, il Mar Morto o il Golfo Persico, dall'altro nei mari polari contaminati di iceberg e di lastre di acqua continentale ghiacciata. Le onde increspano i mari di tutto il mondo e sono provocate dal vento che conferisce loro un movimento ondoso in prevalenza verticale. Nei casi limite, si possono formare onde di altezza fino a 15 metri (Fig.1). Il movimento è continuo ed è presente a vari livelli, e ciò provoca la variazione del livello del mare nell'arco delle giornate. Questa variazione è dovuta ad un ritmico flusso e riflusso, un'oscillazione completa di alta e bassa marea dura 12 ore e 25 minuti circa ed è generata dall'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole,

con i massimali in coincidenza con il plenilunio e il novilunio. Le circolazioni superficiali e profonde hanno notevoli effetti sul clima, sulla vita marina e, non in ultima istanza, sulle attività dell'uomo.



Fig.1 L'impeto del mare

Le correnti marine, masse d'acqua con caratteristiche proprie, hanno movimenti dovuti ai venti, in particolare alla spinta degli Alisei, che sono venti costanti, ai Monsoni, che sono venti periodici, e alla rotazione terrestre, dovuta alla deviazione a destra dell'emisfero boreale. Le correnti vengono deviate dalle coste, hanno effetti equilibranti sulla salinità e sulla temperatura delle acque, si presentano calde all'equatore e fredde ai poli, e hanno notevoli effetti su scala locale. L'evaporazione dell'acqua dei mari fornisce l'umidità necessaria alle piogge e costituisce l'ennesima prova dell'importanza del mare ad ogni livello. L'interfaccia Terra-Mare, la costa, è un sistema dinamico alla cui evoluzione partecipano diversi elementi interagenti tra loro, e la latitudine e la stagionalità influenzano in maniera importante la struttura termica delle acque e la meteorologia delle coste. La temperatura delle acque superficiali varia nel corso dell'anno dai minimi invernali ai massimi estivi e influenza notevolmente gli aspetti climatici delle coste ad esse adiacenti.

1.1.1 Il Mar Mediterraneo

Il Mar Mediterraneo influenza direttamente i mari ad esso collegati e con le sue peculiari caratteristiche, simili a livello di processi fisici agli oceani, può essere considerato un sistema oceanico in piccola scala. Situato tra Europa,

Africa e Asia, ha una superficie di 2,5 milioni di m^2 e un volume di 3,7 milioni di m^3 , con una profondità media di 1500 m e una profondità massima, raggiunta nella fossa ellenica, di oltre 5000m. La complessa topografia del fondale e i differenti regimi idrologici e atmosferici, permettono la suddivisione del Mediterraneo (Fig.2) in due bacini, quello occidentale e quello orientale. I due bacini sono a loro volta costituiti da mari interni: il bacino ovest comprende il Mare di Alboran, il Bacino Balearico ed il Mar Tirreno, quello est Mar Ionio, Mar Adriatico, Bacino Levantino e Mar Egeo. I forzanti principali della circolazione del Mediterraneo sono il sistema di entrata e uscita di acqua attraverso Gibilterra, lo stress del vento sulla superficie e i flussi di calore e acqua all'interfaccia aria-mare (circolazione termoalina). Il Mediterraneo presenta un bilancio negativo dove l'evaporazione eccede la precipitazione e supera l'apporto da parte dei fiumi, e un bilancio negativo di calore [$10W/m^2$] (Pinardi et al., 1993) che comporta la necessità di introdurre un ingente quantità di calore e acqua attraverso lo stretto.



Fig.2 Panoramica geografica del Mediterraneo

L'acqua atlantica superficiale più fredda scorre verso il Mediterraneo e viene trasformata da intense interazioni superficiali in acqua più densa e più salata, che poi viene fatta fluire nell'Oceano Atlantico. Queste interazioni producono una distribuzione superficiale di temperatura e salinità, che identificano masse d'acqua superficiali caratterizzate da specifici valori di temperatura, salinità e densità. Il Mediterraneo è il risultato di un delicato equilibrio tra la variabilità interannuale, stagionale e di mesoscala (Robinson et al., 2001), con una circolazione termoalina caratterizzata, attraverso variazioni di densità, temperatura e salinità, da movimenti orizzontali e verticali di masse d'acqua.

1.1.2 Il Mare Adriatico

Il Mare Adriatico può essere considerato un settore del Mar Mediterraneo. Situato tra la penisola italiana e la penisola balcanica, è un bacino semichiuso di forma allungata che ricopre un'area di circa 140 km². È quasi completamente circondato da catene montuose che ne determinano un impatto controllato dei venti che ne influenzano la circolazione: da nord-est la Bora e da sud-est lo Scirocco, che segue la direzione dell'asse maggiore del bacino tra Appennini e Alpi Dinariche (Zavatarelli et al, 2002). La sua lunghezza è di circa 800 km, la larghezza di 150 km, e può essere suddiviso in tre settori: Settentrionale, Centrale, Meridionale. La parte Settentrionale, caratterizzata da basse profondità e limitata pendenza, ha fondali che degradano omogeneamente sino ad una profondità di 70-75 m. L'Adriatico Centrale si estende dalla congiungente Ancona-Zara fino alla congiungente Gargano-Lastovo e presenta una caratteristica morfologica importante: un'area depressa, denominata Depressione Meso-Adriatica. L'Adriatico Meridionale si estende dalla congiungente sino alla soglia del parallelo di Otranto e presenta un andamento allungato in direzione nordovest-sudest, parallelo alle coste pugliesi e dalmato-albanesi. Il bacino è caratterizzato da una morfologia piuttosto regolare, interrotta solo eccezionalmente dalla presenza di rilievi sottomarini. La profondità scende al di sotto dei 1200 m e risale a circa 800 m in corrispondenza del Canale d'Otranto. Il Mar Adriatico differisce anche per ciò che riguarda la morfologia delle coste: il versante italiano è caratterizzato da coste basse, sabbiose e poco frastagliate, il versante orientale al contrario presenta un grande numero di isole, coste alte e frastagliate, il fondale è irregolare e scende molto più velocemente del margine opposto. Nell'alto Adriatico, l'acqua è generalmente poco salata per le peculiari condizioni climatiche che determinano alta piovosità che produce massicci apporti fluviali, che a loro volta influenzano la differenza (circa 5 g/l) di densità tra coste italiane e coste croate-slovene. Il divario di densità con il bacino meridionale è elevato e aumenta con la temperatura, perciò le correnti di gradiente hanno massima intensità. Il guadagno totale di acqua è positivo, con una media annuale di circa 1 metro, grazie al contributo dei fiumi e al quasi totale annullamento tra evaporazione e precipitazione (Raicich, 1996; Artegiani et al, 1997). Nel complesso l'Adriatico è un bacino di diluizione, contrariamente al Mediterraneo che è invece un bacino di concentrazione salina. Esso è molto interessante dal punto di vista della circolazione termalina che caratterizza gli spostamenti delle masse d'acqua e che differisce dalla circolazione superficiale caratterizzata invece dall'azione del vento. Queste variazioni di flussi determinano l'instaurarsi di un evidente termoclino nella stagione estiva. In primavera il flusso di calore all'interfaccia aria mare è invertito rispetto all'inverno e il progressivo accumulo di calore alla superficie genera una diminuzione di densità e l'instaurarsi del termoclino stagionale. In primavera e in estate la stratificazione verticale provoca la comparsa dei *gyres* e delle correnti costiere. Durante l'estate la profondità dello strato superficiale aumenta, di conseguenza si distinguono acque calde e dolci in superficie e più fredde, più salate e dense in profondità,

dando una configurazione ben stratificata alla colonna d'acqua. Al contrario il periodo invernale, da dicembre a marzo, mostra la colonna d'acqua fortemente instabile e molto rimescolata. Il mar Adriatico è soggetto durante l'inverno a notevoli perdite di calore, che contribuiscono a moti convettivi verticali, con la conseguente formazione di acqua profonda. Nell'area settentrionale, durante i mesi invernali, l'avvento di piogge, aria fredda continentale e fenomeni di bora causano un forte abbassamento della temperatura superficiale e un'elevata evaporazione, causando aumento della densità superficiale e innescando il meccanismo di rimescolamento verticale. Durante le stagioni invernali il tempo in Adriatico è caratterizzato da frequenti cicloni e anticicloni che si propagano da est all'interno della fascia occidentale. Oltre ai regimi di vento tipici, altri venti come il Libeccio, il Maestrone, e le brezze possono essere predominanti localmente, particolarmente in estate. Nel Nord Adriatico, generalmente la Bora domina l'intero bacino ed è molto comune durante le stagioni invernali (da novembre a marzo), presenta frequenza di vento forte (>15 m/s) che varia da un giorno al mese, in estate, a più di sei giorni al mese durante l'inverno (Meteorological Office, 1962). Lo Scirocco invece è un vento caldo che proviene dai deserti del Nord Africa e dall'Arabia, ha una velocità tipica di 10 m/s e non privilegia determinate stagioni rispetto ad altre. Gli eventi di vento forte di Scirocco sono solo di 10–12 ore e occasionalmente di 36 ore. Essendo un vento di mare lo Scirocco non è soggetto a variazioni locali, ma può mostrare variazioni geografiche causate dalla morfologia della costa. Lo Scirocco ha velocità massime lungo la costa est dell'Adriatico il suo intensificarsi è molto più graduale rispetto alla Bora, è in parte responsabile dell'innalzamento del livello del mare nell'alto Adriatico.

1.1.3 Area di studio - La zona costiera del Ravennate

La zona costiera del Ravennate, parte della costa romagnola, è una zona tipica delle aree costiere del Mediterraneo settentrionale ed è costituita prevalentemente da una costa bassa e sabbiosa che degrada dolcemente verso il mare. Alle spalle del sistema litoraneo si trovano, soprattutto a nord, vasti territori bonificati, con quote inferiori al livello del mare, occupati in parte da aree umide di rilevanza naturalistica. Si tratta di un ambiente dinamico, il cui equilibrio dipende dall'interazione tra diversi fattori: la variazione del livello del mare, le condizioni meteo-marine, gli apporti sedimentari fluviali, la subsidenza e le attività antropiche. Il motore della circolazione delle acque è il fiume Po che, con il suo apporto, favorisce l'estrema diluizione delle acque di questa zona costiera. Il tratto di costa della Provincia di Ravenna (Fig.3) ha una lunghezza totale di 47 km e comprende i Comuni di Ravenna e Cervia. Nel tratto costiero ravennate, sfociano numerosi corsi d'acqua tra cui il fiume Reno, che ha una lunghezza di 211 km e attraversa 3 province: Bologna, Ferrara, Ravenna. Il suo bacino idrografico si estende complessivamente in un'area di 4.172 km². La portata

media alla foce è, per il periodo primaverile, di $57 \text{ m}^3/\text{s}$. mentre per il periodo estivo è di $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Proseguendo verso sud, troviamo il canale Destra Reno, che ha origine in località Lavezzola dallo scolo Zaniolo che proviene dall'imoiese. Il Destra Reno si estende per una lunghezza complessiva di 37,64 km, attraversa quasi completamente la parte settentrionale della provincia di Ravenna e sfocia in mare seguendo il vecchio corso del fiume Lamone, in località Casalborsetti.

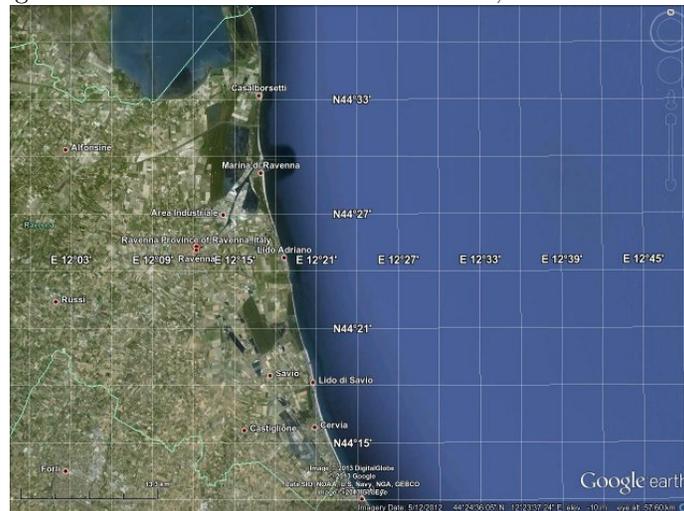


Fig.3 La zona costiera di Ravenna - L'area di studio

Il fiume Lamone, che nasce in Toscana, ha una lunghezza di 88 km e sfocia nel mare in località Marina Romea. Il Canale Candiano, che costituisce l'asse principale del porto di Ravenna, è protetto verso il mare da un avamposto racchiuso da due dighe che si protendono a mare per circa 3 km. Il canale è collegato ampiamente a due specchi vallivi, la Pialassa Baiona, a sinistra, e la Pialassa Piomboni, a destra. Il Canale del Molino, che sfocia in mare in località Punta Marina, raccoglie le acque provenienti da un territorio agricolo di circa 24 km^2 e le acque piovane di Lido Adriano. Il fiume Montone e il fiume Ronco, provenienti dal territorio della provincia di Forlì-Cesena, si uniscono a Ravenna dando origine al corso d'acqua denominato Fiumi Uniti che sfocia in mare fra l'abitato di Lido Adriano e Lido di Dante. Il bacino del torrente Bevano, dall'estensione di circa 314 km^2 , si sviluppa quasi esclusivamente in pianura fra il Savio e il Ronco, riceve numerosi affluenti che portano acque di scarichi fognari depurati e non depurati. Il bacino del fiume Savio, dall'estensione di circa 660 km^2 , in pianura si riduce al solo alveo del fiume e scorre per 35 km fra argini artificiali, 20 dei quali nel territorio di Ravenna. Il clima dell'area costiera di Ravenna è influenzato dal mare Adriatico e fornisce stagioni dall'aria molto umida, con il tasso di umidità che varia tra il 60% e l'80% durante il periodo estivo. Il clima è abbastanza mite, circa $9/11 \text{ }^\circ\text{C}$ (anche se nel 2010 è stata registrata una temperatura minima di $-7 \text{ }^\circ\text{C}$ e ci sono state frequenti e intense nevicate). La presenza delle Alpi a Nord e degli Appennini a Sud, pone

la Pianura Padana come una regione geografica chiusa, ad eccezione del lato Est (quello di Ravenna), dal quale arrivano i venti freddi dell'Europa orientale. L'area d'interesse è quindi una zona costiera con prevalenza di correnti verso sud, ma non è raro il verificarsi di inversioni di corrente che possono durare anche più di un mese. Si sa che questa corrente è forzata (G.Montanari, N.Pinardi, 2006) sia dall'apporto fluviale del Po, con le sue acque a bassa salinità, sia dai venti di Bora che caratterizzano l'area per molti mesi dell'anno. La stazione meteorologica di Punta Marina Terme è la stazione meteorologica di riferimento per il servizio meteorologico dell'Aeronautica Militare e per l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia(OMM), relativa all'area litoranea di Ravenna. La stazione meteorologica si trova nella zona di studio, nel territorio comunale di Ravenna, in località Punta Marina Terme, a 2 metri s.l.m. e alle coordinate geografiche $44^{\circ}27'N$ $12^{\circ}18'E$ - $44.45^{\circ}N$ $12.3^{\circ}E$. Oltre a rilevare i dati relativi a temperatura, precipitazioni, pressione atmosferica, umidità relativa, direzione e velocità del vento, la stazione è collegata ad una boa situata nell'antistante Mare Adriatico settentrionale, grazie alla quale è possibile osservare lo stato del mare, l'altezza dell'onda marina, la direzione dell'onda stessa, oltre alla lunghezza e all'altezza dell'onda morta.

1.2 Meteo-oceanografia e climatologia

La differenza tra Meteorologia e Climatologia è sottile ma significativa. Si tratta di distinguere tra il tempo meteorologico 'in tempo reale' e quello che 'in media' accade su una determinata area geografica di estensione più o meno grande. In Climatologia, dunque, non interessa tanto il singolo evento atmosferico o il tempo che fa in una determinata giornata, quanto la media calcolata degli eventi, insieme alla loro frequenza e intensità, mentre variazioni meteo giornaliere, stagionali o annuali devono essere considerate variazioni del tempo meteorologico di una zona. Studiare il clima, i suoi elementi, i suoi fattori e classificare gli eventi climatici caratteristici. Gli strumenti principali sono i modelli numerici, sistemi di equazioni che descrivono le relazioni fisiche intercorrenti tra le varie grandezze che determinano lo stato dell'atmosfera e lo stato del mare, consentendo di determinare in termini statistici le reazioni del clima ai cambiamenti e di prevederne le variazioni climatiche. La climatologia e la meteorologia sono due discipline, l'una a sfondo statistico e l'altra a sfondo meccanicistico, che si occupano di risolvere il medesimo problema. I modelli della climatologia differiscono da quelli della meteorologia semplicemente per la diversa scala spaziale e temporale, e per un maggior peso dell'aspetto statistico. Le osservazioni dello stato fisico dell'atmosfera sono l'elemento base per ogni stima fisico-matematica degli eventi atmosferici futuri. Le misurazioni da satellite consentono di sondare volumi del pianeta e della sua atmosfera un tempo irraggiungibili direttamente e garantiscono la continuità di rilevamento delle caratteristiche fisiche. La simulazione dell'atmosfera mediante modelli è il settore della meteorologia che si è maggiormente evoluto negli ultimi anni. I più sofisticati modelli simulano l'atmosfera suddividendola in milioni di elementi tridimensionali, in ciascuno dei quali vengono risolte le equazioni della fluidodinamica che descrivono l'evoluzione dell'atmosfera. Su scala globale viene risolta la dinamica delle grandezze atmosferiche di pressione, temperatura e delle altre variabili meteorologiche, fino a distanze di circa 40 km che, confrontate con la circonferenza massima terrestre di 40.000 km, danno un'idea del dettaglio con cui si descrive la fluidodinamica atmosferica. Con la simulazione quadridimensionale nello spazio e nel tempo della fluidodinamica atmosferica si sono affrontate le previsioni meteorologiche giungendo a elaborare diverse metodologie in funzione dell'estensione temporale della previsione stessa. Per l'oceano sono stati sviluppati modelli fluidodinamici che ne simulano, in modo analogo a quelli usati per l'atmosfera, l'evoluzione termica e dinamica. Lo sviluppo sia dei modelli atmosferici sia di quelli oceanici verso forme sempre più realistiche e sofisticate ha portato i meteorologi e gli oceanologi a cooperare, creando modelli di simulazione anche per l'interfaccia oceano-atmosfera. Si riproducono così, attraverso potenti computer, anche gli scambi di energia e di massa tra l'atmosfera e l'oceano. Ciò consente, con un meccanismo di retroazione (feedback), di correggere le previsioni dell'evoluzione dei due sistemi, atmosfera e oceano, in modo da fornire a ciascuno le proprie condizioni al contorno in forma più accurata di quanto non sia stato in precedenza. Il risultato di questa cooperazione tra meteorologi e oceanologi ha portato

alla realizzazione, su basi scientifiche, di previsioni meteorologiche stagionali. Il progresso di queste discipline è in gran parte legato a quello degli strumenti e degli elaboratori elettronici. In particolare, ha assunto un ruolo fondamentale l'osservazione da satellite, che fornisce, oltre ai dati atmosferici, anche dati su temperatura superficiale, stato del mare e caratteristiche dell'acqua marina; questi dati a loro volta consentono di impiegare modelli matematici per lo studio della circolazione oceanica, del trasporto dei sedimenti in aree costiere e delle variazioni di salinità. Mediante radar, batisonde, boe meteo-oceanografiche, sensori ottici e radiometri, si possono registrare con continuità parametri fisici e chimici di aria e acqua, valori del vento, del moto ondoso e di turbolenza, fenomeni di diffusione e di mescolamento. Il grande sviluppo della ricerca in oceanografia, climatologia e meteorologia poggia sul progresso tecnologico degli strumenti (sensori, dispositivi elettronici, elaboratori elettronici) e, vista la rapida evoluzione tecnologica in corso, è chiaro che ci attendono ancora ulteriori sviluppi.

1.2.1 Eventi medi e descrizione climatologica

In questo contesto, vengono ad assumere particolare importanza gli studi di 'analisi climatica' delle grandezze meteo-oceanografiche osservate, ovvero le anomalie e le regolarità dei parametri rispetto alla media del periodo di riferimento. La regione italiana (compresa tra il 47° ed il 36° parallelo nord) si trova quasi al centro della zona temperata dell'emisfero boreale, e dal punto di vista climatico è favorita dalla grande massa d'acqua dei mari mediterranei che la circondano quasi da ogni lato. Tali mari costituiscono un benefico serbatoio di calore e di umidità, e determinano, nell'ambito della zona temperata, un clima particolare detto temperato mediterraneo. Solo raramente si hanno temperature più alte di 40 gradi centigradi d'estate, o temperature inferiori ai 10 gradi sotto lo zero d'inverno. Le stagioni sono abbastanza ben definite: l'inverno è generalmente freddo, la primavera piovosa con giornate di sole, l'estate calda e secca e l'autunno sereno, più raramente piovoso, ma mai rigido. Essendo molto estesa da Nord a Sud, l'Italia può essere divisa in tre fasce climatiche distinte. La zona di studio è ubicata nella fascia climatica del Nord-Italia, all'incirca la parte compresa tra le Alpi e l'Appennino Tosco-Emiliano, ed ha un clima molto rigido d'inverno (nelle città del Nord-Italia, infatti, non sono rare le nevicate nei mesi di Dicembre, Gennaio e Febbraio), mentre l'estate è molto calda (a volte addirittura torrida) e con alti livelli di umidità. Le zone costiere sono meno calde durante l'estate e meno fredde durante l'inverno rispetto alle zone interne. L'Italia è compresa nella fascia dei climi mesotermici; tuttavia, a causa della sua estensione in latitudine, della sua orografia e dell'azione del mare che la circonda su tre lati presenta una notevole varietà di climi locali. Possono essere raggruppati tre tipi fondamentali: climi di montagna, clima continentale

e climi mediterranei, articolati a loro volta in vari sottotipi. Valori medi annui di temperatura compresi tra 12 e 14 °C si registrano sull'intera Pianura Padana e, fino alle coste, sulla pianura veneto-friulana e nelle aree pianeggianti della Romagna. L'escursione termica diurna (differenza tra la temperatura del giorno e della notte) è più marcata nelle località lontane dal mare e nelle aree montane. Tuttavia, in condizioni di vento di caduta, possono registrarsi valori di escursione termica molto elevata anche lungo le coste adriatiche, come è accaduto a Pescara il 30 agosto 2007, quando la temperatura massima ha toccato i 45 °C (record assoluto per la città abruzzese) e la minima della notte successiva è scesa sotto i 20 °C. Di fatto, sul versante adriatico le piogge sono generalmente più scarse rispetto all'area tirrenica e un fenomeno analogo, ma di segno contrario, accade anche per le temperature che, a parità di latitudine, sono più basse lungo l'Adriatico (mare chiuso e poco profondo) che lungo le coste occidentali. La differenza che si riscontra nei valori termici dei due versanti tende però a ridursi, procedendo da nord verso sud. A Genova la temperatura media di gennaio risulta di oltre 4 °C più alta che a Rimini (+8,0 °C contro +3,9 °C), a Bari e a Napoli le medie invernali sono invece molto simili. Va infine rilevato che la minore azione mitigatrice dell'Adriatico si fa ancor più evidente allontanandosi dalla costa. L'influsso mitigatore di questo mare tende a ridursi in modo significativo procedendo, anche di pochissimi chilometri, verso l'interno. In base ai dati rilevati dalla stazione meteorologica di Punta Marina Terme, la stazione di riferimento per la provincia di Ravenna, le medie climatiche del periodo 1971-2000, le più recenti in uso, indicano che la temperatura media del mese più freddo, gennaio, è di +3,5 °C, mentre quella dei mesi più caldi, luglio e agosto, è di +23,9 °C; mediamente si contano 35 giorni di gelo all'anno e 30 giorni con temperatura massima uguale o superiore ai +30 °C. I valori estremi di temperatura registrati nel medesimo trentennio sono i -13,8 °C del gennaio 1985 e i +38,4 °C del luglio 1983. Le precipitazioni medie annue si attestano a 584 mm, mediamente distribuite in 70 giorni di pioggia, con minimo relativo in inverno, picco massimo in autunno e massimo secondario in primavera per gli accumuli. L'umidità relativa media annua fa registrare il valore di 80,7 % con minimi di 75 % a giugno e a luglio e massimo di 88 % a dicembre; mediamente si contano 60 giorni di nebbia all'anno.

1.2.2 Eventi estremi

In base ai dati sui valori estremi registrati in Italia dalle stazioni meteorologiche del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, la temperatura più elevata mai registrata in Italia da una stazione meteorologica ufficiale è quella di +47,0 °C toccati dalla stazione meteorologica di Foggia Amendola il 25 giugno 2007. In Sardegna, si ha notizia del raggiungimento dei +47.2 °C a Muravera nel 1957. La temperatura minima più bassa registrata in pianura è quella di

-28,8 °C a Molinella in provincia di Bologna, nella notte tra il 12 gennaio e il 13 gennaio 1985. La grande città che, in occasione di quell'ondata di gelo, raggiunse il valore più estremo fu Firenze con -23,2 °C il 12 gennaio alla stazione meteorologica di Peretola. Notevoli furono anche i -22,0 °C della stazione meteo di Piacenza San Damiano. Nella classifica del freddo nei capoluoghi segue Torino, la cui temperatura più bassa registrata è stata di -21,8 °C alla stazione meteorologica di Torino Caselle (12/02/1956). A quote più elevate si sono registrati valori inferiori, tra i quali spiccano i -34,6 °C registrati al Plateau Rosà nel marzo 1971 e i -31,0 °C della stazione meteorologica di Dobbiaco nel gennaio 1947. Allargando lo sguardo a reti diverse dall'AM e dall'ENAV, utilizzando anche valori rilevati nell'ambito di ricerche scientifiche e dalle reti regionali, si trovano valori più alti e più bassi degli estremi fin qui discussi. Ad esempio, nel dicembre 2010 in località Busa Fradusta a 2607 m in Trentino, è stata registrata una temperatura minima assoluta di -48,3 °C. In riferimento alla regione Emilia-Romagna e, in particolare, alla zona di interesse, va fatto notare che il clima è fortemente influenzato dalla posizione geografica che comprende la porzione sud-orientale della pianura Padana, circondata a est dal mare Adriatico e a sud, sud-ovest dagli Appennini. Questi elementi geografici portano a una forte variabilità climatica spaziale e temporale che coinvolge sia i valori medi, sia la frequenza e l'intensità degli eventi meteorologici estremi. Nel corso degli ultimi dieci anni, l'Emilia-Romagna è stata interessata dal verificarsi di forti anomalie climatiche che hanno interessato gran parte del continente Europeo. Nell'estate del 2003, la più calda dall'inizio del XX secolo, anche la temperatura minima è stata caratterizzata da forti anomalie che hanno raggiunto valori massimi di 6°C a Codigoro, sul delta del Po, e di 5°C a Sestola. Inoltre è stata particolarmente secca: a Reggio Emilia si è verificato un periodo record di 32 giorni consecutivi senza pioggia. Durante il periodo 1958-2000, in Emilia-Romagna, la variabilità dei valori medi è stata accompagnata da variazioni significative nella frequenza degli eventi estremi, specialmente per quanto riguarda la temperatura: il 10° percentile della temperatura minima e, ancor più, il 90° percentile della temperatura massima hanno presentato crescite lineari significative e sono state accompagnate da una significativa riduzione nel numero di giorni con gelo e da un aumento nell'indice di durata delle onde di calore. I valori medi di precipitazione stagionale sono stati caratterizzati da un calo lineare in inverno, e da una crescita in estate e in autunno. La lunghezza del periodo di giorni consecutivi senza pioggia è aumentata, mentre il numero di giorni con piogge intense è calato significativamente in inverno e in primavera, ed è cresciuto in estate, specialmente sugli Appennini. Per quel che riguarda strettamente la zona di studio, i dati prelevati dalla Stazione Meteorologica di Punta Marina Terme indicano che le temperature massime e minime assolute mensili, stagionali ed annuali dal 1951 ad oggi, presentano alcuni valori di elevato interesse. La massima assoluta del periodo è di +39,0 °C e risale all'agosto 1952, mentre la minima assoluta di -14,0 °C è del febbraio 1956. Le previsioni per il clima futuro dell'Emilia-Romagna (Cacciamani, 2005) e della zona di studio di questo elaborato, per il periodo 2070-2100, indicano che sarà significativamente più caldo in tutte le stagioni, sia rispetto alla temperatura minima, sia alla massima.

1.3 Obiettivi della tesi

La zona costiera del Ravennate, influenzata superficialmente da un numero esiguo di venti e, a livello di apporti fluviali, dipendente soltanto da modesti, e tendenzialmente trascurabili, corsi d'acqua, è una regione meteo-climatologica a basso impatto di eventi estremi. Questo elaborato si pone il fine di studiare la meteo-oceanografia dell'area di studio sull'arco di un anno solare (2011) e di valutarne le distribuzioni, attraverso i dati forniti dal modello atmosferico COSMO-ME e dal modello oceanico AFS (Adriatic Forecasting System), alla ricerca di eventi significativi. Tuttavia le incertezze delle previsioni a scala locale, la sempre più crescente ampiezza di scala delle variabili climatiche e la specifica rilevanza degli indicatori per i diversi settori di impatto, rendono necessario che, insieme ai risultati dei modelli, sia importante disporre anche di capacità di lettura delle tendenze del clima attraverso intuizioni derivate dalle serie temporali delle osservazioni ed elaborate mediante metodi e modelli statistici adeguati. I dati elaborati dai modelli permettono un'adeguata copertura dei parametri di interesse e delle principali variabili meteo-climatiche trattate; in particolare, si è scelto di estrapolare le serie riguardanti la temperatura atmosferica, le precipitazioni, i venti, le correnti marine superficiali e le temperature marine superficiali. Per ciascuna variabile, si sono elaborate diverse serie di estrapolazioni, su scala mensile ed annuale. Sono stati calcolati i valori climatologici normali (cioè i valori che rappresentano la media delle variabili climatiche su un intervallo di riferimento) e i valori di anomalia (cioè la differenza tra il valore di una variabile climatica di un certo giorno e il suo valore climatologico medio). I valori climatologici normali e i valori di anomalia prodotti sono anche stati esplicitati sotto forma di tabelle, grafici e mappe. Le valutazioni climatiche elaborate costituiscono una base informativa di riferimento per la redazione di un rapporto sullo stato meteorologico del periodo preso in esame e sulle sue tendenze. Con gli stessi dati è inoltre possibile rilevare la presenza o meno di trend delle variabili climatiche sul territorio d'interesse preso in esame per questo elaborato, di stimarne l'entità e di confrontarli con altri relativi a diversi periodi temporali. Per le finalità di questo elaborato e per il periodo temporale preso in osservazione, si è deciso di procedere all'individuazione, laddove possibile, di eventi così detti 'estremi'. Attraverso la verifica dell'omogeneità delle serie, cioè della presenza e dell'eventuale influenza di variazioni dovute a fattori esterni non climatici, si è potuto validare i dati a disposizione e procedere alla valutazione delle serie ottenute per l'individuazione delle anomalie. L'individuazione di valori estremamente distanti dai valori medi e ben oltre la normale deviazione standard, ha permesso di contrassegnare i picchi rappresentativi. Una volta definita la climatologia su base temporale e stabilite le variabili di interesse, calcolando le medie mensili, le relative deviazioni standard e le relative anomalie (inizialmente per ogni punto della griglia dell'area di studio e poi mediandole sul dominio) per il periodo temporale in esame, si ottiene un insieme di dati, di grafici e di mappe che, attraverso uno studio panoramico d'insieme, permettono l'individuazione di eventi di particolare interesse. Graficamente, si evince quanto il

clima di ogni mese, a livello giornaliero, si discosta da quello della linea media. Nei grafici annuali, il plot grafico indica lo spostamento dei valori assunti della variabile, le barre mensili orizzontali indicano lo scostamento della deviazione standard dalla media e la variazione nello scarto indica l'ampiezza della anomalia. Valutando i dati delle anomalie rispetto ai dati medi mensili sull'arco di tutto l'anno preso in esame, si può estrapolare e verificare la presenza o meno di eventi cosiddetti estremi, cioè esterni alla distribuzione media dei valori. L'elaborato amplia il contesto di studio, attraverso la ricerca di notizie storiche circa eventi realmente accaduti e la verifica di corrispondenza tra questi e le segnalazioni che emergono dall'analisi dei dati elaborati dai modelli previsionali COSMO-ME ed AFS.

2 Dati e Metodi

2.1 Sistemi di monitoraggio e previsione

I modelli atmosferici simulano l'evoluzione delle condizioni atmosferiche su di una griglia tridimensionale con risoluzione variabile a seconda delle necessità e dei sistemi di coordinate e di griglie utilizzati. La previsione ottenuta è di tipo deterministico e le grandezze tempo e spazio sono strettamente dipendenti tra loro. Risolvere le equazioni ad una risoluzione spaziale molto elevata e in base ad una scala temporale ampia dei fenomeni meteorologici può richiedere tempi e risorse molto elevati. Aumentando la risoluzione spaziale e temporale il sistema di equazioni differenziali tende a simulare un'atmosfera sempre più reale, ad avvicinarsi sempre più al vero. Purtroppo c'è una limitazione a tale scelta legata alla velocità di calcolo degli elaboratori elettronici, infatti, per produrre una previsione meteorologica, un modello risolve delle equazioni differenziali fluido dinamiche fortemente non lineari, legate nel tempo alle tre componenti spaziali. Per funzionare, un modello ha bisogno di una stima dello stato iniziale dell'atmosfera proveniente da il maggior numero possibile di osservazioni, dati ottenuti da strumentazioni meteo di stazioni a terra e satellitari. La variazione del tempo meteorologico, cioè di grandezze come la temperatura, il vento, l'umidità, et simila, è descritta da un sistema di equazioni, detto modello matematico, che rappresentano i processi dinamico-fisici agenti nell'atmosfera. Le equazioni non hanno una soluzione esatta e sono risolte con metodi approssimati che considerano l'atmosfera suddivisa in un certo numero di volumi di dimensione finita. La dimensione dei volumi caratterizza la risoluzione spaziale di un modello numerico. I centri di previsione operativa, come il Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica (CNMCA), sono in grado di fornire informazioni con dettaglio dell'ordine di pochi chilometri utilizzando modelli numerici di previsione così complessi da richiedere l'uso di super-calcolatori. Il CNMCA è dotato di un super-calcolatore del tipo 'Cluster Linux' (insieme di computer connessi in parallelo ed operanti all'unisono come se fossero un unico computer) con prestazioni dell'ordine della decina di teraflops (10^{12} floating point operations per second). La raccolta delle osservazioni meteorologiche avviene nel quadro di cooperazione stabilito dal Programma World Weather Watch (WWW) dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (OMM). Le osservazioni, sul territorio nazionale così come nel resto del mondo, sono effettuate nell'ambito del WWW rispettando i dettami del Global Observing System (GOS), il cui scopo è quello di regolamentare e garantire le osservazioni dello stato dell'atmosfera e della superficie oceanica per consentire analisi, previsioni, avvisi, per il monitoraggio del clima e dell'impatto ambientale. Tutte le osservazioni sono scambiate a livello mondiale per mezzo del Global Telecommunication System

(GTS), elemento del WWW. Ogni Nazione è tenuta a raccogliere i propri dati di osservazione meteorologica per la trasmissione sulle reti di telecomunicazione del GTS. Il settore dell'assimilazione dei dati (Data Assimilation) si occupa di stimare il migliore stato iniziale possibile dell'atmosfera considerando tutte le osservazioni raccolte a disposizione in una certa finestra temporale. Tali dati, irregolarmente distribuiti nello spazio e nel tempo, sono analizzati con l'impiego di algoritmi statistico-numeriche per ottenere la migliore stima dello stato dell'atmosfera, rappresentato su di un grigliato tridimensionale regolare ad un istante di tempo fissato. L'uso delle osservazioni per l'inizializzazione di un modello numerico è una peculiarità dei centri meteorologici operativi. Il CNMCA ha sviluppato nell'ambito del consorzio COSMO il sistema Versus, che costituisce uno strumento flessibile e configurabile per la verifica delle previsioni numeriche. Tale sistema permette di effettuare verifiche statistiche su tutti i modelli operativi presso il CNMCA e sul modello globale di riferimento IFS(Integrated Forecast System) del ECMWF(Centro Europeo per le Previsioni Meteorologiche a Medio e Lungo Termine). Report mensili e trimestrali per opportuni parametri al suolo ed in quota vengono redatti e resi pubblici sul sito del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica, come pure report specifici ad uso interno e per gli scopi scientifici del consorzio COSMO.

2.1.1 Modelli globali e modelli ad area limitata

Prevedere il tempo meteorologico è un processo che si diversifica a seconda della tipologia della previsione, in termini di dettaglio spaziale e di scadenza temporale. Particolareggiare la previsione tra un'ora in una determinata località e nelle zone circostanti, è completamente diverso dal prevedere come sarà il tempo tra dieci giorni in Italia. Gli elementi che si utilizzano sono più o meno gli stessi: osservazioni (misure di temperatura, vento, umidità, pressione e determinate variabili meteorologiche), modelli, eventualmente elaborazioni di tipo statistico e computazionale. La loro importanza relativa, il modo in cui si usano e il modo in cui si combinano sono però sostanzialmente differenti. Per la previsione a 1-2 ore, tecnicamente definita *nowcasting*, le osservazioni giocano un ruolo fondamentale e il modello viene eventualmente utilizzato per fornire continuità, spaziale e temporale. Raccogliere i dati, trasmetterli con rapidità, combinarli al meglio ed estrapolarli nel tempo sono gli ingredienti essenziali. Dal paio di ore in avanti, pur rimanendo in un ambito di osservazione essenziale, la previsione è completamente affidata al modello numerico previsionale. Il modello può essere considerato come un simulatore in grado di descrivere l'evoluzione dello stato dell'atmosfera e del mare. La parte fondamentale è definire lo stato da cui far partire la simulazione, o condizione iniziale, che consiste in una procedura basata totalmente sulle osservazioni. Osservazioni significa raccolta dati: osservazioni a terra, da radiosondaggio, da satellite, da navi, da aerei, da

radar meteorologici, da Gps e da ogni sistema in essere all'interno del nostro modello. Tutte queste informazioni devono poi essere elaborate, sottoposte a un controllo di qualità e infine utilizzate per fornire un quadro coerente e idoneo a rappresentare lo stato climatologico e/o meteorologico dal quale il modello possa partire (avviare cioè l'integrazione numerica delle sue equazioni). I dati non possono infatti essere usati brutalmente; devono essere resi assimilabili dal modello, per essere inseriti nel processo previsionale. L'approssimazione si basa su una discretizzazione dei dati ottenuti dai parametri meteorologici e le differenti risoluzioni, a cui è possibile applicare il modello, possono presentare realtà caratteristiche fisiche e topografiche differenti. Aspetto fondamentale è la distribuzione spaziale del modello di previsione: non è la stessa cosa prevedere il tempo meteorologico su di area regionale, su di una nazione o su di un continente. E' fondamentale scegliere con cura gli obiettivi previsionali e, di conseguenza, i modelli associabili a tali scelte. In base quindi alle scale sia spaziali che temporali che si pongono come obiettivo delle previsioni, vanno accuratamente scelti i modelli previsionali che verranno utilizzati, poiché le singole equazioni alla base delle elaborazioni previsionali sono tarate in base alla dimensione spaziale e temporale dell'area e del tempo di interesse.

2.1.2 Il modello COSMO-ME

Il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare, con il suo Centro Nazionale di Meteorologia e Climatologia Aeronautica CNMCA, e' l'organo nazionale ufficiale di riferimento per le previsioni meteorologiche. Come avviene nella maggior parte dei Servizi Meteorologici Nazionali europei, per le previsioni a medio termine ed a scala globale viene utilizzata la produzione numerica elaborata dal Centro Meteorologico Europeo per la Previsione a Medio termine (ECMWF). L'ECMWF, costituito da tutti i paesi del continente, fornisce a scala globale le migliori previsioni numeriche attualmente disponibili. Tuttavia un modello globale, per ragioni di tempo di calcolo, non puo' essere impiegato ad alta risoluzione, e non puo' quindi descrivere in modo accurato i fenomeni locali. Data l'importanza dei dettagli specie in mari interni come il Mediterraneo, circondato per larga parte da una rilevante orografia, e' preferibile usare un modello a scala locale. Il CNMCA ha messo a punto e reso operativo ad alta risoluzione il modello numerico di previsione dello stato dell'atmosfera COSMO-ME che copre l'intero bacino mediterraneo. La formulazione generale di COSMO-ME è sviluppata nell'ambito del consorzio internazionale COSMO (COntortium for Small Scale MOdelling) costituito dai Servizi Meteorologici Nazionali di Germania, Grecia, Italia, Polonia, Romania e Svizzera, e considera tutti i processi fisici e dinamici rilevanti che guidano l'evoluzione dell'atmosfera. Il modello COSMO è un sistema di previsione atmosferica non idrostatica ad area limitata e le equazioni di tale modello vengono risolte numericamente su calcolatori estrema-

mente potenti in tempo utile per un'effettiva previsione. COSMO-ME(Fig.4) è integrato a partire da condizioni iniziali interpolate dal sistema avanzato di assimilazione dati del CNMCA (Bonavita e Torrisi, 2005) ed innestato nel modello globale dell'ECMWF. Esso fornisce previsioni fino a 72 ore su una griglia con risoluzione orizzontale di 7 km e 40 livelli verticali. Il principale obiettivo del consorzio COSMO è quello di sviluppare, migliorare e mantenere un sistema di modelli ad area limitata (limited area model(lam)) non idrostatici da utilizzare sia per l'operatività e sia per le applicazioni di ricerca dei membri di COSMO. La griglia del modello COSMO-ME presenta un sistema di coordinate sferiche, dove il polo è inclinato e l'equatore passa attraverso il centro del dominio. Il modello si basa su equazioni primitive termo-idrodinamiche che descrivono il flusso comprimibile in un ambiente atmosferico. Le equazioni del modello sono formulate in coordinate geografiche ruotate e una discreta varietà di processi fisici sono presi in considerazione dai regimi di parametrizzazione del modello.

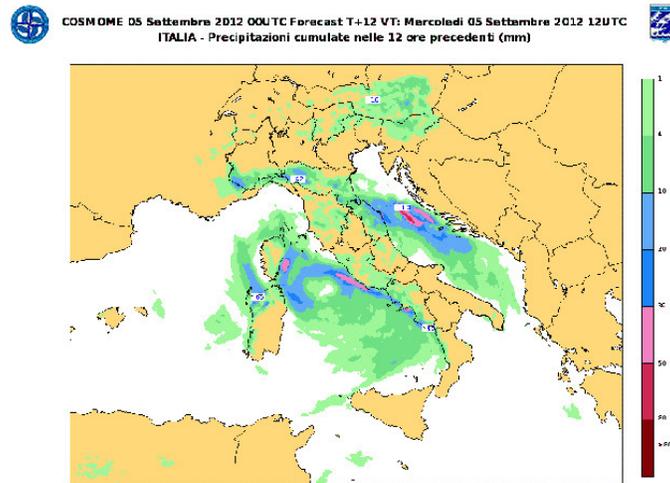


Fig.4 Modello COSMO-ME Precipitazioni cumulate su 12 ore

2.1.3 Il modello AFS

Il Gruppo Nazionale di Oceanografia Operativa (GNOO) dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) sviluppa, per i suoi studi e per le previsioni dello stato del mare, modelli oceanografici: MFS (Mediterranean Forecasting System), che copre l'intero Mediterraneo, e l'AFS (Adriatic Forecasting System) (Fig.5) riguardante invece la zona dell'Adriatico. I modelli numerici per previsioni oceanografiche iniziarono a essere utilizzati all'inizio degli anni '90 (Pinardi et al, 2002) ed entrambi i modelli riescono a valutare l'andamento

e lo stato fisico del mare. Per quanto riguarda in particolare il modello AFS l'area di studio riguarda il solo bacino Adriatico e il modello numerico usato è il Princeton Ocean Model (POM) implementato sul mar Adriatico (Guarnieri, 2010), la cui risoluzione è $1/45^\circ$, circa 2 km. Questa implementazione, è denominata AREG (Adriatic REGIONal model). AFS è testato nel modello a scala di bacino MFS, dal quale riceve le condizioni iniziali. AFS ha una risoluzione maggiore rispetto al modello MFS, un modello a più bassa risoluzione e rappresentativo di correnti medie, e permette di osservare anche correnti più intense affette da vortici e turbolenze. AFS e MFS producono ogni giorno una previsione per i successivi 10 giorni riguardo la direzione e l'intensità delle correnti, la temperatura e il livello del mare. Per entrambi i modelli si utilizzano come dati di vento i forzanti atmosferici forniti dall'ECMWF (European Center for Medium range Weather Forecast). Analogamente al modello meteorologico atmosferico, nel caso delle variabili marine, l'informazione viene fornita su un insieme di punti, cioè ai nodi di una griglia che descrive appunto il bacino di interesse, la geometria delle coste e la sua batimetria.

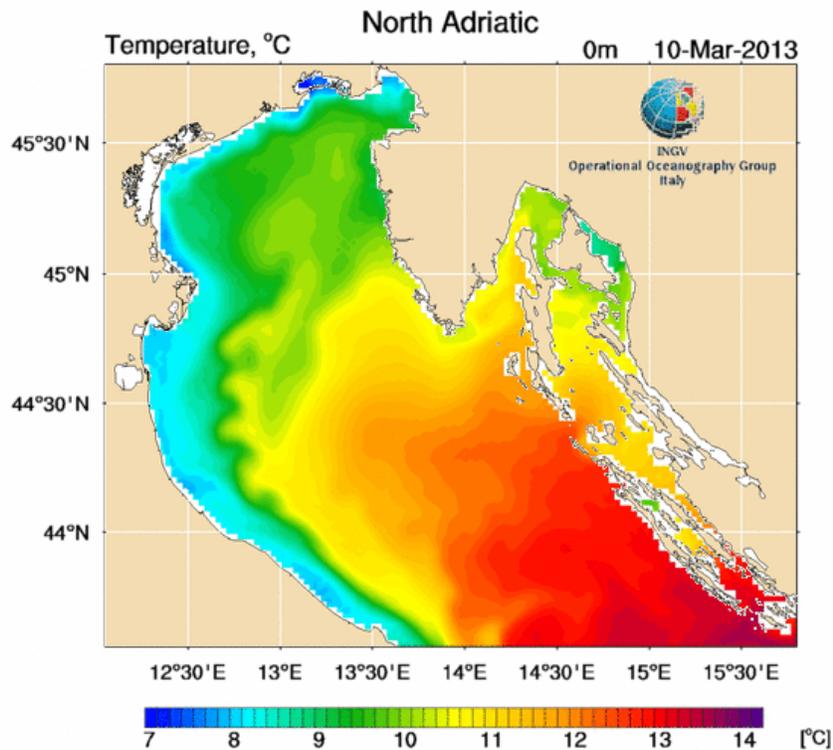


Fig.5 Modello AFS Temperatura marina superficiale - Nord Adriatico

2.2 Analisi Meteorologica e climatologica

2.2.1 Dataset

Un dataset è, semplicisticamente parlando, un insieme di dati e solitamente si tratta di dati strutturati in forma relazionale. In genere, un dataset si presenta in forma tabulare: ogni colonna rappresenta una variabile di indagine e ogni riga rappresenta un membro del dataset, o meglio, una lista dei valori corrispondenti alle determinate variabili di indagine rilevati nei determinati step temporali. Normalmente si identifica un dataset come una tabella contenente dati, la cui struttura rende agevole il lavoro di elaborazione dei dati stessi, permettendo l'applicazione di modelli di analisi statistica, comparata e di tipo previsionale. Partendo da osservazioni dei parametri meteorologici standard ottenuti dal modello COSMO-ME e dal modello AFS, è possibile implementare accurati dataset su diverse scale temporali. Nel caso di questo elaborato, posta come condizione la determinazione della variabilità stagionale dell'Alto Adriatico e la scala temporale nell'arco di un anno solare, le variabili di interesse si sono espletate attraverso medie annuali e medie mensili di precipitazioni, vento, temperature atmosferiche attraverso il dataset COSMO-ME, e correnti marine superficiali e temperature marine superficiali attraverso i dataset AFS-ARGC. La rilevazione degli eventi estremi dai dataset è auspicabile attraverso determinati parametri: la vorticità nel caso del vento, la quantità nel caso delle precipitazioni, valori fuori norma per le temperature minime, medie e massime, e i picchi fuori scala per le correnti. Le conclusioni dovranno tenere conto di un eventuale sufficienza o meno della risoluzione utilizzata dal modello e della concordanza dei risultati con gli studi climatologici effettuati in precedenza e riguardanti gli eventi estremi. La verifica degli eventi estremi deve passare necessariamente attraverso la corrispondenza con i dati rilevati presenti nei dataset e, ovviamente, deve far giungere alla conclusione se sia possibile o meno l'utilizzo dei dataset in oggetto per la previsione di eventi futuri. In particolare, i dati COSMO-ME utilizzati per l'area di interesse sono forniti su di una griglia regolare a spaziatura di 7 Km, con un dominio con le seguenti caratteristiche: $44^{\circ}11'25''$ N - $44^{\circ}37'50''$ N di latitudine con 8 punti griglia e 12° E - $12^{\circ}45'$ E di longitudine con 13 punti griglia. Questi dati sono forniti in formato binario grb e vengono trattati direttamente in questo formato attraverso l'utilizzo di alcuni script MatLab. Il nome del file di analisi è AAAAMMGG.grb, dove AAAAMMGG è la data del giorno a cui si riferiscono i dati, e nello specifico AAAA si riferisce all'anno, MM si riferisce al mese, GG si riferisce al giorno di provenienza dei dati. All'interno dei dati giornalieri COSMO-ME, i dati sono poi forniti con una risoluzione temporale a 6 ore, rispettivamente con rilevamenti alle 00, alle 06, alle 12 e alle 18. Per quanto riguarda i file AFS si tratta di archivi di file NetCDF (Network Common Data Form), uno standard aperto di array orientati alla catalogazione e alla fruizione

di database di dati scientifici, promosso e divulgato dal University Corporation for Atmospheric Research (UCAR) e dal Open Geospatial Consortium come standard internazionale per il settore. I file AFS sono indicizzati nel formato AAAAMMGG e, attraverso la conversione in matrici, diventano facilmente accessibili e computabili attraverso ambienti come MatLab per l'estrapolazione dei dati e delle variabili di interesse. Essendo i domini dei campi istantanei leggermente differenti tra i due modelli utilizzati, il dominio scelto per il modello AFS risulta con le seguenti caratteristiche: $44^{\circ}11'31.2''$ N - $44^{\circ}36'36''$ N di latitudine con 20 punti griglia e $12^{\circ}11' 60''$ E - $12^{\circ}44' 24''$ E di longitudine con 19 punti griglia. E' agevole quindi la costruzione di mappe dinamiche elaborate sulle informazioni del modello COSMO-ME per le variabili atmosferiche di interesse, ed analogamente sulle informazioni elaborate dal modello AFS per le variabili marine di interesse. Questo rende le interpretazioni dei dati contenuti nei dataset COSMO-ME e AFS e nelle relative previsioni, più che sufficienti per la maggior parte degli scopi pratici che questo elaborato si pone.

2.2.2 Metodi e strumenti di analisi

Non tutti gli estremi sono uguali. Le discussioni sulle *variazioni estreme* in generale, senza specificare esattamente di cosa si sta parlando, possono risultare prive di significato. Un tornado è un evento estremo, ma le cui cause, sensibilità al cambiamento e gli impatti non hanno nulla a che fare con quelli relativi a una tempesta di ghiaccio, o di un ondata di calore o di un focolaio di aria fredda o di un periodo di siccità. Non esiste una teoria esatta o un risultato specifico che indica esattamente cosa sia un evento estremo in generale. Si tratta di un corollario, spesso ben distinto per livello regionale e temporale, infatti alcuni estremi diventeranno più comuni in futuro (e altri un po' meno) e alcuni eventi estremi si diffonderanno a livello globale, mentre altri diventeranno specifici di particolari zone o regioni. L'attribuzione degli estremi è difficile e la particolarità delle valutazioni cambia in base alle zone di interesse, alle variabili di interesse e alla particolare scala temporale presa in esame (Hansen et al, 1998-2012). Come ha dimostrato Hansen, si può ottenere una *valutazione di estrema* attraverso una metodologia molto semplice. Se si definisce un climatologia (nel caso di questo elaborato, ci si riferisce all'anno solare 2011), si calcola la media stagionale (nel nostro caso, siamo passati a valutazioni mensili) e la deviazione standard per ogni punto della griglia per questo periodo, e quindi si sommano le deviazioni alla media, si otterrà un chiaro riscontro di quali valori oltrepassino la scala dei valori così detti normali. Per mostrare l'evidenza di valori estremi significativi, abbiamo calcolato la media delle anomalie: sottraendo ai campi istantanei il valore dell'anomalia media mensile e mediando i valori ottenuti sul dominio. Nei grafici annuali delle medie delle anomalie, i valori significativi non sono altro che i 'picchi' mostrati dall'andamento delle variabili di interesse. Inoltre,

per ottenere un grafico esplicativo della climatologia annuale su base mensile, abbiamo eseguito il plot della media mensile delle variabili e della relativa deviazione standard, ciò ha permesso di catturare il ciclo di media stagionale del parametro e di comprenderne la massima variabilità in corrispondenza dei valori massimi di deviazione standard. Normalizzando le deviazioni rispetto alla media, ad esempio, per le temperature atmosferiche e marine, otteniamo un grafico molto simile a una distribuzione gaussiana a campana. Per avere riprova della validità delle elaborazioni di dati svolte e per avere un ulteriore parametro di valutazione, abbiamo svolto altre indagini sui dati a disposizione. Abbiamo calcolato anche l'Anomalia Standardizzata ((valore istantaneo - valore media mensile)/deviazione standard mensile relativa) e impostato come soglia per l'individuazione degli eventi un valore limite di 1.5. I valori ottenuti attraverso l'anomalia standardizzata rispecchiano quelli ottenuti precedentemente con la differenza media delle anomalie e tutte le analisi fatte rimangono valide. L'unica differenza è che impostando una soglia di 1.5, otteniamo una cernita maggiore e gli eventi che presentavano valori estremi soltanto per una variabile (di cui era stato trovato riferimento soltanto nei siti di meteorologia e non attraverso rapporti ufficiali) non vengono considerati significativi. Per delimitare l'area di analisi, si è proceduto per piccoli step successivi, utilizzando GoogleEarth e cercando di delimitare un'area che comprendesse in parti simili costa e mare, e che fosse rappresentativa del litorale ravennate. Una volta stabilita e delimitata l'area di studio, sono stati presi in esame i dataset COSMO-ME ed AFS, e si è provveduto ad assimilarli alle caratteristiche all'area di studio. Si è così ottenuto un archivio costituito di file per ogni giornata dell'anno solare 2011 e caratterizzati dalla copertura geografica prescelta attraverso una suddivisione punti griglia 8x13 per il modello COSMO-ME e 19x20 per il modello AFS-ARGC. Attraverso alcuni programmi creati appositamente durante la redazione di questo elaborato, questi file sono stati letti e trasformati in una forma matriciale multidimensionale compatibile con l'ambiente di lavoro MatLab. MatLab, abbreviazione di Matrix Laboratory, è un ambiente multiplatforma per il calcolo numerico e l'analisi statistica. Consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, permette di interfacciarsi con altri software agevolmente e mette a disposizione degli utenti anche un potente linguaggio di programmazione proprietario simile al diffuso javascript. MatLab è l'ideale per la analisi numerica dei dati provenienti dai dataset in esame: è in grado di risolvere agevolmente i modelli di previsione meteorologica e climatologica, e permette di trasformarli in rappresentazione grafiche e mappe. Trattando contemporaneamente le matrici con i dataset e quelle con le serie delle medie che sono state elaborate, è stato possibile confrontare file da migliaia di dati in maniera rapida. Con operazioni di confronto multiplo è stato possibile individuare le anomalie più significative per tutte le variabili principali. Inoltre, attraverso le funzionalità di plotting integrate all'interno dell'applicazione MatLab, è stato possibile esplicitare in diverse forme grafiche le varie distribuzioni dei dati. In particolare, sono stati prodotti grafici e mappe di varia natura e, per ogni giornata, sono stati presi in esame i dati suddivisi su 4 step temporali a 6 ore, cioè i dati relativi alle 00, alle 06, alle 12 e alle 18, per una copertura

effettiva di tutte le 24 ore. Per una selezione dei casi più estremi, si è optato per effettuare una valutazione congiunta di tutte le variabili di interesse e di verificare laddove la convergenza di più valori estremi potesse trovare riscontro in eventi meteorologici particolari realmente accaduti. Per effettuare un chiaro riscontro, si è effettuata una ricerca all'interno dell'archivio *Rapporti di eventi meteorologici* del Servizio Idro-Meteo-Clima dell'Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna. Dai dataset sono state estrapolate le variabili di interesse: temperatura atmosferica a 2m, precipitazioni atmosferiche, modulo e velocità del vento a 10m, temperatura marina superficiale e correnti marine superficiali.

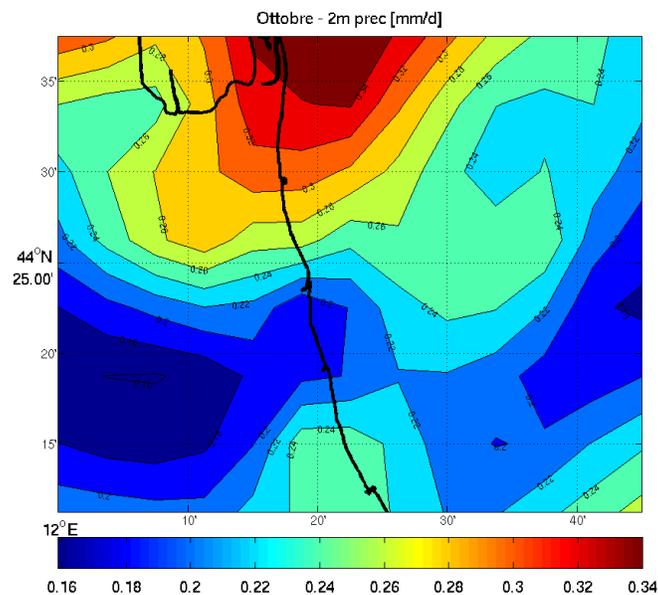


Fig.6 Mappa delle precipitazioni medie mensili per il mese di Ottobre

Sono stati elaborati script per la rappresentazione grafica dei dati giornalieri: sotto forma di mappa, a livello giornaliero, vengono prodotti 12 files di immagini grafiche (4 variabili di interesse per 4 step temporali, ma le componenti del vento vengono visualizzate nella stessa figura attraverso una rappresentazione a frecce). Uno script è stato programmato per prendere in esame, a livello mensile, tutti i dati giornalieri disponibili per ogni variabile di interesse e per calcolare delle medie mensili specifiche per ogni punto della griglia dei campi istantanei. I valori sono stati plottati come mappe grafiche per ognuna delle variabili di interesse, in Fig. 6 viene mostrata, a titolo di esempio, la mappa delle precipitazioni atmosferiche medie mensili per il mese di Ottobre. Attraverso il caricamento complementare all'interno dell'ambiente MatLab della matrice

dei dati dei campi istantanei giornalieri suddivisi sui 4 step temporali e della matrice delle medie mensili calcolate, è stato possibile programmare uno script per il calcolo delle anomalie specifiche per i punti grigliati relative ai 12 mesi che compongono l'anno di studio.

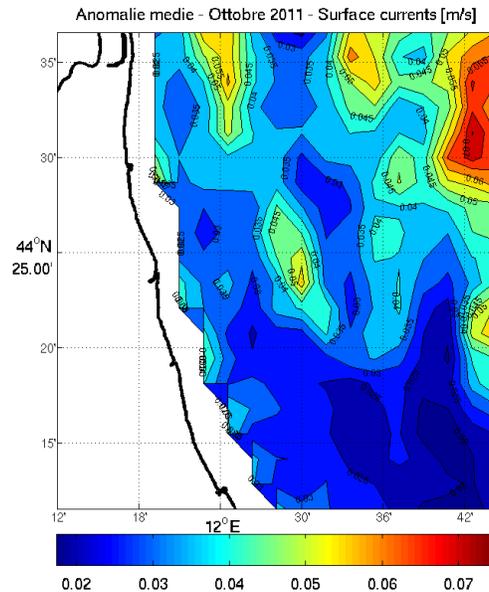


Fig.7 Mappa delle anomalie medie delle correnti marine superficiali per il mese di Ottobre

E' stato poi programmato un output grafico delle anomalie medie, in Fig.7 viene mostrata la mappa delle anomalie medie delle correnti marine superficiali, e, attraverso uno script di zoom, è stato possibile verificare visivamente su mappa la giornata o lo step temporale delle anomalie di particolare interesse. Analizzando le mappe climatiche correlate, è stato possibile verificare tutte le variabili di interesse nell'ordine temporale della verifica della anomalia stessa. Questa analisi permette di verificare le connessioni tra le variabili e di monitorare la panoramica meteo-climatologica presente al verificarsi della anomalia o evento estremo. Al termine di tutte le trattazioni giornaliere e mensili e dopo aver prodotto i relativi grafici e le relative mappe, si è provveduto ad organizzare una panoramica annuale di tutte le variabili di interesse. Sono stati creati grafici che mostrano l'andamento giornaliero delle medie delle anomalie (Fig.18-22) e delle anomalie standardizzate (Fig.23-27) per le temperature atmosferiche e per le variabili marine, e l'andamento sui 4 step giornalieri per le altre variabili atmosferiche, su tutto l'arco annuale.

3 Risultati

3.1 Analisi dei Dataset

Per fornire una panoramica della climatologia della zona di studio secondo i parametri di interesse, si è ritenuto opportuno calcolare sull'arco dell'anno in esame la media mensile e la relativa deviazione standard. Ciò ha permesso di catturare il ciclo di media stagionale del parametro e di comprenderne la massima variabilità in corrispondenza dei valori massimi di deviazione standard. I grafici delle medie mostrano che le temperature assumono un tipico andamento sinusoidale, mentre gli altri parametri evidenziano un andamento periodico e meno marcato.

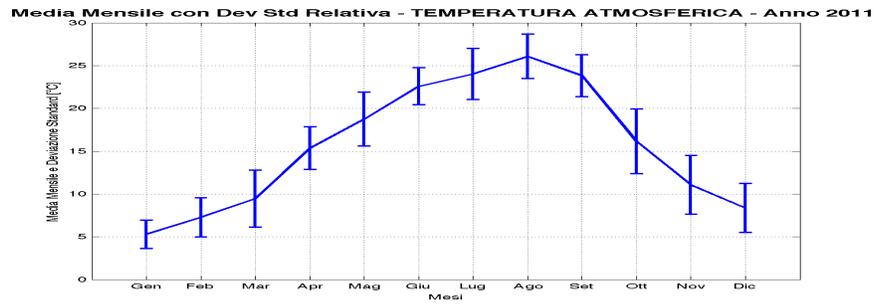


Fig. 8 Media mensile e relativa deviazione standard della temperatura atmosferica

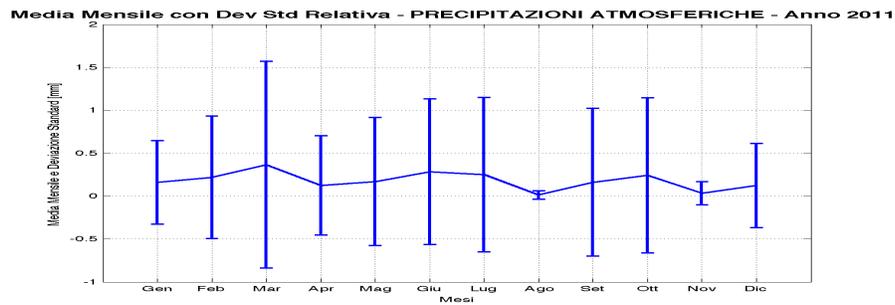


Fig. 9 Media mensile e relativa deviazione standard delle precipitazioni atmosferiche

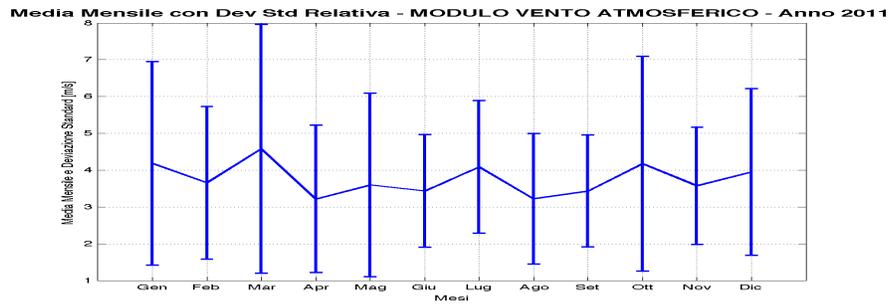


Fig. 10 Media mensile e relativa deviazione standard del modulo del vento atmosferico

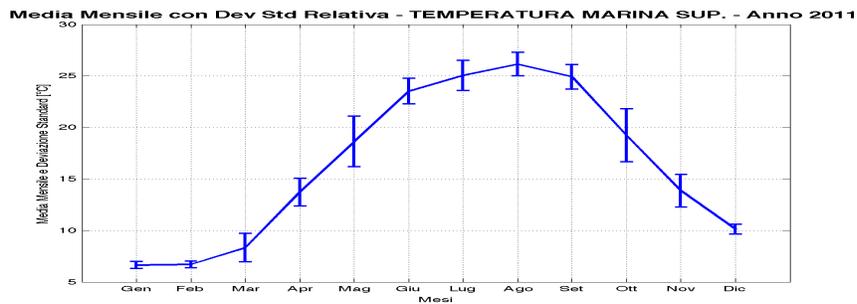


Fig. 11 Media mensile e relativa deviazione standard delle temperatura marina superficiale

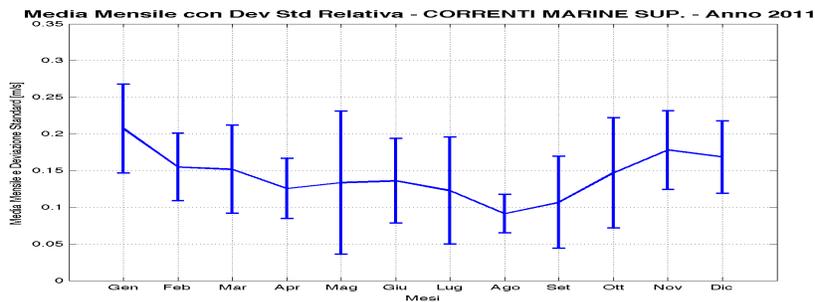


Fig. 12 Media mensile e relativa deviazione standard delle correnti marine superficiali

Per ricercare la presenza di eventi estremi, si è considerata la serie temporale delle anomalie per il 2011 e la metrica utilizzata consiste nel considerare, come soglia per l'individuazione dell'evento estremo, la media mensile delle anomalie più o meno la deviazione standard mensile (Fig.18-22). Nei grafici, quest'ultima è riportata sotto forma di barre orizzontali di colore rosso. Successivamente

la ricerca della soglia di valutazione è stata elaborata in base alla anomalia standardizzata per andare a escludere discordanze significative e per effettuare una più precisa focalizzazione degli eventi più estremi. Impostando la soglia, nei grafici sempre riportata sotto forma di barre di colore rosso, ad un valore di 1.5, è stato possibile restringere il numero delle individuazioni di valori significativi dei parametri considerati (Fig.23-27). La serie temporale, condotta sull'analisi delle anomalie standardizzate, in cui ad ogni valore mensile è stata sottratta la relativa media mensile e questa è stata poi divisa per la relativa deviazione standard, va letta in termini di numero di deviazioni standard di distanza dal valore medio. Sono stati inoltre creati degli istogrammi, uno per ogni variabile di interesse (Fig.13-17), per mostrare il numero di occorrenze significative di eventi intensi che hanno superato le determinate soglie prefissate di anomalia standardizzata durante il corso dell'anno nell'area di studio presa in esame. Grazie ad una valutazione comparata degli istogrammi e dei grafici annuali disponibili: media delle anomalie con deviazione standard e anomalia standardizzata mensile di temperatura atmosferica a 2m (Fig.18/23), del modulo del vento atmosferico a 10m (Fig.19/24), delle precipitazioni atmosferiche cumulate a 6 ore (Fig.20/25), della temperatura marina superficiale (Fig.21/26) e del modulo delle correnti marine superficiali (Fig.22/27), è stato possibile avere una panoramica immediata delle variazioni di anomalia delle variabili di interesse durante tutto il periodo temporale di studio. Dall'osservazione dei grafici, una delle prime evidenze è l'andamento delle anomalie delle temperature marine superficiali che ricalca fedelmente, se non per uno shift circa giornaliero e per una mitigazione nel caso di elevate precipitazioni, l'andamento della media delle anomalie delle temperature atmosferiche a 2m. I picchi delle medie delle anomalie del modulo ventoso atmosferico si ritrovano soltanto in parte ripetuti nel grafico corrispondente delle correnti marine superficiali e, dove non sono ripetuti fedelmente, trovano una corrispondenza nelle giornate di elevate precipitazioni. Elevate precipitazioni trovano immediata correlazione nelle temperature atmosferiche e a seguire, leggermente shiftate, anche nelle temperature marine superficiali. Fenomeni ventosi nell'atmosfera inducono variazioni delle temperature atmosferiche e, quando sono sommati anche a elevate precipitazioni, sembrano favorire anomalie negative nelle scale delle temperature, prima su quelle atmosferiche e poi, per induzione, su quelle marine superficiali. Il vento ha capacità di rimescolamento dell'aria contrastando quindi sia innalzamento che abbassamento della temperatura ma, nei casi in cui è associato a precipitazioni, nei grafici delle temperature in corrispondenza si trovano sempre delle anomalie negative dovute a degli abbassamenti di temperatura. L'evidenza mostra che, tendenzialmente, abbassamenti della temperatura atmosferica coincidono, o seguono leggermente shiftati (da 6 ore a 12 ore), fenomeni di precipitazioni abbinati a fenomeni di moto ventoso.

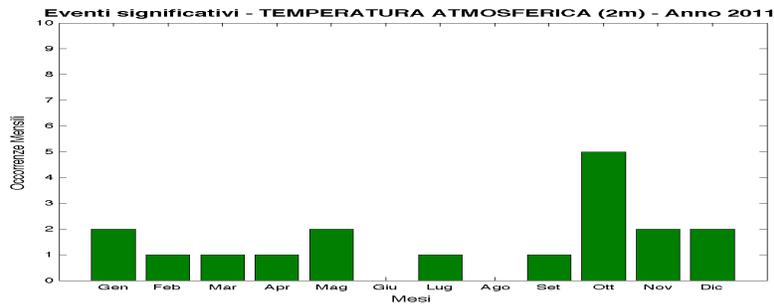


Fig.13 Istogrammi delle occorrenze mensili di eventi significativi per la temperatura atmosferica

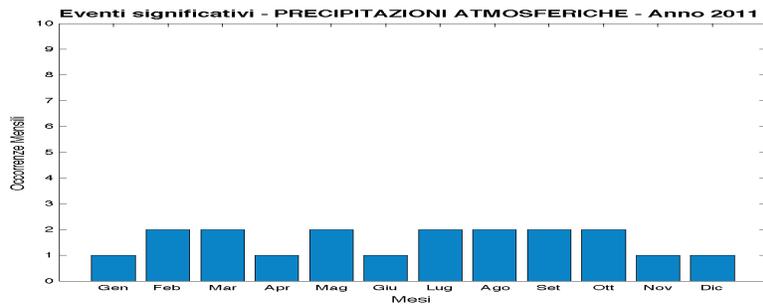


Fig.14 Istogrammi delle occorrenze mensili di eventi significativi per le precipitazioni atmosferiche

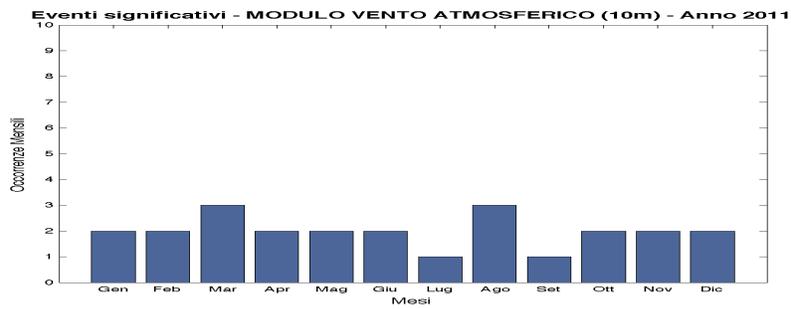


Fig.15 Istogrammi delle occorrenze mensili di eventi significativi per vento atmosferico

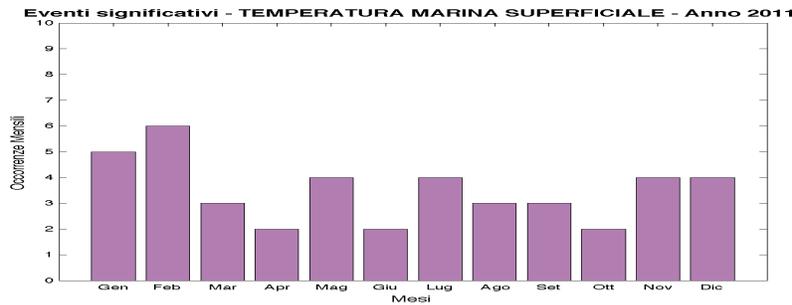


Fig16 Istogrammi delle occorrenze mensili di eventi significativi per le temperatura marina superficiale

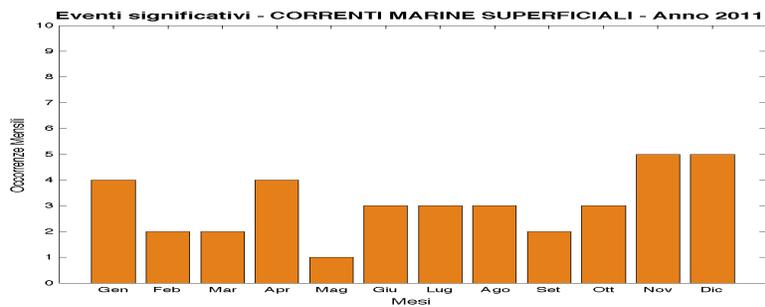


Fig.17 Istogrammi delle occorrenze mensili di eventi significativi per le correnti marine superficiali

Gli istogrammi mostrati sono quelli elaborati sulla base delle anomalie standardizzate, quindi quelli a maggior selettività nel vaglio degli eventi estremi significativi, e mostrano, per ogni parametro, il numero delle occorrenze di eventi significativi a livello mensile, ottenuto dalla somma di eventi che oltrepassano la soglia in positivo o in negativo. E' chiaro che tutte le variabili prese in esame siano altamente correlate tra loro e che le variabili marine ricalcano l'andamento di quelle atmosferiche, ma in maniera leggermente shiftata e con variazioni più contenute. I picchi più evidenti delle anomalie delle correnti superficiali coincidono con quelli delle anomalie negative delle temperature superficiali, e, successivamente a tali eventi estremi di correnti superficiali, si può generalmente notare una risalita graduale della temperatura superficiale che riflette una risalita delle temperature atmosferiche. A seguire vengono mostrati i grafici delle medie delle anomalie, dove viene rappresentata la differenza media e dove come soglia viene riportata l'anomalia media mensile più la relativa deviazione standard mensile, e, successivamente, vengono mostrati i grafici delle anomalie standardizzate, dove come soglia è stato impostato un valore di più o meno 1.5.

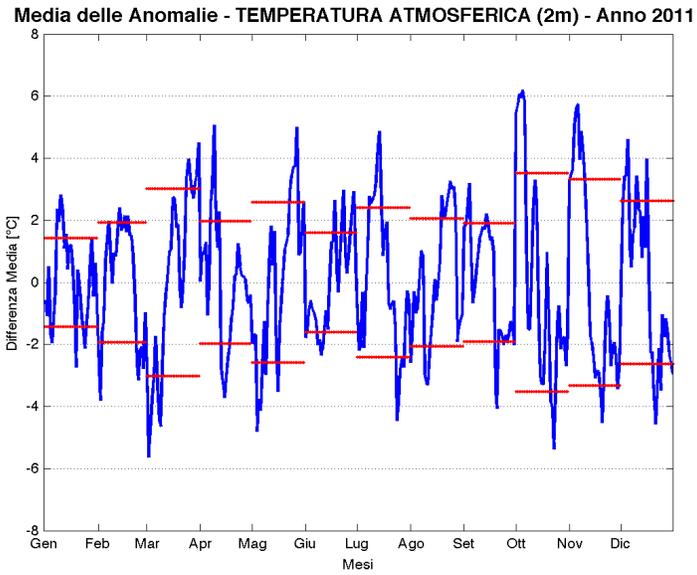


Fig.18 Grafico annuale della media delle anomalie per la temperatura atmosferica - Viene riportata come soglia la media mensile più e meno la relativa deviazione standard mensile

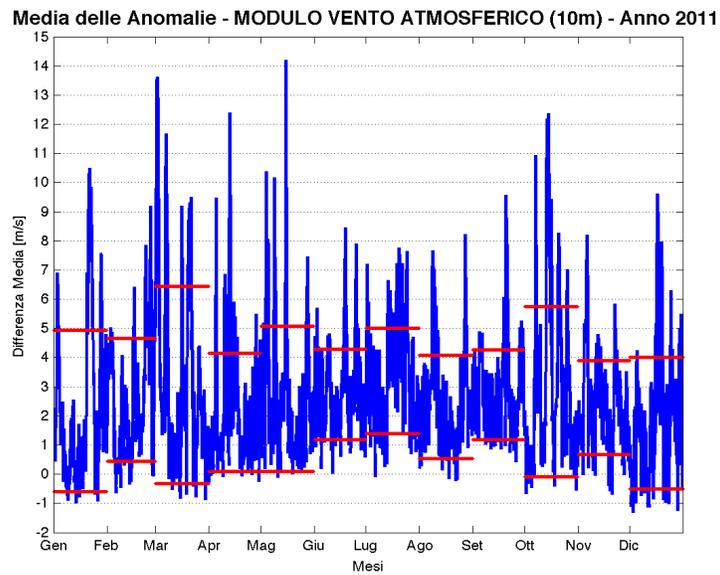


Fig.19 Grafico annuale della media delle anomalie per il modulo del vento atmosferico - Viene riportata come soglia la media mensile più e meno la relativa deviazione standard mensile

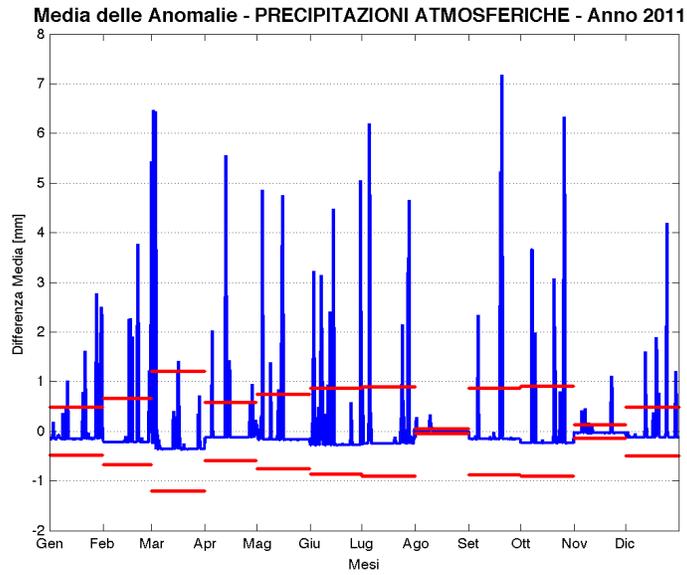


Fig.20 Grafico annuale della media delle anomalie per le precipitazioni atmosferiche - Viene riportata come soglia la media mensile più e meno la relativa deviazione standard mensile

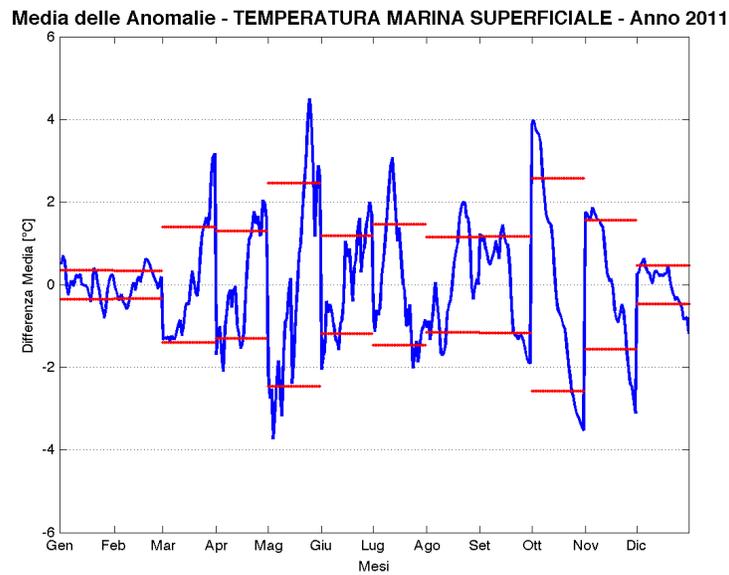


Fig.21 Grafico annuale della media delle anomalie per la temperatura marina superficiale - Viene riportata come soglia la media mensile più e meno la relativa deviazione standard mensile

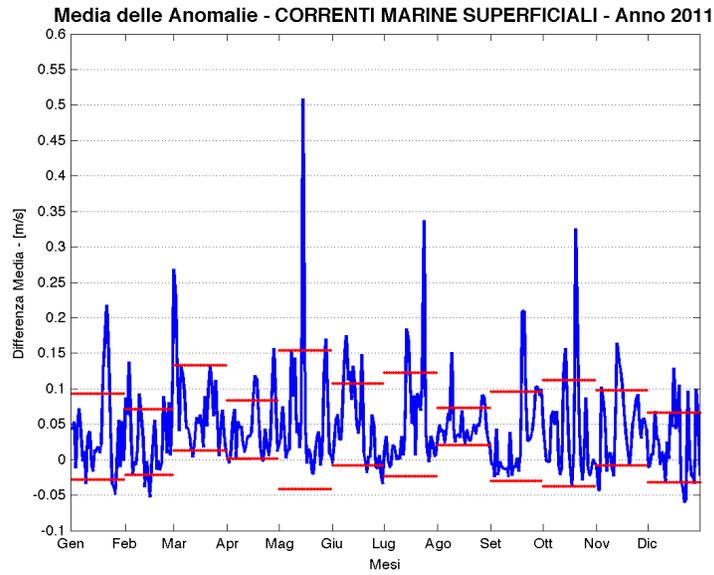


Fig.22 Grafico annuale della media delle anomalie per le correnti marine superficiali - Viene riportata come soglia la media mensile più e meno la relativa deviazione standard mensile

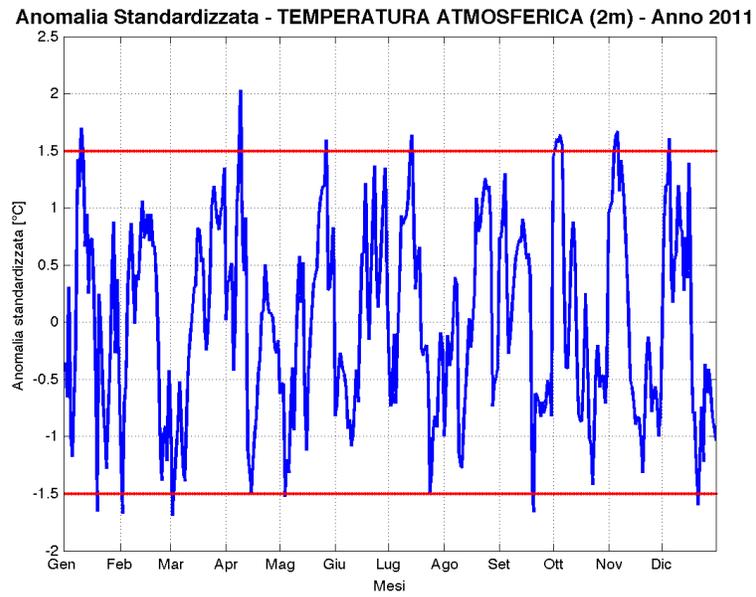


Fig.23 Grafico annuale della anomalia standardizzata per la temperatura atmosferica - Vengono riportati come soglia i valori di +1.5 e di -1.5

Anomalia Standardizzata - MODULO VENTO ATMOSFERICO (10m) - Anno 2011

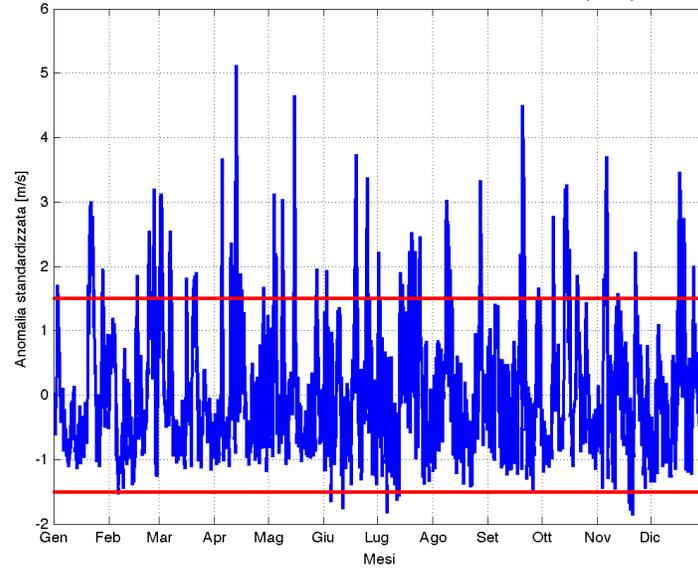


Fig.24 Grafico annuale della anomalia standardizzata per il modulo del vento atmosferico - Vengono riportati come soglia i valori di +1.5 e di -1.5

Anomalia Standardizzata - PRECIPITAZIONI ATMOSFERICHE - Anno 2011

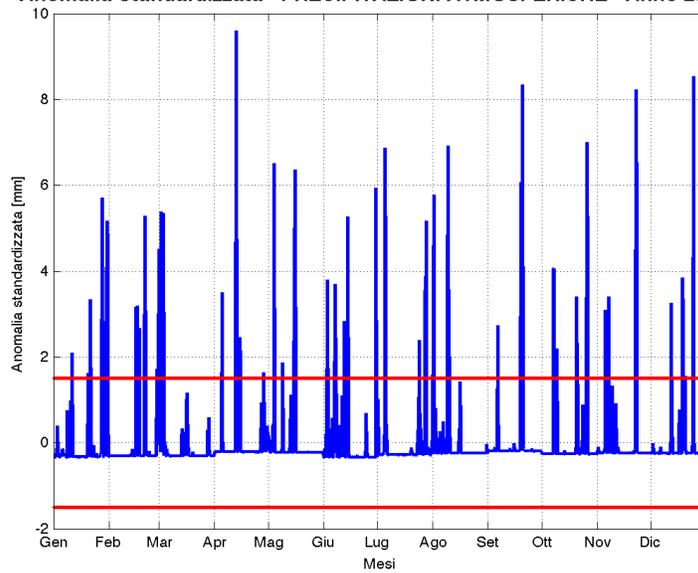


Fig.25 Grafico annuale della anomalia standardizzata per le precipitazioni atmosferiche - Vengono riportati come soglia i valori di +1.5 e di -1.5

Anomalia Standardizzata - TEMPERATURA MARINA SUPERFICIALE - Anno 2011

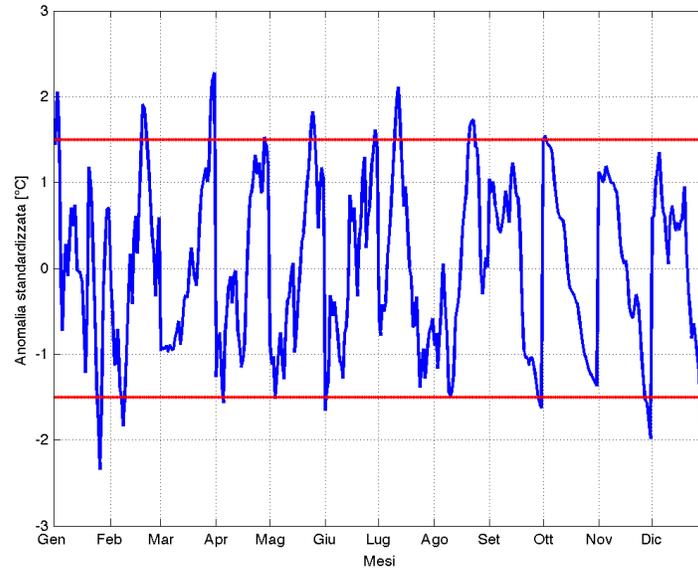


Fig.26 Grafico annuale della anomalia standardizzata per la temperatura marina superficiale - Vengono riportati come soglia i valori di +1.5 e di -1.5

Anomalia Standardizzata - CORRENTI MARINE SUPERFICIALI - Anno 2011

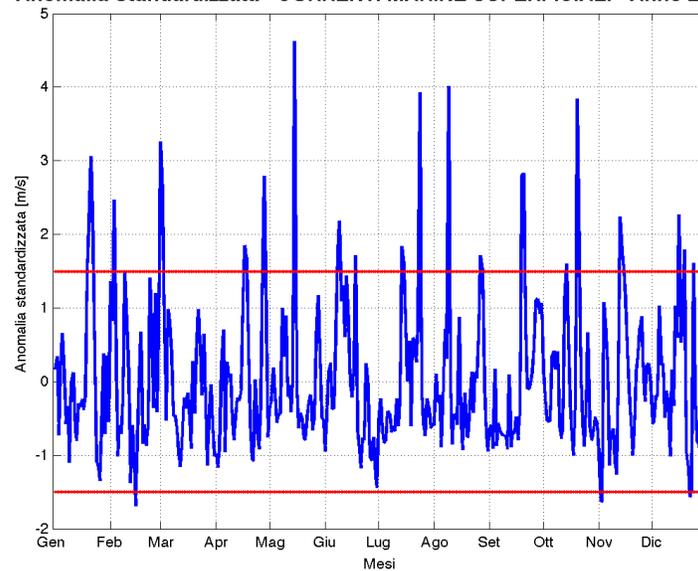


Fig.27 Grafico annuale della anomalia standardizzata per le correnti marine superficiali - Vengono riportati come soglia i valori di +1.5 e di -1.5

GENNAIO Partendo dai grafici delle variabili atmosferiche, focalizzando l'attenzione sul mese di Gennaio, si è notato come nonostante un evento ventoso elevato (riscontrato poi a seguire anche sulle correnti marine superficiali) si fosse verificato attorno al 20 del mese. Gli istogrammi confermano una buona tendenza di eventi significativi, riscontrabili nei grafici soprattutto nella seconda metà del mese. E' soltanto nelle giornate del 29-31 che tutte e tre le variabili presentano valori di anomalia ben oltre la deviazione standard. Chiari riscontri si possono trovare anche negli andamenti delle anomalie standardizzate delle relative variabili. Per le variabili marine, con l'ecosistema marino a percepire shiftato i valori atmosferici, si nota l'inizio di un fenomeno di correnti e la temperatura superficiale diminuisce gradualmente: dopo un raffreddamento dell'atmosfera, l'acqua del mare non si raffredda immediatamente, ma metabolizza il cambiamento. Troviamo un pieno riscontro nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/02 dell'evento dal 29 al 31 gennaio 2011*, caratterizzato da ampie precipitazioni su tutta la zona di studio durante l'arco delle due giornate.

FEBBRAIO - MARZO Nei mesi di Febbraio e Marzo, al di là di qualche anomalia di vento (metà del mese di Marzo) e di precipitazioni (metà del mese di Febbraio), entrambe riscontrabili negli archivi dei siti meteorologici e negli archivi dei quotidiani locali, possiamo riscontrare un'evidenza davvero notevole, confermata anche dai valori delle anomalie standardizzate, a ridosso del passaggio da un mese all'altro, in particolare nel periodo 27 Febbraio - 4 Marzo. Gli istogrammi mostrano come, a livello quantitativo, i due mesi in esame si trovino all'interno della media annuale di eventi significativi, con qualche eccellenza nelle occorrenze di vento atmosferico e temperature marine superficiali. Dai grafici si può immediatamente notare come a elevate precipitazioni, con valori di circa 6.5 volte la deviazione standard e con anomalia standardizzata di circa 5, siano associati fenomeni ventosi estremi (i secondi in ordine di grandezza, come media delle anomalie, riscontrati su tutto l'anno e con anomalia standardizzata di circa 3) e un brusco calo delle temperature, il più elevato dell'anno sia sulla media delle anomalie sia sull'anomalia standardizzata. Il fenomeno ventoso trova un'immediata conseguenza anche nei valori delle anomalie delle correnti marine superficiali e le temperature marine superficiali mostrano un deciso e brusco abbassamento dei valori, che comunque rimangono all'interno degli estremi delle deviazioni standard di Marzo per conseguenza dell'effetto della mitigazione operata dal mare. L'evento risulta perfettamente documentato nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/03 dell'evento dal 27 febbraio - 4 marzo 2011*, dove viene descritta anche la presenza di fenomeni nevosi all'interno dell'area di studio: si tratta dunque di un evento decisamente 'estremo', vista la particolarità di precipitazioni per l'area di interesse, decisamente straordinaria per il periodo temporale in cui si è verificata.

APRILE Precipitazioni elevate, le uniche riscontrate nell'istogramma delle occorrenze, si concentrano nei giorni 14-15 e portano nell'immediato al brusco calo delle temperature atmosferiche, ad una anomalia di vento decisamente significativa e alla ripercussione sulle componenti marine, con temperature marine superficiali che diminuiscono oltre la deviazione standard e correnti superficiali che subiscono un brusco aumento anch'esse oltre la deviazione standard. Tutti

i valori trovano riscontro anche nei grafici delle anomalie standardizzate, con un trend significativo che caratterizza tutta la prima metà del mese. Nelle giornate in esame, è documentato un evento significativo dal *Rapporto ARPA-EMR 2011/05 dell'evento dal 14-15 aprile 2011*, con la presenza di un fronte freddo su tutta la regione e con lo sviluppo di fenomeni temporaleschi sull'area di studio.

MAGGIO Nel mese di Maggio, dall'analisi dei grafici, risultano immediatamente evidenti alcuni estremi significativi nei primi giorni del mese e attorno al 15. Occorrenze elevate per temperature atmosferiche e marine superficiali, mentre gli altri valori si presentano nella norma. Brusco calo di temperature, elevate precipitazioni e decise anomalie ventose, in particolare nella giornata del 15 quando il vento presenta un'anomalia, ben oltre la deviazione standard, di circa 14 m/s superiore al valore medio del mese; questa risulta essere l'anomalia ventosa più importante di tutto l'anno. A livello marino, ciò si riflette con la maggiore anomalia riscontrata sull'anno a livello di modulo delle correnti superficiali e con una immediata diminuzione delle temperature superficiali marine. I movimenti delle anomalie standardizzate mostrano conferme su tutte le variabili di interesse e la soglia impostata permette di confermare i due eventi significativi. Troviamo riscontro nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/06 dell'evento dal 03-04 maggio 2011*, che descrive alcune celle temporalesche che hanno attraversato velocemente da nord a sud le province centro-orientali della Regione Emilia-Romagna, con valori di pioggia, registrati da alcune stazioni, superiori a 20 mm in un'ora e con raffiche di vento forte nelle province orientali. E nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/08 dell'evento dal 15 maggio 2011* che mostra un'onda depressionaria veloce su tutta la giornata in esame. Fenomeni a carattere di rovescio interessano dapprima le province centro-occidentali della regione e nel pomeriggio sera l'area orientale. Raffiche di vento fino a 20 m/s sul crinale appenninico centro-occidentale e in serata sulle zone costiere orientali.

GIUGNO Tutta la prima parte del mese risulta ricca di precipitazioni che portano ad abbassamento delle temperature atmosferiche e di quelle marine superficiali. Troviamo inoltre venti che, limitatamente, eccedono la deviazione standard e comunque si ripercuotono in un incremento delle correnti marine superficiali, di cui vengono riscontrate occorrenze sopra la media annuale. Vengono riscontrate alluvioni nelle provincie occidentali della regione che, soltanto in parte, arrivano a turbare le zone costiere come testimoniato dai *Rapporti ARPA-EMR 2011/09 dell'evento del 4-5 giugno 2011*, *2011/10 dell'evento del 6-7 giugno 2011* e *2011/11 dell'evento del 9-11 giugno 2011*. Dalla metà del mese, con l'arrivo della stagione estiva, si ha un deciso aumento delle temperature atmosferiche senza comunque eccedere la soglia di anomalia standardizzata (infatti non vengono segnalate occorrenze significative), con presenza di fenomeni ventosi medi (non si tratta più della Bora invernale, ma dello Scirocco, vento caldo proveniente da sud-est) e di qualche acquazzone estivo nelle ultime giornate del mese. L'intensità delle correnti marine superficiali, dai grafici, risultano praticamente nella media, mentre anche per le temperature marine superficiali è mostrato un deciso aumento che fa seguito a quello avuto dalle temperature atmosferiche. Le anomalie standardizzate mostrano il passaggio alla stagione

estiva di metà mese senza una presenza elevata di valori significativi, se non per le precipitazioni nella prima parte del mese e negli ultimi due giorni. Il *Rapporto ARPA-EMR 2011/12 dell'evento del 29 giugno 2011* segnala, nelle giornate del 29-30 Giugno, precipitazioni e attività temporalesche che insistono parzialmente anche sul litorale Ravennate.

LUGLIO Il mese inizia risentendo degli eventi di Giugno ma, salvo qualche precipitazione, dai grafici risulta caratterizzato da un deciso e progressivo aumento delle temperature sia atmosferiche che marine superficiali. Si possono notare, a livello di temperature, le occorrenze in aumento a livello atmosferico e nella media a livello marino. Le altre variabili rimangono all'interno della media annuale, mentre il vento presenta soltanto due occorrenze di eventi significativi, rimanendo sotto la media annuale. Il vento e le correnti marine risultano essere nella norma e perfettamente all'interno dei parametri di deviazione standard. L'estate sembra raggiungere il suo picco attorno alla metà del mese, per poi subire un brusco calo delle temperature atmosferiche e, di conseguenza, di quelle marine. Inoltre, a un deciso aumento dei fenomeni ventosi, fanno seguito due picchi di anomalia nelle correnti marine superficiali e, nelle ultime giornate del mese, alcuni fenomeni di precipitazione con valori di circa 2 e 4.5 volte la deviazione standard, tutti confermati anche dalle anomalie standardizzate. Nei giorni dal 13 al 15 Luglio, le testate locali segnalano temperature dai 32 ai 36°C su tutta la provincia di Ravenna, oltre a preannunciare un brusco calo di temperatura con l'arrivo di masse d'aria fredde di origine atlantica che potrebbero portare anche alcuni fenomeni temporaleschi verso la fine del mese. L'evidenza del grafico delle precipitazioni trova conferma nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/14 dell'evento del 23-24 luglio 2011* e nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/15 dell'evento del 28-31 luglio 2011*, dove vengono esplicitate precipitazioni diffuse anche sulla zona costiera di Ravenna.

AGOSTO Correnti superficiali e precipitazioni presentano poche occorrenze di eventi significativi, mentre tutte le altre variabili presentano valori in aumento, escluso il valore degli eventi significativi a livello di temperature atmosferiche che, nonostante siano in deciso aumento su tutto il mese, non oltrepassano mai la soglia impostata per l'anomalia standardizzata. Analizzando i grafici dei parametri meteo-oceanografici considerati, per il mese di Agosto, si evidenzia l'andamento delle anomalie nella prima parte del mese, tutte confermate anche dai valori di anomalia standardizzata. I quotidiani locali riportano notizia di un temporale estivo il 13 del mese: un picco di precipitazioni, seguito da abbassamento repentino delle temperature atmosferiche e superficiali marine. A metà mese, si osserva la presenza di picchi ventosi e conseguente picco di aumento delle correnti superficiali marine. Nei giorni successivi, le temperature tornano a salire e i valori delle altre variabili si normalizzano, per poi mostrare un fenomeno analogo nelle ultime giornate del mese. E' documentata, nell'archivio storico della stazione meteorologica di Punta Marina nella giornata del 27, la presenza di vento oltre i 30km/h con conseguente abbassamento della temperatura atmosferica, in particolare delle minime giornaliere dei giorni successivi.

SETTEMBRE Dagli istogrammi è interessante notare come, per il vento atmosferico e per le temperature atmosferiche, sia presente una sola occorrenza

significativa. Per le altre variabili atmosferiche e marine superficiali, numero di occorrenze significative nella media, con eventi significativi in positivo della prima metà del mese che si sommano ad eventi in negativo della seconda metà. Tra la seconda e la terza decade del mese, tutti i grafici mostrano delle marcate anomalie. Il più alto valore di anomalia media delle precipitazioni sull'arco dell'anno (nei tre più significativi come anomalia standardizzata), associato a decise anomalie di modulo del vento e, in negativo, di temperatura atmosferica. Queste anomalie si riflettono sulle variabili marine in maniera differente: immediatamente sulle correnti superficiali e progressivamente sulle temperature superficiali. Sono documentati sui quotidiani locali e nell'archivio storico della stazione meteorologica di Punta Marina, precipitazioni, rovesci e temporali di diversa entità nelle giornate del 18, 19 e 20 del mese.

OTTOBRE Proseguono le occorrenze più alte dell'anno a livello di temperature atmosferiche, supportate in parte da quelle marine, con le occorrenze in positivo nella prima metà del mese che si protraggono in maniera continuata. E' evidenze la tendenza meteorologica, con il passaggio dalla stagione estiva a quella invernale. Al termine della prima settimana del mese, si possono notare anomalie nel grafico delle precipitazioni con valori di quasi 4 volte la deviazione standard e con valori significativi di anomalia standardizzata di circa 4, un brusco e deciso calo delle temperature atmosferiche (dopo che la prima settimana aveva mostrato un deciso proseguimento estivo), e un picco del modulo del vento atmosferico, che non riscontra valori oltre la deviazione standard nelle correnti marine superficiali. Le temperature marine superficiali mostrano, su tutto il mese, una diminuzione regolare e costante, sino a raggiungere valori inferiori alla deviazione standard, ma che trova conferma nei valori delle stesse di anomalia standardizzata. Il *Rapporto ARPA-EMR 2011/17 dell'evento del 7 ottobre 2011* conferma un evento significativo caratterizzato da venti forti, precipitazioni ed un fronte di aria fredda. L'evento ha interessato la zona costiera romagnola soltanto in fase di esaurimento. I grafici mostrano inoltre, nell'ultima decade del mese, due picchi di precipitazioni (di cui, uno decisamente elevato), un brusco e repentino calo della temperatura atmosferica, modeste anomalie di vento ma decise anomalie di correnti superficiali. Troviamo conferma di precipitazioni, di eventi ventosi medi e di un abbassamento delle temperature, nel *Rapporto ARPA-EMR 2011/18 dell'evento del 19-20 ottobre 2011*.

NOVEMBRE Le immediate evidenze per il mese di Novembre riguardano le temperature atmosferiche, che mostrano un picco iniziale in corrispondenza di evento ventoso (anomalia standardizzata di circa 3.5) con successiva degradazione lineare quasi costante, e le precipitazioni, con valori di deviazione standard ristretta e un picco significativo al passaggio tra la seconda e la terza decade del mese. Sul lato marino, temperature superficiali che ricalcano l'andamento di quelle atmosferiche e correnti superficiali che presentano un solo picco positivo significativo attorno alla metà del mese. Non sono stati registrati eventi estremi significativi per il mese di Novembre. Gli istogrammi mostrano il proseguimento del trend di abbassamento delle temperature, con eventi significativi nella media sia a livello atmosferico che marino. Sono presenti eventi ventosi che inducono l'aumento di eventi significativi a livello di correnti marine superficiali.

DICEMBRE Nonostante alcune anomalie iniziali superiori alla deviazione standard, la temperatura atmosferica, confermata anche dal grafico della anomalia standardizzata, prosegue il trend dei due mesi precedenti e segnala una progressiva diminuzione, con un picco in negativo all'inizio della terza decade del mese. Il vento presenta un picco estremo, sia di differenza media delle anomalie che di anomalia standardizzata, nelle giornate attorno al 15, uno più ristretto al 24 e infine un cumulo nelle giornate del 29, 30 e 31. Le precipitazioni mostrano anomalie significative con 2 picchi nella seconda decade e l'evento maggiore nella giornata del 24, infine anomalie di entità più ristretta il 29 e il 30. Le temperature marine superficiali si mantengono praticamente costanti durante le prime due decadi del mese e poi subiscono un abbassamento repentino nell'ultima decade. Le correnti marine superficiali ricalcano l'andamento del vento atmosferico. Per il mese in esame, sono stati osservati eventi estremamente significativi sulla zona di interesse a partire dalla giornata del 29, con l'intensificarsi dei fenomeni nei giorni successivi sino al culmine delle neviccate nella giornata del 31 e dei successivi giorni di Gennaio 2012. Una descrizione meteorologica dell'evento è presente nel *Rapporto ARPA-EMR 2012/01 dell'evento del 31 gennaio - 5 febbraio 2012*. Numeri delle occorrenze, per il mese di Dicembre, che tornano all'interno della media annuale, eccezion fatta per le correnti marine superficiali, che presentano il numero massimo di eventi significativi.

4 Conclusioni

Sicuramente l'area di studio presa in esame non è storicamente soggetta ad eventi estremi nel senso stretto del termine, nonostante ciò, la mole dei dati presi in esame (oltretutto riferita al solo anno 2011) ha evidenziato come possano essere catalogati sotto 'estremi' alcuni valori che sono chiara espressione di anomalie ben distinte. Evidenziare delle anomalie all'interno di dataset di dati così eterogenei non è semplice e risulta possibile soltanto grazie all'utilizzo di moderne tecnologie informatiche. Caratterizzare le anomalie richiede poi un lavoro di studio e di scelta di parametri, e anche qui entrano in gioco, oltre alla matematica, alla statistica e alla potenza dei calcolatori informatici, la straordinaria efficienza dei modelli di previsione come il COSMO-ME o l'AFS-ARGC utilizzati all'interno di questo elaborato. La struttura climatologica utilizzata, seppure preliminare, ha permesso una catalogazione degli eventi estremi che concorda con i rapporti di eventi significativi realmente accaduti. L'uso dei modelli previsionali per individuare le occorrenze di anomalie significative pare efficace anche su aree ristrette e su scale temporali limitate. La concordanza tra le anomalie riscontrate nei grafici prodotti dai dati dei modelli previsionali e la verifica di avvenimenti estremi significativi realmente accaduti, rende possibile l'utilizzo dei modelli COSMO-ME e AFS per lo studio di previsioni di eventi estremi futuri.

5 Bibliografia

Pubblicazioni

- A. Artegiani, D. Bregant, E. Paschini, N. Pinardi, F. Raicich, A. Russo. *The Adriatic Sea General Circulation Part I: Air-Sea Interaction and Water Mass Structure*. Journal of physical Oceanography, 1997.
- A. Artegiani, D. Bregant, E. Paschini, N. Pinardi, F. Raicich, A. Russo. *The Adriatic Sea General Circulation Part II: Baroclinic Circulation Structure*. Journal of physical Oceanography, 1997.
- S. Dobricic, N. Pinardi, M. Adani, M. Tonani, C. Fratianni, A. Bonazzi, V. Fernandez. Daily oceanographic analyses by Mediterranean Forecasting System at the basin scale. Ocean Sci, 2007
- A.R. Robinson, W.G. Leslie, A. Theocharis, A. Lascaratos. *Mediterranean Sea Circulation*. Indira, 2001.
- C. Cacciamani, R. Tomozeiu, V. Pavan, A. Morgillo, S. Marchesi. *Come cambierà nel corso del 21° secolo la frequenza di eventi estremi in Emilia-Romagna?* ARPA-SIM, 2005.
- J. Hansen, M. Sato, J. Glascoe, and R. Ruedy. *A common sense climate index: Is climate changing noticeably?* Proc. Natl. Acad. Sci., 1998.
- J. Hansen, M. Sato, and R. Ruedy. *From the Cover: PNAS Plus: Perception of climate change*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2012.
- M. Tonani, N. Pinardi, S. Dobricic, I. Pujol, C. Fratianni. *A high-resolution free-surface model of the Mediterranean Sea*. Ocean Science, 2008.
- B. Cushman-Roisin, M. Gacic, P.M. Poulain, A. Artegiani. *Physical Oceanography of the Adriatic Sea: Past, Present and Future*. Kluwer Academic Publisher, 2001.
- N. Pinardi, M. Zavatarelli, A. Maggiore, M.G. Angelucci. *Surface Heat and Water Fluxes in the Adriatic Sea: Seasonal and Interannual Variability*. Phys. Chem. Earth, 1998.
- N. Pinardi, M. Zavatarelli, V.H. Kourafalou, A. Maggiore. *Diagnostic and Prognostic Model Studies of the Adriatic Sea General Circulation: Seasonal Variability*. Journal of Geophysical Research, 2002.
- Meteorological Office. *Weather in the Mediterranean*. Air Ministry. British Meteorological Office, 1962.

- L. Roi. *Elementi di Teoria degli Errori*. Edizioni H-Alpha, 2012.
- S. Ciampolillo, M. Loreti. *Teoria degli Errori e Analisi dei Dati*. Università degli Studi di Padova, 1993.
- D. S. Wilks. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Elsevier Academic Press, 2011.
- M. Bonavita, L. Torrisi. *Impact of a variational objective Analysis Scheme on a regional area numerical model: the Italian Air Force weather service experience*. Meteor. and Atmos. Phys., 2005.
- K. Ide, P. Courtier, M. Ghil, A.C. Lorenc. *Data assimilation in Meteorology and Oceanography: Theory and Practice*. Cambridge University Press, 1997.
- M. Zavatarelli, J.W. Baretta, J.G. Baretta-Bekker, N. Pinardi. *The dynamics of the Adriatic Sea Ecosystem. An idealized model study*. Deep-Sea Research, 2000.
- C. Cacciamani, V. Pavan, S. Tibaldi, R. Tomozeiu. *Cambiamenti climatici e meteoroclimatologia*. Servizio Idro-Meteo-Clima ARPA, 2003.
- C. Cacciamani, R. Tomozeiu, V. Pavan. *Cambiamenti climatici in valori medi ed estremi di temperatura e precipitazione in Emilia-Romagna*. Quaderno Tecnico ARPA-SMR, 2003.
- R. Tomozeiu, C. Cacciamani, V. Pavan, A. Morgillo, A. Busuioc. *Climate change scenarios for surface temperature in emilia-romagna (italy) obtained using statistical downscaling models*. Theor. Appl. Climatology, 2007.
- M. Amici, R. Tomozeiu, V. Pavan, C. Cacciamani. *Observed temperature changes in Emilia-Romagna: mean values and extremes*. Climate Research, 2006.
- G. Montanari, N. Pinardi. *The currents of Emilia-Romagna coastal strip during the period 1995-2002*. Quaderno Tecnico ARPA-SMR, 2006.

Siti Internet

- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - <http://www.ecmwf.int>
- Agenzia Regionale Prevenzione e Ambiente dell'Emilia-Romagna - <http://www.arpa.emr.it>
- Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare - <http://www.meteoam.it>
- Istituto di Scienze Marine - <http://www.ismar.cnr.it>

- Adriatic Sea Forecasting System - <http://www.gnoo.bo.ingv.it/afs>
- Consortium for Small-scale Modeling - <http://www.cosmo-model.org>
- Average Data for Meteorological Stations - <http://www.worldclimate.com/>
- Rete del Sistema Informativo Nazionale Ambientale - <http://www.scia.sinanet.apat.it>
- Tabelle Climatiche dall'Atlante Climatico - <http://clima.meteoam.it/AtlanteClimatico/>
- World Meteorological Organization - <http://www.wmo.int>
- Climate Prediction Center - <http://www.cpc.ncep.noaa.gov>
- National Oceanic and Atmospheric Administration - <http://www.noaa.gov>
- Servizio Idro Meteo Clima - <http://www.arpa.emr.it/sim>
- Institute of Atmospheric Sciences and Climate of the Italian National Research Council - <http://www.isac.cnr.it>
- European Climate Assessment & Dataset Project - <http://eca.knmi.nl>
- University Corporation for Atmospheric Research - <http://www2.ucar.edu/>
- Open Geospatial Consortium - <http://www.opengeospatial.org/>
- Unidata tools for Geoscience - <http://www.unidata.ucar.edu/>
- RealClimate - <http://www.realclimate.org>
- The Climatic Research Unit Global Climate Dataset - http://www.ipcc-data.org/obs/cru_climatologies.html
- MathWorks MatLab - <http://www.mathworks.com>
- Matlab Tutorial a cura di G. Ciaburro - <http://www.ciaburro.it/matlab/index.html>